Evaluation des Einsatzes von Elektrofahrzeugen in betrieblichen Fahrzeugflotten mit spezifischen Methoden des Carsharing

Untersuchungen von Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit sowie Ansätzen zur Steigerung dieser

Jonas Labode

Elektrofahrzeuge
Fahrzeugflotten
Carsharing
Untersuchung von Nachhaltigkeit
Elektrofahrzeuge
Wirtschaftlichkeit
Evaluation des Einsatzes

UV Universitätsverlag Hildesheim

Jonas Labode
Evaluation des Einsatzes von Elektrofahrzeugen in betrieblichen Fahrzeugflotten mit spezifischen Methoden des Carsharing

Jonas Labode

Evaluation des Einsatzes von Elektrofahrzeugen in betrieblichen Fahrzeugflotten mit spezifischen Methoden des Carsharing

Untersuchungen von Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit sowie Ansätzen zur Steigerung dieser

UV Universitätsverlag Hildesheim

Hildesheim 2019

Impressum

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Diese elektronische Publikation ist mit der Creative-Commons-Nutzungslizenz
BY-NC-ND (Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitung)
versehen. Weitere Informationen unter:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode

Universitätsverlag Hildesheim
Universitätsplatz 1
31141 Hildesheim

https://www.uni-hildesheim.de/bibliothek/forschen-publizieren/
universitaetsverlag/

Erstausgabe Hildesheim 2019
Satz und Layout: Jonas Labode
Titelblattgestaltung: Jan Jäger

Der Beitrag ist abrufbar unter:
http://dx.doi.org/10.18442/028

Zitierempfehlung:

Labode, Jonas (2019). *Evaluation des Einsatzes von Elektrofahrzeugen in betrieblichen Fahrzeugflotten mit spezifischen Methoden des Carsharing. Untersuchungen von Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit sowie Ansätzen zur Steigerung dieser.* Hildesheim: Universitätsverlag Hildesheim.
DOI: http://dx.doi.org/10.18442/028 (Open Access)

Evaluation des Einsatzes von Elektrofahrzeugen in betrieblichen Fahrzeugflotten mit spezifischen Methoden des Carsharing

- Untersuchungen von Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit sowie Ansätzen zur Steigerung dieser -

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Dr. rer. nat.
im Bereich der Umweltwissenschaften
Fachbereich 4 der Stiftung Universität Hildesheim

vorgelegt von

M.Sc. Jonas Labode
geboren am 25.08.1988 in Neustadt am Rübenberge

Gutachter:
Prof. Dr. Martin Sauerwein (Universität Hildesheim)
Prof. Dr. Helmut Lessing (Universität Hildesheim)
Prof. Dr. Jorge Marx Gómez (Universität Oldenburg)

Tag der Disputation: 01.04.2019

Kurzdarstellung der Arbeit

Die Elektromobilität gilt zunehmend als Hoffnungsträger zur Schadstoffreduktion im Verkehrssektor. Als prädestiniertes Einsatzfeld für Elektrofahrzeuge wird in der Literatur oft die gewerbliche Fahrzeugnutzung genannt, da diese sich durch rationale, wirtschaftlichkeitsorientierte Entscheidungsprozesse und gut vorhersagbare Mobilitätsbedarfe auszeichnet.

Fraglich ist bisher jedoch, ob Elektrofahrzeuge mit ihren Leistungscharakteristika, welche bezüglich Reichweite und Ladezeiten deutlich abweichen von den Eigenschaften herkömmlicher, mit fossilen Kraftstoffen betriebener Fahrzeuge, für den Betriebseinsatz geeignet sind. Auch auf die Frage, ob und unter welchen Bedingungen tatsächlich eine Schadstoffreduktion durch ihre Nutzung im Betriebskontext erzielbar ist, besteht in der Literatur bisher kein Konsens. Analog stellt sich die Frage nach den Rahmenbedingungen für ihren wirtschaftlichen Einsatz.

Als entscheidenden Faktoren für einen wirtschaftlichen wie ökologischen Betrieb von Elektrofahrzeugen weisen Lebenszyklusbetrachtungen eine hohe Fahrzeugauslastung aus, die Herkunft des zum Betrieb genutzten Stroms ist daneben insbesondere für die ökologische Vorteilhaftigkeit entscheidend. Daher legt die vorliegende Arbeit ihren Fokus auf die Evaluation von Maßnahmen, die entsprechende Rahmenbedingungen für die Nutzung von Elektrofahrzeugen im Betriebskontext sicherstellen sollen. Dies sind ein Carsharingkonzept zur Auslastungssteigerung, sowie eine Eigenstromerzeugung am Betriebsstandort.

Als Metriken werden die Total Cost of Ownership der Fahrzeuge zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit, sowie die durch ihren Betrieb verursachten Lebenszyklusemissionen, umgerechnet in CO_2-Äquivalente, zur Bemessung der ökologischen Auswirkungen des Fahrzeugbetriebs eingesetzt.

Das zu evaluierende Carsharingkonzept sieht eine Sekundärnutzung der Fahrzeuge außerhalb der Betriebszeiten vor. Begründet ist dieses Konzept in der Annahme, dass in diesem Zeitraum kaum eine betriebliche Fahrzeugnutzung vorliegt und somit Potential für eine Zweitnutzung besteht. Als prädestinierte Sekundärnutzer werden die Mitarbeiter des Unternehmens, welches den Fuhrpark unterhält, angenommen, da davon ausgegangen wird, dass sich ihr (privater) Mobilitätsbedarf zeitlich komplementär zum betrieblichen Mobilitätsbedarf verhält.

Für eine lokale Stromerzeugung wird exemplarisch die Photovoltaik verwendet. Dies wird mit der Annahme begründet, dass die Voraussetzungen für ihren Einsatz, verglichen mit anderen Methoden der nachhaltigen Stromerzeugung, am ehesten an einem generischen Betriebsstandort vorhanden sind.

In einem Testfuhrpark werden Elektrofahrzeuge durch praktischen Einsatz auf ihre Leistungscharakteristica geprüft. Ebenso wird der betriebliche Mobilitätsbedarfs über einen repräsentativen Zeitraum hinweg erfasst. Aus dieser Datenbasis heraus wird eine Kalkulation des Bedarfs an Verbrennerfahrzeugen und das Potential für ihre Substitution durch Elektrofahrzeuge bestimmt. Sowohl für den konventionellen, als auch für den mit Elektrofahrzeugen ausgestattenten Fuhrpark werden Wirtschaftlichkeit und Emissionsverursachung bestimmt.

Anschließend wird der Einfluss der unterstützenden Maßnahmen durch Anpassung der Fuhrparkmodelle evaluiert. Als Grundlage dienen eine empirische Anwendung des Carsharingmodells im Betriebsfuhrbark und die Erfassung des Solarstromerzeugungspotentials am Unternehmensstandort.

Die Erhebungen zeigen, dass im untersuchten Fuhrpark signifikante Einsatzpotentiale für Elektrofahrzeuge vorhanden sind, jedoch bei einer rein betrieblichen Nutzung kein Emissionsvorteil gegenüber dem Einsatz von Verbrennerfahrzeugen erzielt werden kann und deutliche Zusatzkosten anfallen. Eine Auslastungsprofil, welches ein Potential für eine Zweitnutzung der Fahrzeuge bietet, kann für einen Teil des Fuhrparks festgestellt werden.

Durch Anwendung des konzipierten Carsharingkonzepts kann ein Emissionsvorteil gegenüber dem herkömmlichen Fuhrpark sichergestellt und die Mehrkosten durch die Elektrofahrzeugnutzung deutlich gesenkt werden. Einschränkungen auf die Zweitverwendung haben in der Testumsetzung nicht die technischen Eigenschaften der Elektrofahrzeuge verursacht, sondern die betriebliche Fahrzeugnutzung außerhalb der Kernarbeitszeiten, welche das zu erwartende Maß bei weitem übersteigt.

Die lokale Gewinnung von Strom in relevantem Ausmaß durch Einsatz von Photovoltaik erweist sich als am Betriebsstandort praktikabel und in ihrer Emissionsverursachung vorteilhaft gegenüber dem Netzbezug von Strom. Jedoch ist die Nutzung lokal erzeugten Stroms aus einer Photovoltaikanlage, durch die hohe Volatilität der Erzeugung, nur mit Hilfe einer Zwischenspeicherung in der Lage, einen signifikanten Anteil des Strombedarfs zu decken und so tatsächlich die Emissionen des Fuhrparks zu senken. Durch hohe Speicherkosten ist dieser Betrieb jedoch ökonomisch nicht tragbar.

Diese Arbeit zeigt, dass bereits mit der untersuchten Technik ein emissionssparender Betrieb von Elektrofahrzeugen ein einer betrieblichen Fahrzeugflotte mit einem entsprechenden Nutzungskonzept als erzielbar einzuordnen ist. Auch ermöglichen die Konzeptbestandteile, Mehrkosten zu reduzieren, wenn diese sich auch im untersuchten Fuhrpark nicht vollständig ausräumen lassen.

Die weitere Entwicklung von Fahrzeugtechnik und Kostensituation, welche bereits während der Erstellung dieser Abhandlung deutlich zu beobachten ist, weist weiter darauf hin, dass das erzielbare Substitutionspotential von Verbrennerfahrzeugen durch Elektrofahrzeuge z.B. durch Reichweitenzuwächse und sinkende Ladezeiten stark ansteigt.

Abstract

The use of electric vehicles is thought of as a way to reduce emissions of the mobility sector. Their use in corporate vehicle fleets is said to be an ideal field for their capabilities as the decision making process there is rational and centered on economics. Additionally, the need for mobility is quite predictable.

Until now it was not sufficiently proven, wether their performance, which differs significantly from that of conventional, fossil fuel driven cars, is functionally adequate for corporate fleets. It is equally unclear if their use in this setting is actually able to reduce emissions. Also, it is unknown if they are economically viable in this use case.

Life cycle analyses show a high utilization as a crucial factors for an ecological and economical utilization of electric vehicles. The way the power for the usage is generated is also an important factor for the ecological operation of electric vehicles. Accordingly, this thesis focuses on the evaluation of methods that aim at creating the necessary environment to ensure a beneficial usage of electric vehicles in corporate vehicle fleets. These methods consist of a car sharing concept to achieve a high utilization, as well as an on-site power generation.

The metrics used to measure the economical and ecological effects of car usage are total cost of ownership calculations as well as life cycle emission calculations that are converted to CO_2 equivalents to produce comparable results.

The car sharing concept evaluated in this thesis intends for a secondary usage of the vehicles outside of office hours. This model is based on the assumption that fleet vehicles are unused in this time frame, making them available for a secondary application. It is assumed that the employees of the company owning the vehicle fleet are ideal users in this car sharing model as it can be presumed that their personal transportation needs are mutually exclusive with those of their employer.

The local generation of electricity will be demonstrated using photovoltaic technology. This method was chosen under the assumption that required conditions for its use are present at most company sites in contrast to other methods of local sustainable power generation.

Electric vehicles are tested through the usage in a company fleet to determine their performance under real world conditions. This analysis is supplemented by observation of the company's mobility needs over a representative period of time. Using these data sets the number of required conventional vehicles in the company's fleet is calculated, as well as the potential of substitution of conventional vehicles for electric vehicles. For both a conventional fleet and a fleet including electric vehicles, cost-effectiveness and emission of gases with climatic impact are calculated.

The following analyses aim at evaluating the effectiveness of the supporting measures by adjusting the fleet model previously developed. The bases for this evaluation are the empirically measured effects of the car sharing model in the company fleet as well as the potential for on-site electricity generation using photovoltaic.

The analyzed data suggests a significant potential for electric vehicle application in the examined corporate vehicle fleet. However, when only business related car usage is considered the substitution of electric vehicles for conventional ones does not yield any beneficial effect on fleet emissions. Instead, a significant cost rise can be observed.

Only by implementing the car sharing concept a beneficial effect on the fleet emissions can be determined as well as a significant decrease in additional costs. The secondary usage of the company's vehicles is not limited by the electric vehicles' technical limitations but instead by business related car usage outside of the official office hours which exceeded the presumed rate by far.

The use of photovoltaic proved capable of generating a significant amount of electricity at lower emission rates compared to the electricity provided by the power grid. Due to the high volatility of power generation the local power generation proved only to be able to supply a significant proportion of the energy demand when combined with an energy storage system. Otherwise, it would not be possible to support the lowering of the fleets emissions. High costs of energy storage cause this solution not to be economically viable.

The research conducted demonstrates that the evaluated technology is capable of achieving an emission reduction through the integration of electric vehicles in corporate car fleets given an appropriate usage concept. Additionally, the evaluated concept proved to be capable of reducing the costs associated with the usage of electric vehicles, though it was unable to compensate for them completely in the examined vehicle fleet.

The future development of both the technical capabilities as well as the price of electric vehicles, as it was already evident during the composition of this thesis, indicates a rapidly growing capability of electric vehicles to replace conventional vehicles e.g. by providing higher ranges and faster charging times.

Danksagung

Diese Arbeit wurde überwiegend während meiner Tätigkeit im Projekt eAutarke Zukunft, im Projektteil des ADAC Niedersachsen/Sachsen-Anhalt e.V. angefertigt. Daher gilt mein Dank besonders dem ADAC dafür, dass er es mir ermöglichte, meine Forschungen durchzuführen und mich in der Projektausgestaltung einzubringen. Weiterhin möchte ich meinen Kollegen beim ADAC für die gute Zusammenarbeit danken und auch explizit den Mitarbeitern, welche bereit waren, ihre elektrisch zurückgelegten Fahrten detailliert zu dokumentieren, meinen Dank aussprechen.

Ermöglicht und betreut hat diese Arbeit Herr Prof. Dr. Helmut Lessing des Institutes für Betriebswirtschaft und Wirtschaftsinformatik, Arbeitsgruppe Betriebswirtschaft und Operations Research. Ihm möchte ich für die vertrauensvolle und persönliche Betreuung danken, sowie für die vielen anregenden Gespräche, die wir im Verlauf der Entstehung dieser Arbeit geführt haben und die Gestaltungsfreiheiten, die mir bei der Ausarbeitung von ihm eingeräumt wurden.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Dr. Felix Hahne, der bereit war, mir in der Rolle des Mentor zur Seite zu stehen und für meine Anliegen stets ein offenes Ohr hatte.

Auch meinen Kollegen aus der Arbeitsgruppe, die immer zum fachlichen Austausch bereit waren und oft motivierende und erheiternde Worte für mich parat hatten, möchte ich für die wertvolle Zusammenarbeit danken.

Weiterhin hätte diese Arbeit nicht entstehen können, ohne die Unterstützung durch meine Familie, besonders durch meinen Bruder David, die mir immer interessiert und bestärkend zur Seite stand und durch ihre Begleitung meines Lebens- und Bildungswegs überhaupt erst den Grundstein für diese Arbeit legte.

Ebenso danke ich meinen Freunden für anregende fachliche Diskussionen, aber auch die dringend nötige Ablenkung in diesem sehr fordernden Zeitraum.

Nicht zuletzt möchte ich außerdem Scott, Young et. al. danken, welche mir die Hochspannung, sowohl als Wechselstrom, als auch als Gleichstrom näher brachten und mich so zur Beschäftigung mit der hier behandelten Thematik motivierten.

Sarstedt, im Oktober 2018

Jonas Labode

Inhaltsverzeichnis

Kurzdarstellung der Arbeit I

Abstract III

Danksagung V

Abbildungsverzeichnis IX

Tabellenverzeichnis XI

Abkürzungsverzeichnis XII

I. Hauptteil 1

1. Einführung 2
- 1.1. Motivation . . . 2
- 1.2. Grundlegende Fragestellung . . . 3
- 1.3. Zielsetzung . . . 3
- 1.4. Vorgehensweise . . . 4
- 1.5. Stand der Wissenschaft und Abgrenzung . . . 4

2. Grundlagen 7
- 2.1. Das Elektrofahrzeug – Charakteristika und Stand der Technik . . . 7
  - 2.1.1. Entwicklung und Ausprägungen . . . 7
  - 2.1.2. Kategorisierung und Eingrenzung . . . 9
  - 2.1.3. Stand der Technik . . . 13
- 2.2. Wirtschaftlichkeit . . . 18
- 2.3. Umwelt und Nachhaltigkeit . . . 22
- 2.4. Fahrzeugflotten . . . 25
- 2.5. Problemstellungen und Lösungsansätze . . . 28
- 2.6. Versuchsaufbau und Ziele . . . 30

3. Empirische Untersuchung der Einsatzpotentiale von E-Fahrzeugen im Betriebseinsatz 32
- 3.1. Technische und organisatorische Eignung der Fahrzeuge . . . 32
  - 3.1.1. Der betriebliche Mobilitätsbedarf . . . 32
    - 3.1.1.1. Empirisch erhobene Daten . . . 33

3.1.1.2. Ableitung des Fahrzeugbedarfs . . . 36
3.1.1.3. Betrachtung unter wirtschaftlichen Aspekten . . . 38
3.1.1.4. Ökologische Auswirkungen . . . 40
3.1.2. Leistungsfähigkeit der E-Fahrzeuge . . . 41
3.1.2.1. Ableitung des Fahrzeugbedarfs . . . 44
3.1.2.2. Betrachtung unter wirtschaftlichen Aspekten . . . 45
3.1.2.3. Ökologische Auswirkungen . . . 46
3.1.3. Die Ladeinfrastruktur . . . 48
3.1.4. Die Bedeutung der Informations- und Kommunikationstechnologie . 51
3.2. Fahrzeugnutzung im Realbetrieb . . . 53
3.2.1. Abgleich Potential und reale Nutzung . . . 53
3.2.2. Technische und organisatorische Faktoren . . . 55
3.2.3. Menschliche Faktoren . . . 56
3.3. Potentiale zur Auslastungssteigerung . . . 59
3.3.1. Bedeutung der Auslastung für E-Fahrzeuge . . . 59
3.3.2. Ansatz „Carsharing im Tandem“ . . . 60
3.3.3. Der private Mobilitätsbedarf . . . 61
3.3.4. Potentiale eines Carsharingansatzes . . . 62
3.3.5. Rechtliche Situation . . . 67
3.3.6. Betrieb des Tandemmodells in der Praxis . . . 68
3.4. Zusammenfassung . . . 73

4. Stromversorgung der Fahrzeugflotte 75
4.1. Eigenstromproduktion durch Photovoltaik . . . 77
4.1.1. Grundlagen Photovoltaik und Stand der Technik . . . 77
4.1.2. Rechtliche Situation . . . 79
4.1.3. Wirtschaftliche Optimierung . . . 82
4.1.3.1. Grundlagen und Methodik der Kostenbestimmung . . . 82
4.1.3.2. Anwendung der Kostenbestimmung auf ein Testszenario . 84
4.1.3.3. Bestimmung der kostenoptimalen Anlagengröße . . . 88
4.1.4. Ökologische Auswirkungen . . . 95
4.2. Speichertechnik . . . 99
4.2.1. Grundlagen und Einsatzfelder . . . 99
4.2.2. Wirtschaftlichkeit . . . 100
4.2.3. Ökologische Vorteilhaftigkeit . . . 103
4.3. Energiemanagement . . . 107
4.3.1. Grundlagen . . . 107
4.3.2. Beispielhafte Methodiken der Optimierung . . . 108
4.3.2.1. Simplex Algorithmus . . . 108
4.3.2.2. Agentensysteme . . . 109
4.3.3. Technische Umsetzung . . . 109
4.4. Zusammenfassung . . . 111

5. Herausarbeitung der kritischen Erfolgsfaktoren 112
5.1. Diskussion und Einordnung der erzielten Ergebnisse . . . 113
5.2. Grenzen der angewandten Methodik . . . 116
5.3. Kritische Betrachtung der Belastbarkeit der erzielten Ergebnisse . . . 117
5.3.1. SWOT-Analyse . . . 117
5.3.1.1. Strengths . . . 117
5.3.1.2. Weaknesses . . . 118
5.3.1.3. Opportunities . . . 118
5.3.1.4. Threats . . . 118
5.3.2. Strategien zum Umgang mit den ermittelten Schwächen und Bedrohungen . . . 119
5.3.2.1. Matching-Strategien . . . 119
5.3.2.2. Neutralisierungs- und Umwandlungsstrategien . . . 120
5.4. Auswirkungen aktueller Entwicklungen . . . 121
5.5. Zusammenfassung . . . 122

6. Fazit und Ausblick 123
6.1. Fazit und weiterer Forschungsbedarf . . . 123
6.2. Ausblick . . . 125

Literaturverzeichnis 129

II. Anhang 144

Mitarbeiterbefragung Mobilität 145

Ergebnisse Mitarbeiterbefragung 147

Fragebogen Tandempartner 156

Buchungsportal 157

PVGIS 158

Globalstrahlung in der BRD 159

Abbildungsverzeichnis

2.1. Unterschiedliche Antriebsformen elektrischer Fahrzeuge 9
2.2. Energiedichte verschiedener Energieträger 15
2.3. Antriebsstrangtopologie 16
2.4. Kostenvergleich EV/Diesel PKW 2014 20
2.5. Kostenvergleich EV/Diesel PKW 2020 21
2.6. Emissionen und Energieverbrauch 22
2.7. Jahresfahrleistung gewerblich/privat 25
2.8. Standort von Fahrzeugen zu unterschiedlichen Tageszeiten 26

3.1. Verteilung der dienstlichen Fahrleistung des Fuhrparks 33
3.2. Statistische Auswertung der Dienstfahrten 34
3.3. Abhängigkeit zwischen zurückgelegter Strecke und Buchungsdauer 35
3.4. Verteilung von Fahrtantritt und -ende aller 830 Dienstfahrten 36
3.5. Verbrauch des Batterieinhalts nach zurückgelegter Strecke 42
3.6. Ladungsverlauf eines VW eGolf an einer 50 kW Schnellladesäule 43
3.7. Mögliche Tagesfahrleistung nach Ladeleistung 50
3.8. Statistische Auswertung der elektrisch absolvierten Dienstfahrten 54
3.9. Verhältnis von Nutzungsintensität des Fuhrparks und EV-Nutzung 57
3.10. Verhältnis von Dienstnutzung und Tandemnutzung 70

4.1. Globalstrahlung Hannover 2005 - 2014 78
4.2. Blockschaltbild einer PV-Anlage mit Netzeinspeisung 79
4.3. Verteilung des PV-Stromertrags des Monats Juni 2016 89
4.4. Verteilung des Gesamtstromverbrauchs EVs im Monat Juni 90
4.5. Kosten und Eigendeckungsquote für unterschiedliche Anlagengrößen 92
4.6. Stromertrag und -nachfrage im Monat September 93
4.7. Kosten und Eigendeckungsquote für unterschiedliche Anlagengrößen 94
4.8. Stromertrag und -nachfrage im Monat September 96
4.9. Blockschaltbild einer PV-Anlage mit Batteriespeicher 99
4.10. Ladezyklen pro Jahr und spezifische Kosten nach Batteriegröße 100
4.11. Kosten, Eigennutzungs- und Eigendeckungsquote für div. Speichergrößen . 101
4.12. Stromertrag und -nachfrage im Monat September mit Batterie 102
4.13. Ladezyklen pro Jahr und spezifische Emissionen nach Batteriegröße 104
4.14. Fuhrparkemissionen pro Jahr nach Batteriegröße 105
4.15. Kommunikation zwischen den Akteuren des DSM 110

6.1. Jährliches Wachstum des EV-Bestands 126

Anhang: Frage 1: Fahrzeugbesitz 147
Anhang: Frage 2:Fahrzeuge je Haushalt 148
Anhang: Frage 3: Verkehrsmittel für den Arbeitsweg 148
Anhang: Frage 4: Länge des Arbeitswegs 149
Anhang: Frage 5: Tageskilometer, Jahreskilometer 149
Anhang: Frage 6: Nutzungsprofil 150
Anhang: Frage 7: Gewünschte Fahrzeugreichweite 150
Anhang: Frage 8: Bereitschaft zur Teilnahme an der Erprobung 151
Anhang: Frage 9: Zugang zu Lademöglichkeit 151
Anhang: Frage 10a: Stellenwert Umwelt bei Verkehrsmittelwahl 152
Anhang: Frage 10b: Stellenwert Kosten bei Verkehrsmittelwahl 152
Anhang: Frage 10c: Komfort Kosten bei Verkehrsmittelwahl 153
Anhang: Frage 10d: Komfort Zeit bei Verkehrsmittelwahl 153
Anhang: Frage 11a: Informationsstand zum Thema Fahrzeugreichweite 154
Anhang: Frage 11b: Informationsstand zum Thema Ladezeiten 154
Anhang: Frage 11c: Informationsstand zum Thema Arten der Ladung 155
Anhang: Frage 11d: Informationsstand zum Thema Ladeinfrastruktur 155
Anhang: Fragebogen Tandempartner 156
Anhang: Buchungsportal 157

Tabellenverzeichnis

2.1. Fahrzeugbestände in Deutschland nach Antriebsart 8
2.2. Vergleich eGolf/Golf 19

3.1. Theoretischer Bedarf an Verbrennerfahrzeugen 37
3.2. Fuhrparkkosten in EUR 38
3.3. Optimierter Fuhrpark 39
3.4. Theoretischer Fahrzeugbedarf an EVs und Verbrennern 44
3.5. Fuhrparkkosten, sortiert nach Fahrleistung 45
3.6. Optimierter Fuhrpark 46
3.7. Einfluss Ladeinfrastruktur auf Fuhrparkkosten 51
3.8. Modell Tandemfuhrpark 64
3.9. Tandem-Fuhrpark Emissionen 65
3.10. Tandem-Fuhrpark 65

4.1. Förderhöhe je PV-Anlage 80
4.2. Absenkung der Förderung 81
4.3. Verringerung der Absenkung 81
4.4. Eckdaten Beispielanlage 84
4.5. Übersicht über die Energiepreise 87
4.6. Fuhrparkemissionen je Nutzungsvariante 97

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current
BDEW	Bundesverband der Energie-und Wasserwirtschaft e.V.
BEV	Battery-Electric-Vehicle
BMS	Batteriemanagementsystem
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BZ	Brennstoffzelle
CO_2e	CO_2-Äquivalent
CCS	Combined-Charging-System
DSM	Demand Side Management
DWD	Deutscher Wetterdienst
DC	Direct Current
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EMS	Energiemanagementsystem
EStG	Einkommenssteuergesetz
EV	Electric-Vehicle
EVCC	Electric-Vehicle-Charge-Controller
FCEV	Fuel-Cell-Electric-Vehicle
GIS	Geographisches Informationssystem
GW	Gigawatt
HEV	Hybrid-Electric-Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie

IP Internet Protocol

ITD Institut für Transportation Design

kW Kilowatt

kWh Kilowattstunde

kWp Kilowatt Peak

KWK Kraft-Wärme-Kopplung

Li-Ion Lithium-Ionen

MW Megawatt

MWh Megawattstunde

NaNiCl Natrium-Nickelchlorid

NiCd Nickel-Cadmium

NiMH Nickel-Metall-Hydrid

NPE Nationale Entwicklungsplattform Elektromobilität

OEM Original Equipment Manufacturer

Pb Blei

PHEV Plug-In-Hybrid-Electric-Vehicle

PLC Power Line Communication

PV Photovoltaik

REEV Range-Extender-Electric-Vehicle

SWOT Strengths Weaknesses Opportunities Threats

TCO Total Cost of Ownership

TCP Transmission Control Protocol

UMTS Universal Mobile Telecomunications System

VtG Vehicle to Grid

Wh Wattstunde

Teil I.

Hauptteil

1. Einführung

1.1. Motivation

Eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen im Jahr 2020. Dieses Ziel hat Bundeskanzlerin Angela Merkel in ihrer Rede vor der internationalen Konferenz „Elektromobilität bewegt weltweit“ im Jahr 2013 gesetzt [1]. Sie verwies auf das Urbedürfnis der Mobilität von nunmehr sieben Milliarden Menschen auf der Erde, welches zu einem starken Anstieg der Zahl der Fahrzeuge weltweit führt. Allein im Jahre 2012 erfuhr die PKW-Produktion eine Zunahme von etwa vier Prozent, ein Zuwachs von 68 Millionen Fahrzeugen. Der Einsatz von Elektromobilität wird in diesem Kontext als Maßnahme gesehen, die im Rahmen der Energiewende erschlossenen und zu erschließenden erneuerbaren Energien im Verkehr nutzbar zu machen. Auch sollen die Elektrofahrzeuge in diesem Zusammenhang Speicherkapazitäten bereitstellen. Erforderlich sind hierfür Integrationsprozesse zwischen Netzausbau, Grundlastverfügbarkeit und erneuerbaren Energien. Zielsetzung des Vorhabens ist die Etablierung eines Wirtschaftszweigs, welcher ohne dauerhafte Subventionierung auskommt. Es wurde betont, dass diese Zielsetzung bezüglich der verschiedensten Einflussfaktoren sehr sensitiv sei, weshalb sowohl bestmögliche Rahmenbedingungen, als auch eine stete Kontrolle des Fortschritts nötig seien.

Um die deutschen Kompetenzen im Bereich Elektromobilität zu bündeln und innovative Elemente der Elektromobilität zu erproben, wurde im Jahr 2011 von der Bundesregierung das Förderprogramm „Schaufenster Elektromobilität“ ins Leben gerufen. In vier Schaufensterregionen wurden im Zeitraum von 2012 bis 2016 insgesamt 90 Verbundprojekte mit 334 Teilvorhaben durchgeführt. Allein in der Schaufensterregion Niedersachsen waren 200 Partner aus Wirtschaft, Wissenschaft, Land und Kommunen in mehr als 30 Projekten tätig [2]. Im untergeordneten Teilprojekt „eAutarke Zukunft: Lösungen in Smart Grid-Strukturen“ zur empirischen Evaluation und Optimierung von Elektromobilität in unterschiedlichen Lebens- und Arbeitsbereichen wurden sowohl Geschäftsmodelle, als auch E-Fahrzeugflotten in Verbindung mit nachhaltigen Versorgungsstrukturen untersucht. Dies umfasst auch die Optimierung von Ladetechniken, die Akzeptanzanalyse und die Ermittlung hilfreicher Rahmenbedingungen [3]. Im Verlauf dieses Forschungsprojekts wurden die folgenden Erhebungen durchgeführt.

1.2. Grundlegende Fragestellung

In der Literatur zur Elektromobilität wird als Einsatzfeld, im Hinblick auf die angestrebte Marktdurchdringung bis 2020, oft das gewerbliche Umfeld als ein Anwendungsfall betrachtet, in dem Elektrofahrzeuge ihre Stärken ausspielen können. So erklärt etwa eine Studie des Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung:

> „*Ein interessantes ökonomisches Potenzial weisen rein gewerbliche Flotten auf, die rund 30% des Neuwagenmarktes ausmachen. Die Gründe liegen in den entsprechenden Fahrprofilen mit oftmals planbaren Routen, den spezifischen ökonomischen Rahmenbedingungen wie dem Wegfall der Mehrwertsteuer, was sich gerade bei den höheren Kaufpreisen von Elektrofahrzeugen positiv auswirkt, und der hohen Relevanz der Wirtschaftlichkeit im Entscheidungsprozess bei der Fahrzeuganschaffung*“ [4, S.2].

Andere Betrachtungen kommen jedoch zu dem Ergebnis, dass zum jetzigen Zeitpunkt der wirtschaftliche Einsatz von Elektrofahrzeugen nur unter bestimmten Rahmenbedingungen überhaupt möglich ist. Hierzu gehören etwa hohe Fahrleistungen und eine entsprechende Entwicklung der Energiepreise [5]. Dies wirft die Frage auf, ob es möglich ist, durch unterstützende Maßnahmen den Einsatz von Elektrofahrzeugen im gewerblichen Kontext so zu begünstigen, dass ein wirtschaftlicher Betrieb der Fahrzeuge sichergestellt werden kann.

1.3. Zielsetzung

Zielsetzung dieser Arbeit ist, die determinierenden Faktoren für den wirtschaftlichen und nachhaltigen Einsatz von Elektrofahrzeugen im gewerblichen Umfeld zu identifizieren. Auf dieser Grundlage erfolgt eine Definition von Maßnahmen, welche die positive Beeinflussung der aufgedeckten Faktoren ermöglichen sollen. Durch eine empirische Erprobung soll letztendlich geklärt werden, ob eine festgelegte Auswahl von Maßnahmen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen im Betriebseinsatz zielführend eingesetzt werden kann.

Erwartet werden hieraus Rückschlüsse auf die optimale Art und Weise dieses Einsatzes und auf Wechselwirkungen mit anderen Faktoren. Ziel ist weiterhin, die Auswirkungen der Maßnahmen zu quantifizieren und die Eignung der Maßnahmen sowohl in der Summe, als auch individuell zu beurteilen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können in Zukunft von Unternehmen bei der Entscheidungsfindung zur Ausgestaltung ihrer Fahrzeugflotte dienen, die Potentiale von Elektrofahrzeugen aufdecken, aber auch eine kritische Betrachtung der aktuellen Technik und der politischen Rahmenbedingungen liefern.

1.4. Vorgehensweise

Im Folgenden wird zunächst eine Erläuterung des Status Quo im Bereich der Elektromobilität durchgeführt. Diese umfasst sowohl die Technik des Fahrzeuges, als auch dessen Einbindung in die es umgebende Infrastruktur. Anschließend erfolgt eine Eingrenzung auf die für diese Erörterung relevante Teilmenge dieser Strukturen und schließlich eine Quantifizierung der Wirtschaftlichkeit dieser Technik im Betrieb und ihrer Auswirkungen auf die Umwelt. Diese Aufstellung mündet in der Herausarbeitung der entscheidenden Faktoren für Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit, welche wiederum die Basis für die Definition von Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung dieser Faktoren bildet. Mit dieser endet der Grundlagenteil der Arbeit.

Es folgt die genaue Erläuterung der einzelnen Maßnahmen und eine empirische Erprobung dieser im Rahmen des Projektes eAutarke Zukunft am Standort Laatzen des ADAC Niedersachsen/Sachsen-Anhalt e.V. im Geschäftsbetrieb. Für jede Maßnahme wird eine Ergebnisanalyse mit anschließender Herausarbeitung der kritischen Erfolgsfaktoren durchgeführt. Im Weiteren werden die Einzelergebnisse zusammengeführt, um ein Gesamtergebnis zu formulieren. Daraufhin erfolgt eine kritische Betrachtung, welche insbesondere die Wechselwirkung der Maßnahmen mit äußeren Faktoren prüft, und die Risiken durch eventuelle Abhängigkeiten anführt. Abgeschlossen wird diese Arbeit durch ein Resümee der erzielten Erkenntnisse und einem Überblick über die weitere Entwicklung im Feld der betrieblichen Elektromobilität.

1.5. Stand der Wissenschaft und Abgrenzung

Zur Thematik der betrieblichen Nutzung von E-Fahrzeugen, der notwendigen technischen Anlagen und Nutzungskonzepte existieren in der Literatur bereits verschiedene Betrachtungen. Im folgenden werden einige von ihnen, welche im thematischen Bezug zu den in dieser Arbeit angestellten Untersuchungen stehen, angeführt und thematische Überschneidungen sowie Abgrenzungen erläutert.

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Elektrofahrzeugen in betrieblichen Fahrzeugflotten ist an erster Stelle die Untersuchung „Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen“ aus dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsvorhaben *IKT für Elektromobilität* zu nennen [5]. In ihr werden unter anderem die Potentiale für die Nutzung von elektrischen PKWs in gewerblichen Fahrzeugflotten unter Annahme verschiedener Entwicklungsszenarien und unterschiedlicher Anschaffungszeitpunkte berechnet. Sie liefert wichtige Hinweise darauf, welche Rahmenbedingungen, wie etwa eine bestimmte Jahresfahrleistung, erforderlich sind, um durch den Betrieb eines Elektrofahrzeugs gegenüber einem Verbrennerfahrzeug einen wirtschaftlichen Vorteil zu erreichen. Im Gegensatz zur vorliegenden Abhandlung wird jedoch weder darauf eingegangen, ob die zum wirtschaftlichen Betrieb notwendigen Bedingungen in der Praxis mit der bestehenden Technik geschaffen werden können, noch findet eine praktische Überprüfung der Ergebnisse statt.

Einen Ansatz mit stärkerem Praxisbezug verfolgt etwa die Erhebung „Elektromobilität im Personenwirtschaftsverkehr – eine Potenzialanalyse“ des Fraunhofer Instituts [6]. Auch hier war das Ziel, das wirtschaftliche Potential von Elektrofahrzeugen im Betriebseinsatz festzustellen. Verwendet wurden hierzu jedoch reale Fahrtdaten, welche mit Hilfe von GPS-Loggern in verschiedenen gewerblich genutzten Fahrzeugen erhoben wurden. Diese wurden mit der technischen Leistungsfähigkeit von E-Fahrzeugen abgeglichen und so das Potential zur Nutzung von E-Mobilität in verschiedenen Gewerben errechnet. Auch in dieser Untersuchung fand keine tatsächliche Nutzung von E-Fahrzeugen statt.

Ähnliche Berechnungen stellt auch die Dissertation „Batterieelektrische Fahrzeuge im gewerblichen Flottenbetrieb“ [7] an, ebenfalls auf Basis von in Verbrennerfahrzeugen erhobenen Fahrprofilen. Sie geht jedoch weiterhin auf grundlegende Infrastrukturvoraussetzungen und Ladezeiten ein.

Die tatsächliche Nutzung von E-Fahrzeugen wird etwa in der Studie „Elektrofahrzeuge in betrieblichen Fahrzeugflotten – Akzeptanz, Attraktivität und Nutzungsverhalten“ betrachtet [8]. In dieser Studie wird insbesondere der sozialwissenschaftliche Aspekt untersucht. Sie gibt daher wichtige Hinweise auf Nutzeransprüche und mögliche Probleme, welche bei einer Flottenumstrukturierung auftreten können. Es wird jedoch weder auf wirtschaftliche, noch auf technische Aspekte näher eingegangen.

Geschäftsmodelle für den wirtschaftlichen Betrieb von E-Fahrzeugen werden z.B. in [9] oder [10] diskutiert. Diese beschränken sich jedoch zumeist auf reine Carsharing-Modelle unterschiedlicher Ausprägung. Eine Kombination aus gewerblicher und privater Nutzung eines E-Fahrzeugs wird nur von [11, S.204] erläutert, jedoch kann die Autorin keine empirischen Untersuchungsergebnisse vorweisen. Daher bleibt offen, ob ein E-Fahrzeug tatsächlich mit der entsprechenden Intensität genutzt werden kann.

Der Themenbereich Kombination von Elektrofahrzeugen mit erneuerbaren Energien wird unter anderem von [12] und [13] behandelt. Dabei enthält [12] eine globale Betrachtung, welche allgemein die Verwendung von erneuerbaren Energien im Straßenverkehr zum Inhalt hat. Neben verschiedenen alternativen Kraftstoffen, wird auch die Elektromobilität und ihr hoher Stellenwert für das Ziel der Reduktion von CO_2-Emissionen erläutert. Allerdings wird nicht dargestellt, wie eine Verknüpfung zwischen der Fahrzeugladung und der Erzeugung erneuerbarer Energien genau umgesetzt werden soll. Hingegen schildert [13] grob die Eigenstromproduktion als Option der direkten Anbindung von Elektromobilität an erneuerbare Energien. Auch das gesteuerte Laden, welches Ladezeiten besonders in die Zeiten hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien verschieben soll, wird in seinen Grundzügen dargestellt.

Eine Einbindung von E-Fahrzeugen in intelligente Netzstrukturen, in denen die Ladung sich tatsächlich nach der Stromverfügbarkeit richtet, wird von [14] in mehreren Laborversuchen exemplarisch vollzogen. Dies belegt die Möglichkeit einer solchen flexiblen Verbrauchssteuerung, welche in dieser Abhandlung in Grundzügen angestrebt wird.

Zusammenfassend lassen sich im derzeitigen Diskussionsstand in der Literatur mehrere offene Fragestellungen identifizieren. So ist unklar, ob die in angestellten Wirtschaftlichkeitsberechnungen zugrunde gelegten Annahmen in der Praxis auf E-Fahrzeuge zutreffen. Zu erwähnen sind etwa tatsächlich erzielbare Fahrleistungen, die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von Umweltfaktoren und die Umsetzung der erforderlichen Organisation, welche sich von derer von Verbrennerfahrzeugen deutlich unterscheidet.

Im Bezug auf die erzielbaren ökologischen Vorteile stellt sich die Frage, ob Maßnahmen wie die Eigenstromproduktion überhaupt mit der betrieblichen Nutzung vereinbar sind, wie Erzeugungsanlagen zu dimensionieren und auszugestalten sind und ob zwischen Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz abgewägt werden muss, oder ob diese Ziele sich komplementär verhalten. Auch die technische und organisatorische Umsetzung einer solchen Maßnahme stellt ein wenig untersuchtes Feld dar, welches in der zukünftigen betrieblichen Mobilität eine große Rolle spielen kann.

Weiterhin existieren bisher keine Erfahrungen zur Kombination verschiedener Nutzungskonzepte und deren Auswirkung auf Ökologie und Ökonomie. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang das Modell „Mobility as a Service“, in dem ein Fahrzeug verschiedenen Nutzern für unterschiedliche Anwendungsszenarien zur Verfügung gestellt wird.

Auf die identifizierten Fragestellungen wird im Folgenden eingegangen. Kern ist die Erhebung empirischer Daten in der Praxis durch eine Fuhrparkerweiterung um E-Fahrzeuge und Nutzungsangebote, sowie dem Aufbau von Lade-, Verwaltungs- und Energieerzeugungsinfrastruktur in einer betrieblich genutzten Fahrzeugflotte.

2. Grundlagen

2.1. Das Elektrofahrzeug – Charakteristika und Stand der Technik

2.1.1. Entwicklung und Ausprägungen

Die Entwicklung der Elektromobilität begann mit der Entdeckung verschiedener elektrotechnischer Prinzipien zu Anfang des 19. Jahrhunderts, etwa dem Zusammenhang zwischen elektrischen Strömen und Magnetfeldern durch André Marie Ampère. Erste Elektromotoren wurden in diesem Zeitraum bereits entwickelt, etwa von Moritz Hermann Jacobi im Jahr 1818. Weitere Entdeckungen, wie die der elektromagnetischen Induktion durch Michael Faraday (1831) und der Dynamomaschine durch Werner von Siemens (1866), folgten. Der praktische Einsatz der ersten Elektromotoren scheiterte jedoch vorerst am fehlen einer geeigneten Energiequelle [15, S.12f].

Der erste Bleiakkumulator wurde schließlich 1860 von Gaston Planté entwickelt. Dieser erste elektrochemische Speicher aus Blei, Schwefelsäure und Bleioxyd ist in seiner grundlegenden Zusammensetzung auch heute noch weit verbreitet. Er stellt eine sogenannte Sekundärzelle dar, also einen wiederaufladbaren Speicher. Primärzellen, also nicht wiederaufladbare Speicher, etwa aus Zink und Braunstein, wurden um die selbe Zeit ebenfalls in Frankreich entwickelt [16, S.27f].

Es folgte die erste Anwendung von Elektromotor und Akkumulator in einem Fahrzeug im Jahre 1881 in Frankreich durch Gustave Trouvé. Auf diese ersten, teilweise noch als Dreirad ausgelegten Fahrzeuge, folgte eine rasch voranschreitende Entwicklung dieser neuen Mobilitätsform. So fuhr bereits 1899 das Elektroauto „La Jamais Contente“ als erstes Straßenfahrzeug schneller als 100 km/h. Kurz darauf, im Jahr 1904, wurde in Berlin die erste Oberleitungsbuslinie geschaffen [17, S.6].

Während in der Anfangszeit die Konkurrenz für den Elektromotor von der bereits etablierten Dampfmaschine ausging, stellte in der Automobiltechnik bald der Ottomotor eine weitere Antriebstechnik dar, welche zunächst noch schwer zu handhaben war, jedoch zunehmend an Anhängern gewann [18, S.49]. Die vorerst endgültige Wendung hin zum Verbrennungsmotor wurde durch Henry Ford eingeleitet. Dieser setzte 1908 bei der Konstruktion des „Modell T“ auf den leistungsfähigen Verbrennungsmotor und konnte bis zum Jahr 1927 ca. 15 Millionen dieser Fahrzeuge am Markt absetzen. Den letzten Ausschlag brachte die Entwicklung des elektrischen Anlassers im Jahr 1912, welcher die Handhabung des Benzinfahrzeugs einfacher und sicherer machte und so auch die letzten Vorteile des Elektromotors aus Konsumentensicht zunichte machte [19, S.18f].

Nach dem Ende der 1920er Jahr fristeten Elektromobile nur noch ein Nischendasein, etwa in der Form von kleinen Lieferwagen zur Postzustellung. Am längsten hielten sie sich in Großbritannien. Dort dienten sie als Auslieferfahrzeug für Brot und Milch bis in die Nachkriegszeit. In Deutschland wurden sie ab 1955 durch eine Besteuerung nach Gewicht noch zusätzlich benachteiligt. So fanden sich elektrisch angetriebene Fahrzeuge bald nur noch in Bereichen, in denen Verbrennungsmotoren z.B. auf Grund der Abgase nicht eingesetzt werden konnten, etwa als Gabelstapler und Lieferfahrzeuge innerhalb von Lagerhallen [17, S.10f].

Erst der durch den Ersten Golfkrieg (1980 bis 1988) rasant ansteigende Ölpreis, welcher z.B. im Jahr 1980 bis zu 277 % über dem Preis von 1978 lag, führte wieder zu einem steigenden Interesse an alternativen Antrieben, wie der Elektromobilität [20, S.7]. Dies spiegelte sich in zunehmenden Erprobungen elektrischer Konzeptfahrzeuge der Autohersteller wieder. Im Zeitraum von 1992 bis 1996 lief ein vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderter Großversuch zur Erprobung der Leistungsfähigkeit, Alltagstauglichkeit und der ökologischen Eigenschaften von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen auf der Insel Rügen. Dieser Feldversuch stellte mit insgesamt 60, zumeist als abgewandelte Verbrennerfahrzeuge ausgestalteten Elektrofahrzeugen, den größten seiner Art dar. In der Ergebnisauswertung wurde festgestellt, dass die damaligen Elektrofahrzeuge einerseits einen hohen Stromverbrauch aufwiesen und andererseits, auf Grund der Zusammensetzung des deutschen Strommix zur Versuchszeit, keine ökologischen Vorteile gegenüber einem Verbrennerfahrzeug boten [18, S.56]. Es folgte ein starker Rückgang des Interesses am elektrischen Antrieb.

Erneutes Interesse an der Elektromobilität regte sich erst wieder im Jahr 2007 im Angesicht des bedrohlicher werdenden Klimawandels und einer Wirtschaftskrise. Um die Automobilindustrie in der Krise zu unterstützen, ohne jedoch eine zusätzliche Klimabelastung zu schaffen, wurde neben einer Umweltprämie für die Anschaffung neuer Fahrzeuge auch ein Förderprogramm für die Elektromobilität durch die Bundesregierung ins Leben gerufen [18, S.53f]. Im Rahmen dieses Förderprogramms erfolgte auch die Schaffung des bereits in Kapitel 1.1 erläuterten „Schaufensters Elektromobilität“.

Tabelle 2.1.: Fahrzeugbestände in Deutschland nach Antriebsart [21, S.12]

	2011	2012	2013	2014	2015
Verbrenner	42.244.400	42.874.499	43.356.482	43.751.418	44.274.589
Hybride	37.256	47.642	64.995	85.575	107.754
Elektro	2.307	4.541	7.114	12.156	18.948

Trotz dieser Fördermaßnahmen sind Elektrofahrzeuge auch heute in Deutschland noch eine Seltenheit. Dennoch hat sich ihre Zahl innerhalb von vier Jahren um das achtfache gesteigert (siehe Tabelle 2.1).

2.1.2. Kategorisierung und Eingrenzung

Im Folgenden wird ein grundlegender Überblick über Fahrzeugbauformen, welche in dieser Arbeit von Relevanz sind, sowie die Abgrenzung zu ähnlichen Konstruktionen gegeben. Einen schematischen Überblick über die einzelnen Architekturen gibt Abbildung 2.1.

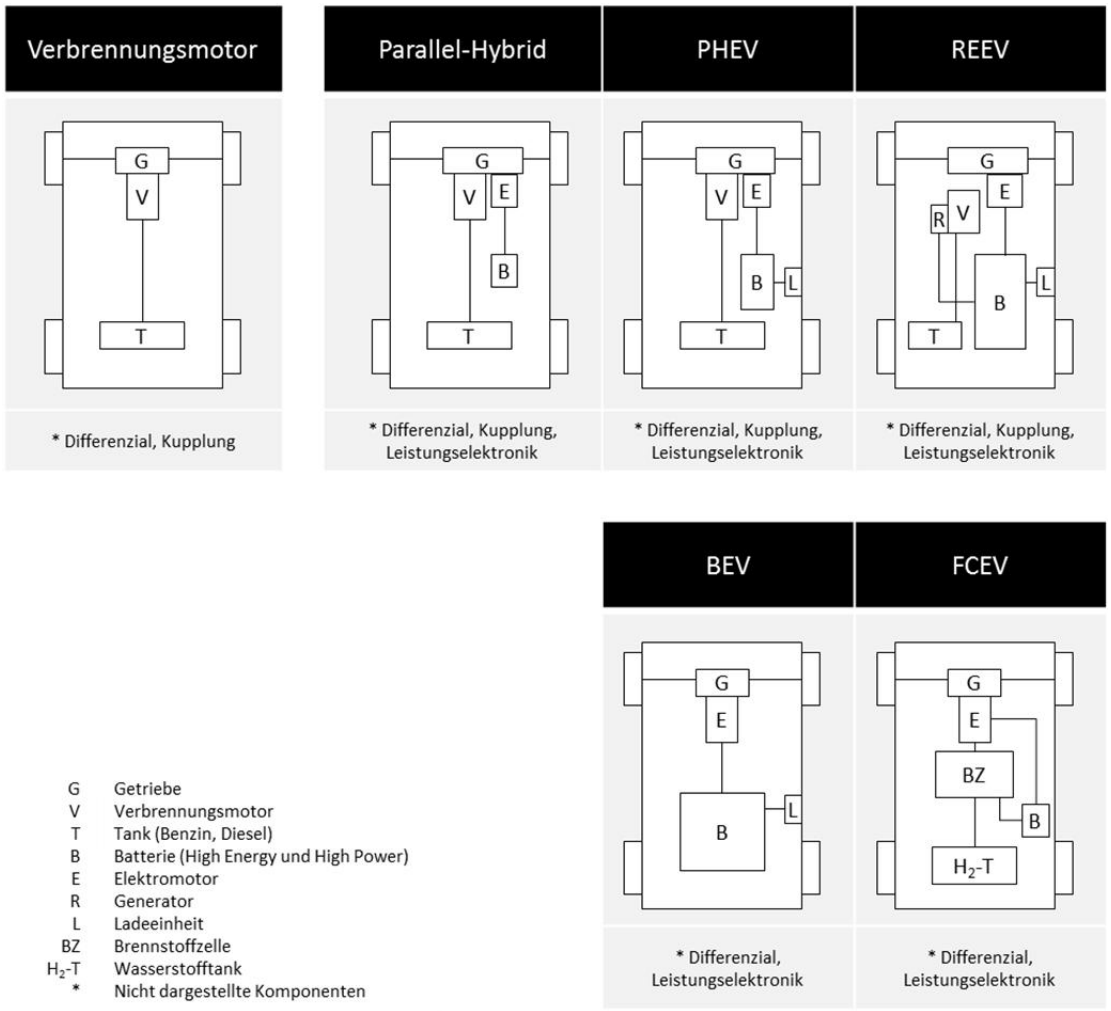


Abbildung 2.1.: Unterschiedliche Antriebsformen elektrischer Fahrzeuge [12]

Verbrennungsmotoren

Fahrzeuge mit reinen Verbrennungsmotoren, auch als Internal Combustion Engine (ICE) bezeichnet, stellen mit aktuell 99,71% der Zulassungen in Deutschland [21, S.12] den Status Quo in Sachen Individualmobilität auf der Straße dar. Die zumeist verwendeten, aus Erdöl gewonnenen Otto- und Dieselkraftstoffe bieten die Vorteile der hohen Energiedichte und einer guten Handhabbarkeit durch ihre flüssige Form [22, S.357]. Sie verfügen beide über eine Energiedichte von ca. 12 Kilowattstunden (kWh)/kg. Ein PKW mit 50 kg Benzin (ca. 66 l) kann ohne weiteres eine Strecke von 880 km zurücklegen (angenommener Verbrauch: 7,5 l auf 100 km) [23, S.32f]. Ein großer Nachteil der ICE ist ihr

geringer Wirkungsgrad. Dieselantriebe erreichen in ihrem gewöhnlichen Betriebsbereich einen Wirkungsgrad von 22% bis etwas über 30%, bei Ottomotoren hingegen liegt dieser bei unter 20% bis maximal 28% [24, S.247]. Der Schadstoffausstoß, unter Einbeziehung der Aufwendungen für Kraftstoffherstellung und Transport, wird im Folgenden als CO_2-Äquivalent (CO_2e) angegeben. Der CO_2e-Wert beschreibt das Treibhausgaspotential der ausgestoßenen Gase wie Kohlendioxid, Methan etc. über einen Zeithorizont von 100 Jahren. Bei der Verwendung von Benzin fallen 2,8 kg CO_2e/l an, bei Diesel sind es 3,15 kg CO_2e/l [25, S.231]. ICEs dienen in dieser Arbeit als diejenige Konstruktionsweise, an der die untersuchten Elektrofahrzeuge gemessen werden.

Parallel-Hybride/Hybrid-Electric-Vehicle (HEV)
HEV stellen derzeit 0,24% der Fahrzeuge auf deutschen Straßen dar [21, S.12][1]. Sie sind klassische Verbrennerfahrzeuge, verfügen also über eine direkte mechanische Verbindung vom Verbrennungsmotor zum Rad. Zusätzlich sind sie jedoch mit einem Elektromotor ausgestattet. Dieser übernimmt etwa beim Bremsen die Rolle eines Generators und speist die gewonnene Energie in eine Batterie ein (ein Laden der Batterie aus externen Quellen ist nicht möglich) [26, S.21f]. Aus dieser kann dann der Elektromotor zum Zurücklegen kurzer Strecken (Voll-Hybrid) oder zur Unterstützung des Verbrennungsmotors (Mild-Hybrid) gespeist werden. Auf diese Weise kann Kraftstoff eingespart werden, da Energie, welche andernfalls ungenutzt bliebe, wieder dem Antrieb zugeführt werden kann. Allerdings steht diesem Vorteil ein höheres Fahrzeuggewicht gegenüber, welches einen Teil des Einsparpotentials wieder zunichte macht. Auch steigen mit der Komplexität des Antriebs die Fahrzeugkosten [27, S.30f].

Plug-In-Hybride/Plug-In-Hybrid-Electric-Vehicle (PHEV)
PHEV sind den HEV sehr ähnlich. Sie unterscheiden sich durch eine größere Batterie, welche auch aus einer externen Stromquelle gespeist werden kann. Auf diese Weise können Strecken von einigen Kilometern rein elektrisch zurückgelegt werden. Die regelmäßig am Tag zurückgelegten Wege (ca. 50 km) sollen so voll-elektrisch zurückgelegt werden können. Weite Strecken werden mit Hilfe des konventionellen Antriebs bewältigt. Sie bieten damit einerseits die Möglichkeit des elektrischen Fahrens, andererseits besitzen sie jedoch eine größere Reichweite als reine Electric-Vehicles (EVs) [28, S.70]. Nachteilig ist hingegen ebenso wie beim HEV das höhere Fahrzeuggewicht durch das duale Antriebskonzept, welches wiederum den Verbrauch in die Höhe treibt.

EV mit Range-Extender/Range-Extender-Electric-Vehicle (REEV)
Ein REEV, auch als serieller Hybrid bekannt, ähnelt oberflächlich stark dem PHEV. Es verfügt genau wie dieses über einen Verbrennungsmotor, einen Elektromotor und eine Batterie, welche aus externen Quellen geladen werden kann. Der Unterschied zum PHEV liegt in dem Umstand, dass beim REEV allein der Elektromotor das Fahrzeug antreibt. Der zusätzliche Verbrennungsmotor treibt lediglich einen Generator an, um die Stromver-

[1] Eine Trennung zwischen den unterschiedlichen Verbrenner/E-Motor-Kombinationen erfolgt in dieser Quelle nicht

sorgung für den Elektromotor auch dann sicher zu stellen, wenn die Batterie leer ist. Dies bietet etwa den Vorteil, dass es möglich ist, mehrere radnahe Motoren einzusetzen und so auf ein mechanisches Achsdifferential zu verzichten. Nachteilig ist jedoch, dass sowohl Verbrennungsmotor, als auch Generator und Elektromotor so groß dimensioniert sein müssen, dass jede dieser Komponenten die maximal zum Betrieb erforderliche Leistung bereitstellen kann. Sie sind somit voluminöser und haben mehr Gewicht als die Komponenten in einem PHEV. Nur wenn der Generator ausschließlich als Range-Extender dienen soll, kann er kleiner dimensioniert werden. Dies führt jedoch zu einer Verringerung der Leistung auf Strecken, auf denen ein reiner Betrieb des Fahrzeuges über den Generator vorgenommen wird [28, S.68f]. Einige Fahrzeuge sind speziell auf diese Motorenarchitektur ausgerichtet (z.B. Opel Ampera)[28, S.69f], während bei anderen Fahrzeugen der Range-Extender lediglich ein optionales Zubehörteil darstellt (z.B. BMW i3)[29].

Die REEV-Konstruktion ist alles andere als neu. Bereits 1900 präsentierte Ferdinand Porsche das von ihm entwickelte Elektrofahrzeug mit dem Namen „Semper Vivus“. Es wurde über zwei Radnabenmotoren an der Vorderachse angetrieben und verfügte über eine 410 kg schwere Bleibatterie. Im Nachfolgefahrzeug „Mixte“ wurde zusätzlich ein Benzinmotor zum Laden der Batterie integriert [17, S.8f].

Elektrofahrzeuge mit reinem Batterieantrieb/Battery-Electric-Vehicle (BEV)
BEVs stehen als Fahrzeuge, welche ausschließlich mit elektrischem Strom aus einer Batterie gespeist werden, im Fokus dieser Arbeit. Sie werden im Folgenden auch kurz Electric-Vehicle (EV) genannt. Momentan stellen sie 0,042% der deutschen Kraftfahrzeuge [21, S.12]. Im Gegensatz zu den mechanisch agierenden ICEs erfolgt im EV die Geschwindigkeits- und Drehmomentregulierung durch Spannungs- und Stromregelung. Eine Rückgewinnung von Energie beim Bremsen ist möglich. Elektrische Antriebe verfügen über eine Drehmoment- und Drehzahlcharakteristik, welche es erlaubt, für den Straßenverkehrseinsatz mit einer deutlich geringeren Nennleistung ausgelegt zu werden, als Verbrennungsmotoren. Die Beschleunigungswerte entsprechen, auf Grund des hohen Drehmoments und einem hohen Nutzungsgrad über einen weiten Drehzahlbereich hinweg, denen deutlich stärker motorisierter Verbrennerfahrzeuge [24, S.258]. Darüber hinaus liegt der Wirkungsgrad eines Elektromotors bei mehr als 90% [30, S.269]. Abwärme wie beim ICE wird von ihm kaum generiert [30, S.314]. Weiterhin zeichnen sich EVs durch einen im Betrieb geringeren Schadstoffausstoß als ICE aus (vgl. auch Abbildung 2.6). Dieser liegt lokal bei null, unter Einbeziehung der Aufwendungen für die Stromerzeugung bei der Nutzung des deutschen Strommix bei 0,583 kg CO_2e/kWh, und bei der Nutzung deutschen Ökostroms bei 0,292 kg CO_2e/kWh [25, S.231]. Ihre größte Schwachstelle liegt in der Energiedichte der Batterie. Diese enthält bis zu 200 Wattstunden (Wh) je kg Gewicht. Dies entspricht nur etwa einem Zwanzigstel des Energiegehalts eines Kilos Benzin oder Diesel [23, S.32f]. Entsprechend liegt ihre Reichweite unter derer von Fahrzeugen mit ICEs und ihr Gewicht oft über diesem.

Brennstoffzellenfahrzeuge/Fuel-Cell-Electric-Vehicle (FCEV)
FCEV werden an dieser Stelle der Vollständigkeit halber erwähnt. Auch sie werden durch einen Elektromotor angetrieben. Der benötigte Strom entstammt jedoch einer Brennstoffzelle (BZ), in der Wasserstoff mit Luftsauerstoff reagiert und so elektrischen Strom generiert. Eine nicht extern aufladbare Batterie ist mit ähnlicher Funktionalität wie beim HEV vorhanden [27, S.36f]. Da diese Fahrzeuge nicht direkt mit Strom „betankt“ werden können, werden sie in dieser Arbeit nicht näher behandelt.

Neben der Antriebsart lassen sich EVs und verwandte Fahrzeuge auch nach ihrer Größe und Zweckbestimmung kategorisieren. Verwendet wird im Folgenden die vom Kraftfahrtbundesamt festgelegte Einteilung [21, S.34f].

Krafträder
In der Gruppe der Krafträder befinden sich leichte vierrädrige Kfz, welche sich wiederum aufteilen lassen in *zulassungsfreie Krafträder mit Versicherungskennzeichen* welche über vier Räder verfügen, eine Leermasse von 350 kg nicht überschreiten und eine Höchstgeschwindigkeit von maximal 45 km/h aufweisen sowie *zulassungspflichtige/ -freie Krafträder mit amtlichem Kennzeichen*, welche leichte vierrädrige Kraftfahrzeuge Kraftfahrzeuge umfassen, die entweder der Personenbeförderung (maximal 400 kg Leermasse und 15 Kilowatt (kW)) oder der Güterbeförderung (maximal 550 kg Leermasse und 15 kW) dienen [21, S.34f].

Ein Beispiel für Fahrzeuge dieser Klasse stellt der Renault Twizy dar, welcher über eine Motorleistung von 4 kW oder 8 kW verfügt (je nach Variante), eine 6,1 kWh fassende Batterie mit einem Gewicht von 98 kg an Bord hat und zwei Personen platz bietet. Er verfügt über eine Reichweite zwischen 50 km und 80 km und kann an 230 V (Alternating Current (AC)) in 3,5 Stunden vollständig geladen werden [31].

Personenkraftwagen
Zu den Personenkraftwagen gehören Kraftfahrzeuge mit mindestens vier Rädern und maximal acht Sitzplätzen zuzüglich dem Fahrersitz. In diese Kategorie fallen etwa Limousinen, Kombilimousinen, Mehrzweckfahrzeuge und Pick-Ups [21, S.34f].

Zu den EVs aus dieser Kategorie zählen beispielsweise der VW eGolf, der Nissan Leaf, oder etwa der Tesla Model S. Letzterer ist mit 95.900 EUR Kaufpreis im Luxussegment angesiedelt, bietet dafür jedoch auch ansehnliche Leistungsmerkmale. So verfügt er über eine Batterie mit 85 kWh Kapazität, welche für eine Reichweite von mehr als 400 km sorgt. Geladen werden kann diese an den herstellereigenen Super-Chargern innerhalb von 20 min auf 80 %. An einem Starkstrom-Anschluss (400 V, 16 A, 3-phasig) lädt das Fahrzeug mit dem bordeigenen 11 kW-Lader in neun Stunden den Akku vollständig. An einer haushaltsüblichen Schuko-Steckdose (230 V, 13 A) nimmt dieser Vorgang 36 Stunden in Anspruch. Das Fahrzeug bietet zwischen fünf und (optional) sieben Personen Platz und erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 210 km/h [32].

Nutzfahrzeuge
Ist ein Kraftfahrzeug dafür ausgelegt, Güter oder Personen zu transportieren oder Anhängerfahrzeuge zu ziehen, so ist es als Nutzfahrzeug einzuordnen. Ein Nutzfahrzeug kann jedoch nicht zur Gruppe der Krafträder oder Personenkraftwagen gehören. Untergruppen sind etwa Kraftomnibusse, Lastkraftwagen oder Zugmaschinen.

Kraftomnibusse sind nach ihrer Bauart dazu bestimmt, mehr als neun Personen, sowie deren Gepäck zu transportieren. Auch in dieser Kategorie sind mittlerweile EVs vertreten [21, S.34f]. Als Beispiel anzuführen sind etwa Linienbusse in Berlin und Braunschweig, welche vollständig elektrisch betrieben und induktiv geladen werden [33][34].

Lastkraftwagen sind Nutzfahrzeuge, welche zum Transport von Gütern bestimmt sind. Sie werden untergliedert nach Gewichtsklassen (bis 3,5 t, 3,5 t bis 12 t oder mehr als 12 t) und nach Art des Aufbaus, also ob etwa das Führerhaus mit dem Laderaum eine Einheit bildet, oder ob beide getrennt voneinander ausgeführt sind [21, S.34f].

Ein EV zum Gütertransport der Klasse bis 3,5 t ist etwa der Nissan e-NV200. Dieser Kastenwagen bietet Platz für zwei Europaletten bzw. 4,2 m^3. Der 80 kW leistende Elektromotor wird aus einer 25 kWh fassenden Batterie gespeist. Er soll über eine Reichweite von bis zu 170 km verfügen [35].

Das letzte zu erwähnende Nutzfahrzeug ist die *Zugmaschine*. Diese ist ausschließlich oder überwiegend zum Mitführen von Anhängerfahrzeugen bestimmt [21, S.34f]. Sogar in diesem Anwendungsfeld existieren bereits elektrisch betriebene Fahrzeugkonzepte. Anzuführen ist etwa ein 40-Tonnen LKW-Gespann, welches für BMW innerhalb Münchens Fahrzeugteile transportiert. Es pendelt täglich acht mal zwischen einem BMW-Werk und einem Logistikzentrum. Eine volle Batterieladung soll eine Reichweite von 100 km ermöglichen. Dies entspricht in etwa der Tagesfahrleistung des Fahrzeuges. Eine Ladung kann in drei bis vier Stunden absolviert werden [36].

In dieser Arbeit werden im Folgenden ausschließlich Personenkraftwagen mit rein (batterie-) elektrischem Antrieb untersucht. Andere, durchaus interessante Antriebsformen und Fahrzeugklassen, werden in dieser Arbeit auf Grund des Umfangs einer solch umfassenden Erörterung nicht behandelt. Einzig reine Verbrennerfahrzeuge dienen stellenweise als Vergleichsobjekt, da sie den aktuellen Status Quo in der betrieblichen Mobilität darstellen.

2.1.3. Stand der Technik

In diesem Unterkapitel wird auf die einzelnen Komponenten des EV näher eingegangen und die Unterschiede zwischen EV und herkömmlichem ICE werden erläutert.

Für die Fertigung der **Karosserie** eines EV existieren drei Ansätze: Das *Conversion-Design*, das *Inline-Design*, sowie das *Purpose Design*. Das *Conversion Design* zeichnet sich durch die Übernahme und Anpassung einer herkömmlichen Karosserie eines ICE aus. Es ist derzeit am Markt weit verbreitet und bietet für den Hersteller den Vorteil, dass er viele bestehende Fahrzeugkomponenten aus der konventionellen Serienfertigung übernehmen

kann. Allerdings stehen bei dieser Fertigungsart nur die Räume in der Karosserie, welche durch Wegfall herkömmlicher Antriebskomponenten frei werden, zur Unterbringung der EV-Technik zur Verfügung. Oft können EV-typische Vorteile nicht voll ausgespielt werden. Das Gegenstück zum *Conversion-Design* stellt das *Purpose-Design* dar. Bei diesem wird die gesamte Karosserie auf die EV-Bedürfnisse hin entwickelt. Hierbei kommen oft Leichtbau-Techniken zum Einsatz, um das hohe Gewicht der Technik auszugleichen und es werden z.B. Batterieräume im Fahrzeugboden geschaffen [30, S.240f]. Weiterhin werden Chancen zur Umsetzung technischer Lösungen, welche das *Conversion-Design* nicht zulässt, geschaffen. Während etwa beim *Conversion-Design* ein zentral angeordneter Motor die Antriebsachse über ein Differential antreibt, bietet das *Purpose-Design* die Möglichkeit, das Differential einzusparen und den Antrieb über mehrere radnahe, oder in die Räder integrierte Motoren zu realisieren. Dies lässt es auch zu, einzelne Räder selektiv anzusteuern. Lenkung und Bremsen werden in diesem Fall auf elektronischem und nicht mehr auf mechanischem Weg gesteuert [28, S.91]. Die letzte Konstruktionsart der Karosserie stellt das *Inline-Desing* dar. Dieses Konzept sieht vor, dass eine gemeinsame Karosserie sowohl für eine ICE-Variante, als auch für eine EV-Variante und Hybrid-Varianten eines Fahrzeugs entwickelt wird. Dies ermöglicht dem Hersteller einerseits die Erschließung von Skaleneffekten in der Fertigung, da eine die einzelnen Fahrzeugvarianten zu einem großen Teil aus identischen Komponenten gefertigt werden, andererseits können die jeweiligen konstruktionsspezifischen Bedürfnisse bereits in der Planung der Karosserie berücksichtigt werden. Es ist davon auszugehen, dass das *Inline-Design* das *Conversion-Design* in Zukunft ablösen wird [30, S.240f].

Der **Antrieb** im EV wird über einen oder mehrere Elektromotoren realisiert. Diese können in zwei grundlegende Kategorien eingeteilt werden, die *Gleichstrom-* bzw. *Direct Current (DC)-Motoren* und die *Wechselstrom-* bzw. *AC-Motoren*. *Gleichstrommotoren* finden auf Grund unzureichender Leistungsfähigkeit in heutigen EVs keinerlei Verwendung mehr. Stattdessen werden Drehstrom (AC) Synchron- oder Asynchronmotoren eingesetzt. Diese erfordern eine aufwändigere Steuerung als *Gleichstrommotoren* und sind teurer, bieten jedoch höhere Leistungswerte [37, S.132]. Permanenterregte Synchronmaschinen bieten die höchsten Wirkungsgrade und Leistungsdichten und werden daher in den meisten EV eingesetzt. Jedoch erfordern sie den Rohstoff Neodym, was die Kosten in die Höhe treibt. Asynchronmaschinen stellen eine kostengünstige Alternative dar, welche jedoch einen schlechteren Wirkungsgrad und eine geringere Leistungsdichte bietet. Nur in höheren Drehzahlbereichen bieten sie Wirkungsgrade auf Niveau der permanenterregten Synchronmaschinen [30, S.269f]. Die permanenterregten Synchronmaschinen erreichen Maximaldrehzahlen von ca. 8.000 U/min, Asynchronmotoren hingegen können bis zu 20.000 U/min erreichen [37, S.132f].

Die **Batterie** des EVs ist seit Beginn der Elektromobilität, durch ihre geringe Energiedichte im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen, die die Leistung des EVs am meisten beschränkende Komponente. In diesem Abschnitt werden verschiedene Varianten und ihre Charakteristika erläutert. Eine Gegenüberstellung einiger Speichermedien ist in Abbil-

dung 2.2 dargestellt. Im Folgenden werden nur Sekundärzellen erläutert, welche an dieser Stelle der in der Literatur gebräuchlichen Bezeichnung nach als Batterie und nicht, wie fachlich korrekt, als Akkumulator bezeichnet werden.

Blei (Pb)-Batterien, z.B. in der Form von Blei-Gel-Batterien, zeichnen sich vor allem durch ihren geringen Preis aus. Da sie jedoch über ein sehr schlechtes Verhältnis von Gewicht zu Speicherkapazität verfügen, finden sie in reinen EVs kaum Verwendung [30, S.297].

Natrium-Nickelchlorid (NaNiCl)-Batterien zeichnen sich hingegen durch eine vergleichsweise hohe Energiedichte sowie eine vollständige Recyclebarkeit der Ausgangskomponenten, Nickel und Kochsalz, aus. Allerdings benötigt diese Batterie eine Betriebstemperatur von 300 °C. Die Energie für die Zellbeheizung muss der Batterie entnommen werden, was wiederum zu einer schnelleren Entladung führt. Auch können noch keine verlässlichen Aussagen zum Langzeitverhalten der Batterie gemacht werden. Trotzdem befindet sich dieser Batterietyp seit den 1990er Jahren im EV-Einsatz [28, S.107].

Nickel-Metall-Hydrid (NiMH)-Batterien weisen eine höhere Energiedichte auf als etwa Bleibatterien und werden deshalb in Mild- und Vollhybridfahrzeugen eingesetzt. Für den Einsatz in PHEV oder EV sind jedoch weder Energiedichte, noch Preis zulänglich [30, S.297f].

Nickel-Cadmium (NiCd)-Batterien bieten eine hohe Lebensdauer und geringe Herstellkosten, allerdings weisen sie eine hohe Selbstentladung und Memoryeffekte auf. Da sie bei Beschädigung (z.B. durch einen Unfall) giftige Substanzen freisetzen, ist ihr Einsatz in EVs seit 2004 in der EU verboten [28, S.108].

Speichersystem	Energie-träger	Energiedichte Wh/kg	Faktor zu Benzin	Faktor zu Diesel
Kondensator	Kondensator	4	3.175	2.900
Sekundärzellen	NaNiCl	100	127	126
	Pb-PbO2	20 – 40	635-317	580-290
	Ni-Cd	40 – 60	317-211	290-193
	Ni-MH	60 – 90	211-141	193-129
	Ag-Zn	80 – 120	159-106	145-97
	Li-Ion	100 – 200	127-64	116-58
Kraftstoff	Benzin	12.700	1	1,1
	Diesel	11.600	0,9	1

Abbildung 2.2.: Energiedichte verschiedener Energieträger [28, S.74]

Am weitesten verbreitet und am stärksten in der Entwicklung gefördert werden derzeit *Lithium-Ionen (Li-Ion)-Batterien*. Sie wurden ursprünglich für tragbare elektronische Geräte wie z.B. Laptops entwickelt und zeichnen sich durch eine hohe Zellspannung und eine geringe Selbstentladung aus [19, S.57]. Eine Energiedichte von bis zu 200 Wh/kg

kann erreicht werden [38, S.50]. Bei der selben Kapazität wiegen Li-Ion-Batterien daher 30% weniger und benötigen 50% weniger Platz als die in der Vergangenheit eingesetzten NiMH-Batterien. Daneben ermöglichen sie schnellere Ladevorgänge und verfügen über eine höhere Lebensdauer [28, S.109].

Die einzelnen Li-Ion-Batteriezellen werden derzeit hauptsächlich in drei verschiedenen Formen hergestellt. Feste Zellen werden entweder in der klassischen Zylinderform, oder in prismatischer Form mit Stahl- oder Aluminiumgehäuse gefertigt. Alternativ existieren flexible Zellen aus Aluminium-Polymer-Verbundfolie [39, S.402].

Für den Einsatz in einem EV werden einzelne Batteriezellen zumeist in einer Kombination aus Reihen- und Parallelschaltung zu einem Batteriemodul zusammengefasst. Ein **Batteriemanagementsystem (BMS)** überwacht den Ladestand der einzelnen Zellen in diesem Zusammenschluss, regelt die Temperatur über ein Kühlsystem und überwacht Be- und Entladung. Auf diese Weise wird etwa eine unterschiedlich starke Belastung verschiedener Zellen verhindert [38, S.56f].

Die Verbindung zwischen Batterie und Antrieb stellt die aus einem Inverter (Wechselrichter) und einem DC/DC-Wandler bestehende **Leistungselektronik** dar. Sie steuert den Energiefluss und stellt weiterhin die Verbindung zwischen der Batterie und dem 12 V Bordnetz dar [38, S.13]. Einen schematischen Überblick über die Verbindung der Komponenten stellt Abbildung 2.3 dar.

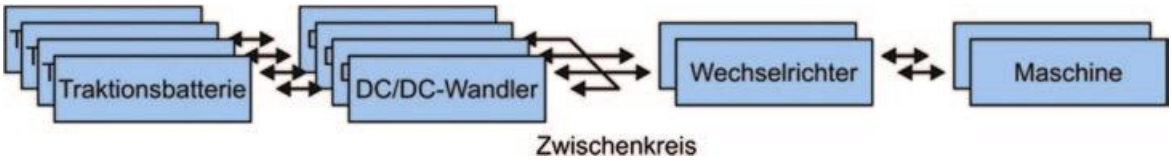


Abbildung 2.3.: Antriebsstrangtopologie [30, S.268]

Die **Stromversorgung** eines EVs kann auf drei Arten erfolgen: Erstens die Ladung per Kabel, zweitens die kabellose Ladung (per Induktion) und drittens der Tausch der Batterie. Da nur die erste Variante in den derzeit am Markt erhältlichen EV-PKW anzutreffen ist, erfolgt im Weiteren eine Beschränkung auf diese. Die kabelgebundene Ladung kann wiederum unterteilt werden in die AC-Ladung und die DC-Ladung. Die Ladung mit Wechselstrom (AC) ist hierbei die gebräuchlichere Technik, welche über eine Haushaltssteckdose oder eine Ladestation zur Normal-Ladung oder Semi-Schnellladung eingesetzt werden kann. Das Gegenstück hierzu bildet die Gleichstromladung (DC), über welche eine Schnellladung möglich ist. Hierzu ist eine Gleichrichtung des Netzstroms in der Ladeeinrichtung notwendig, was teure und aufwändige Technik erfordert [40, S.57]. Fahrzeugseitig ist ein Ladegerät verbaut, welches im Fall der AC-Ladung den ein- oder bei einigen Fahrzeugen auch dreiphasigen Ladestrom erst gleichrichtet und ihn dann, nach dem Durchlaufen eines DC-DC-Wandlers, in die Batterie speist. An einer Haushaltssteckdose (einphasig, 3,5 kW) kann dieser Prozess für eine Reichweite von 150 - 200 km durchaus 7 - 10 Stunden in Anspruch nehmen. Durch eine dreiphasige Ladung mit 11 - 22 kW kann sich dieser

Wert an eine Stunde annähern. In Zeiträumen von deutlich unter einer Stunde kann nur mit Hilfe einer DC-Schnelladung von 50 kW aufwärts eine nennenswerte Ladung erreicht werden [30, S.281f]. Im Fall der DC-Ladung entfällt die Nutzung des fahrzeugseitigen Gleichrichters.

Zur Verbindung des Fahrzeugs mit der Ladeeinrichtung existieren verschiedene, untereinander nicht kompatible Steckersysteme. Hauptsächlich für die AC-Ladung bestimmt sind die Steckertypen Typ 1, Typ 2 und Typ 3. Der Typ 1 Stecker ist vorwiegend in Japan und den USA verbreitet und ist für eine einphasige Ladung ausgelegt. Der Typ 2 Stecker, welcher in Europa als Standard festgelegt wurde [41, §33], bietet hingegen auch die Möglichkeit einer dreiphasigen Ladung. Der Typ 3 Stecker, welcher in südeuropäischen Ländern (z.B. Italien, Frankreich) Anwendung findet, gleicht dem Typ 2 Stecker, jedoch verfügt die zugehörige Steckdose über eine Sicherheitsabdeckung. Für die Gleichstrom-Schnellladung existieren die Standards Combo bzw. Combined-Charging-System (CCS) und CHAdeMO. Während CHAdeMO einen eigenständigen fahrzeugseitigen Anschluss vorsieht, ist das CCS eine Erweiterung des Typ 1 bzw. Typ 2 Steckers um zwei Gleichstromkontakte [40, S.59f].

Neben den bisher genannten EV-Komponenten, welche direkt den Antriebsstrang und dessen Unterbringung im Fahrzeug betreffen, ergeben sich durch den Einsatz eines vollelektrischen Antriebs notwendige Anpassungen an anderen Fahrzeugkomponenten. Als wichtiger Punkt ist an dieser Stelle die **Klimatisierung** des Innenraums zu nennen. Konnte im Fall eines ICEs noch die reichlich verfügbare Abwärme des Motors zur Beheizung des Innenraums genutzt werden, steht diese Möglichkeit bei einem Elektromotor mit einem Wirkungsgrad von über 90% nicht zur Verfügung. Da eine direkte Umwandlung elektrischer Energie in Wärme den ohnehin begrenzten Batteriespeicher zusätzlich belasten würde (bei einer Außentemperatur von 4 °C etwa wären 3,6 kW nötig um eine Innenraumtemperatur von 20 °C zu halten), werden verschiedene aktive wie passive Systeme zum Temperaturmanagement des Innenraums entwickelt. Hierzu zählen unter anderem Ansätze zur Dämmung, bedarfsgerechten Lüftung, zum Einsatz thermischer Speicher oder zur Beheizung von Fahrzeugflächen anstatt der bisher üblichen Luftbeheizung [42, S.314f]. Auch die **Hydraulik** im Fahrzeug ist durch den Wegfall des bisher vom Verbrennungsmotor erzeugten Saugrohrunterdrucks betroffen. Hydraulische Systeme wie die Bremskraftverstärkung müssen nun entweder mit Hilfe elektrischer Hydraulikaggregate betrieben, oder durch vollständig elektrische Systeme ersetzt werden. Interessant ist, dass diese Techniken vermehrt auch in ICEs Verwendung finden, so ist die früher hydraulisch betriebene Lenkkraftunterstützung heute schon in vielen Verbrennerfahrzeugen zur Erschließung von Spritsparpotentialen einer elektrischen Lenkkraftverstärkung gewichen [28, S.166f].

Zuletzt soll in diesem Unterkapitel das **Stromnetz** als umgebendes System, mit welchem das EV interagiert, Erwähnung finden. In dieses sind die EVs als Verbraucher auf Niederspannungsebene eingebunden und beeinflussen es mit zunehmender Verbreitung. Dabei verursacht der Energieverbrauch allein keinen signifikanten Einfluss auf die Kraftwerkss-

truktur. Die Steigerung des Jahresenergieverbrauchs durch Elektromobilität wird mit maximal 15% der derzeitigen (Anm.: Stand 2013) Bruttostromproduktion angenommen. Problematisch ist hingegen die erforderliche Anschlussleistung, welche unter Annahme der vollen Marktdurchdringung bei maximal 150 Gigawatt (GW) Leistung bei 3,6 kW je Fahrzeug läge. Besonders problematisch sind ländliche Gebiete mit schwach ausgebautem Netz und hoher Schwankung an Erzeugung (Photovoltaik (PV)-Strom, Kleinstkraftwerke) und Verbrauch (z.B. EV-Ladung). Hier sind Ausbaumaßnahmen ab einem Durchdringungsgrad von ca. 20% bei Ladeleistungen von 3,6 kW nötig. Insbesondere viele gleichzeitig auftretende Ladevorgänge können das Netz stark belasten. Die angenommene Gleichzeitigkeit der auftretenden Ladevorgänge sinkt jedoch im Schnitt mit steigender Anschlussleistung. Weiterhin belastet die einphasige Ladung die Netzinfrastruktur asymmetrisch. Die Möglichkeit der dreiphasigen Ladung kann helfen, die ungleichmäßige Belastung der Netzinfrastruktur zu verhindern. Ein möglicherweise benötigter Netzausbau kann verschoben oder vermieden werden, wenn Techniken zum Angleichen von Energieerzeugung und -verbrauch Anwendung finden [43, S.79f].

Ein sogenanntes *Intelligentes Stromnetz* bzw. *„Smart Grid“*, in dem Erzeuger und Verbraucher in der Lage sind, miteinander zu kommunizieren, Energiebedarf und Energieverfügbarkeit abzugleichen und daraus Steuerungsmaßnahmen abzuleiten, bietet sich als Lösung zur Entlastung der Netze an. So kann etwa der Energiebezug steuerbarer Verbraucher, wie der von EVs in Zeiten mit hoher Erzeugung erneuerbarer Energien verlagert werden. Erweitert werden kann dieses Vorgehen etwa durch das Vehicle to Grid (VtG)-Konzept, welches vorsieht, dass EVs in Zeiten hoher Stromverfügbarkeit ihre Speicher laden und einen Teil dieses Stroms in Zeiten von Lastspitzen entgeltlich wieder in das Netz zurückspeisen. Dies erfordert jedoch, dass das Fahrzeug zu Zeiten hoher Stromerzeugung an das Stromnetz angeschlossen ist [27, S.108f].

Notwendig sind hierfür etwa rechtliche Grundlagen, welche es einem Arbeitnehmer ermöglichen würden, sein EV beim Arbeitgeber, wo es tagsüber steht, an das Stromnetz anzuschließen. Letztendlich bestehen natürlich auch Möglichkeiten der Netzentlastung, indem Lokal erzeugter Strom, etwa aus einer PV-Anlage direkt zum Laden eines EVs verwendet wird, ohne durch das öffentliche Stromnetz geleitet zu werden [44, S.32].

2.2. Wirtschaftlichkeit

Die wichtigste Voraussetzung für die breite Nutzung der Elektromobilität ist neben der Praktikabilität die Wirtschaftlichkeit. Solange gleich- oder höherwertige Arten der Mobilität zu einem geringeren Preis zur Verfügung stehen, fällt die rationale Entscheidung zur Nutzung eines EVs schwer.

Die Herstellungskosten eines Fahrzeuges ändern sich gravierend, wenn statt eines konventionellen ICE ein elektrischer Antriebsstrang verbaut wird. Für einen generischen Mittelklasse-Wagen ist von einem Kostenrückgang, verursacht durch den Wegfall des Verbrennungsmotors, der Abgasanlage, etc. in Höhe von ca. 30% der Gesamtkosten auszugehen. Weiterhin sinken die Gesamtkosten um etwa 15% durch Modifikation von Teilen, etwa dem Getriebe. Durch neu hinzukommende Teile wie den Elektromotor und vor allem

die Batterie steigen die Fahrzeugkosten jedoch wieder um ca. 65% an. Die Folge ist, dass die Fahrzeugkosten ca. 20% über denen eines vergleichbaren Verbrennerfahrzeuges liegen [45, S.3f]. Trotz der deutlich niedrigen Betriebskosten des EVs kann bei der derzeitigen Preisgebung kaum ein wirtschaftlicher Vorteil erschlossen werden [28, S.157f].

Diese Situation wird in Tabelle 2.2 beispielhaft anhand des Vergleichs zweier VW-Golf Fahrzeuge dargestellt. Die Gegenüberstellung der initialen Fahrzeugkosten und der anschließenden Verbrauchsaufwendungen verdeutlicht, dass die E-Fahrzeug-Variante gravierend höhere Anschaffungskosten verursacht, als die Benziner-Variante im Betrieb (ohne Berücksichtigung weiterer Faktoren wie Wartung, Kfz-Steuer, etc.) jedoch geringere Kosten verursacht.

Tabelle 2.2.: Vergleich eGolf/Golf (Stand 2015) [46, 47, 48, 49]

	eGolf	**Golf**
Grundpreis	34.900 EUR	23.050 EUR
Verbrauch je 100 km	18,2 kWh	5,1 l
Kosten je kWh bzw. l	0,29 EUR	1,39 EUR
Kosten kWh bzw. l je 100 km	5,23 EUR	7,11 EUR

In dieser vereinfachten Kostensituation ist erkennbar, dass nach einer bestimmten Fahrleistung die fahrzeugbezogenen Gesamtkosten des EVs die Gesamtkosten des konventionellen Fahrzeugs schneiden werden. Ab diesem Schnittpunkt ist das EV wirtschaftlich vorteilhaft.

Wird dieser Schnittpunkt berechnet, ergibt sich jedoch eine notwendige Fahrleistung von 630.211,88 km zur Erreichung der Kostengleichheit. Es ist anzuzweifeln, dass eine solche Fahrleistung mit dem eGolf möglich ist. VW garantiert nur eine Lebensdauer der Fahrzeugbatterie von 160.000 km [50, S.180], etwa einem Drittel der nötigen Strecke. Zudem entspräche diese Gesamtfahrleistung bei einer mittleren Fahrzeuglebenserwartung für einen Pkw in Deutschland von 11,9 Jahren [4, S.49f] einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 52.958,98 km. Es ist daher als höchst unwahrscheinlich anzusehen, dass dieser Punkt der Kostengleichheit in der Realität unter den genannten Rahmenbedingungen jemals erreicht werden könnte.

Eine umfassendere Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität mit Fokus auf die gewerbliche Nutzung wurde in Form einer Gesamtkostenanalyse im Rahmen des Förderschwerpunkts „IKT für Elektromobilität“ des BMWi auf Basis empirischer Erhebungen durchgeführt [5].

Basierend auf dem Umstand, dass EVs höhere Investitionskosten aufweisen als ICEs, ihre Betriebskosten jedoch deutlich niedriger sind, wurde in dieser Untersuchung ein Gesamtnutzungskosten- bzw. Total Cost of Ownership (TCO) Modell für die einzelnen Fahrzeuge aufgestellt.

In dieses gingen die folgenden Faktoren ein:
- Anschaffungspreis
- Steuerliche Abschreibungen (AfA)
- Restwert am Ende der Haltedauer
- Kosten der Ladeinfrastruktur[2]
- Kosten für Instandhaltung/Wartung der Ladeinfrastruktur[2]
- Kfz-Steuer, Versicherung und Kosten für Haupt-/Abgasuntersuchung
- Kosten für Fahrzeugwartung, -pflege, -reparatur
- Kraftstoffkosten

Um die Unsicherheiten bei der Entwicklung der entscheidenden Kostenfaktoren Batteriepreis, Strompreis und Kraftstoffpreis abzubilden, wurden verschiedene Szenarien betrachtet. Neben einem mittleren Szenario, welches die wahrscheinlichste Kostenentwicklung abbildet, wurde ein optimistisches Szenario definiert, bei welchem Batterie- und Strompreis jeweils 10% unter und der Kraftstoffpreis 10% über dem mittleren Szenario liegen und ein pessimistisches Szenario bei dem Batterie- und Strompreis 10% über und der Kraftstoffpreis 10% unter dem mittleren Szenario liegen.

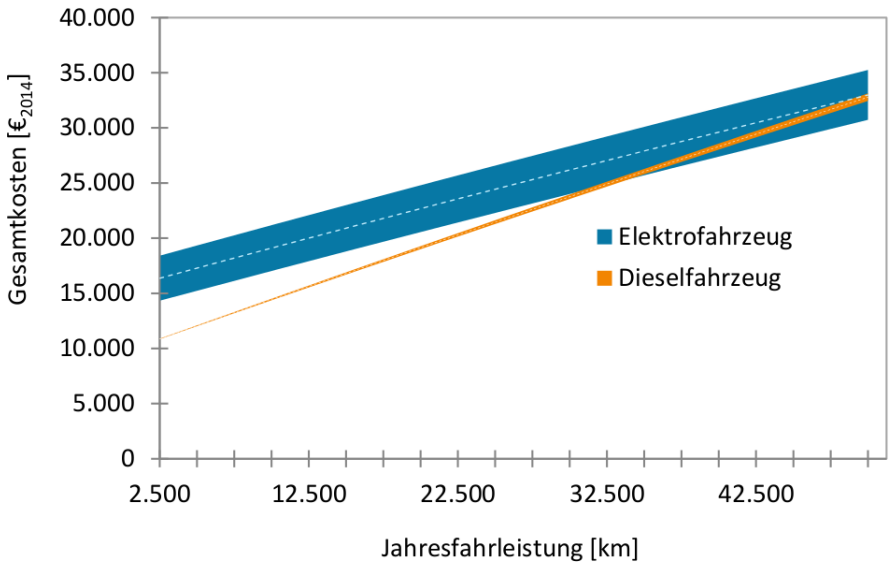


Abbildung 2.4.: Kostenvergleich EV/Diesel PKW 2014 [5, S.49]

Da in den kommenden Jahren von sinkenden Batteriepreisen und steigenden Kraftstoffpreisen ausgegangen wird, werden die Anschaffungszeitpunkte 2014 und 2020 getrennt, jeweils mit einer Fahrzeughaltedauer von vier Jahren betrachtet. Im Weiteren erfolgt eine kurze Darstellung der Ergebnisse der Analyse für das PKW-Segment. Abbildung 2.4 zeigt hierzu die zu erwartenden TCO (abgezinst und inflationsbereinigt) in Abhängigkeit von der Jahresfahrleistung für das Anschaffungsjahr 2014.

[2] Nur bei EVs

In der Szenarioanalyse ergeben sich für das Anschaffungsjahr 2014 Schnittpunkte der TCO von EV und ICE für das optimistische Szenario bei einer jährlichen Fahrleistung von 30.400 km. Für das mittlere Szenario liegt dieser bei 50.000 km/a. Es wird davon ausgegangen, dass die Batteriepreise bis zum Jahr 2020 um etwa 30% fallen. Bei den Strompreisen wird angenommen, dass diese durch die Erneuerbare Energien Gesetz (EEG)-Umlage bis 2020 leicht zunehmen und sich ab diesem Punkt rückläufig entwickeln. Für die Kraftstoffpreise hingegen wird von einer kontinuierlichen Zunahme ausgegangen. Diese Faktorenentwicklung begünstigt langfristig die Wirtschaftlichkeit des EVs. Dies spiegelt sich in der TCO-Betrachtung für ein im Jahr 2020 angeschafftes Fahrzeug wieder (vgl. Abbildung 2.4). In diesem Fall schneiden sich die TCO im optimistischen Szenario bereits bei 8.200 km/a und im mittleren Szenario bei 30.000 km/a.

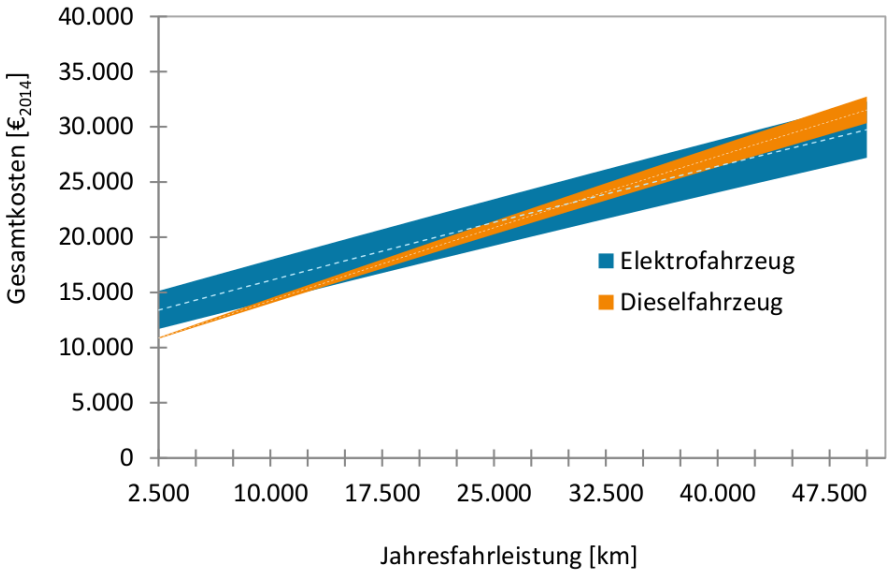


Abbildung 2.5.: Kostenvergleich EV/Diesel PKW 2020 [5, S.50]

Zusammenfassend lässt sich für die Wirtschaftlichkeit von EVs festhalten, dass sie derzeit nur unter bestimmten Voraussetzungen gegeben ist. Eine Verbesserung dieser Situation ist jedoch durch die Marktentwicklung für die Zukunft absehbar.

Die Gesamtnutzungskosten eines EVs setzen sich zu bedeutenden Teilen aus dem Batteriepreis, der Fahrleistung und den durch sie verursachten Stromkosten zusammen. Determinanten der Wirtschaftlichkeit, welche unabhängig von der Preisgestaltung des Original Equipment Manufacturers (OEMs) beeinflusst werden können, sind somit die Anpassung der Nutzungsintensität des Fahrzeugs und der Bezug des Stroms aus einer möglichst kostengünstigen Quelle.

2.3. Umwelt und Nachhaltigkeit

EVs werden oft als klima- und umweltfreundliche Mobilitätslösung angesehen. Es ist korrekt, dass EVs lokal beim Betrieb keine Emissionen erzeugen [25, S.231]. In eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltfreundlichkeit muss jedoch auch die Fertigung des Fahrzeugs, sowie die Erzeugung des verwendeten Stroms mit einbezogen werden. Unter Verwendung der heutigen Techniken entstehen bei der Fertigung eines EV etwa doppelt so viele CO_2 Emissionen, wie bei der Produktion eines konventionellen Kraftfahrzeugs [27, S.93].

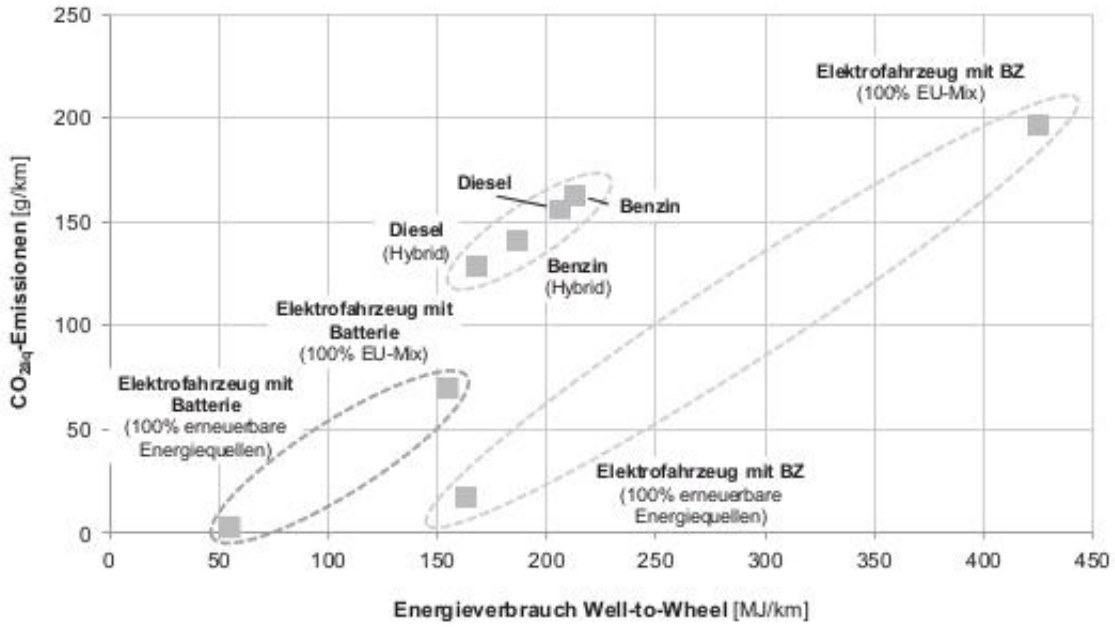


Abbildung 2.6.: Emissionen und Energieverbrauch unterschiedlicher Fahrzeuge [27, S.95]

Soll ein EV diesen Nachteil wieder aufholen, muss es im Laufe seiner Betriebszeit einen deutlichen CO_2-Vorteil gegenüber einem konventionellen Verbrenner erbringen. Maßgeblicher Faktor ist hier die Herkunft des zum Betrieb genutzten elektrischen Stroms. Die bei dessen Erzeugung entstehenden CO_2-Emissionen können direkt dem Fahrzeugbetrieb zugeordnet werden. Dargestellt wird eine solche Betrachtung oft in Form einer sogenannten Well-to-Wheel[3] Analyse, welche die gesamten anfallenden Emissionen von der Produktion eines Kraftstoffs bis hin zu seinem Verbrauch aufsummiert (vgl. Abbildung 2.6). Aus dieser geht zwar hervor, dass ein EV, welches mit dem durchschnittlichen europäischen Strommix betrieben wird, deutlich geringere Emissionen verursacht, als ein Verbrennerfahrzeug.

[3] Sinngemäß: Von der Quelle bis zum Rad

Dieser Vorteil reicht jedoch nicht aus, um die initialen Produktionsemissionen auszugleichen. Auf eine Gesamtfahrleistung von 150.000 km umgerechnet liegt ein EV bei den im Lebenszyklus verursachten CO_2-Emissionen zwischen denen von Diesel- und Benzinfahrzeugen. Ein geringerer CO_2-Ausstoß kann nur erreicht werden, wenn das EV mit Strom betrieben wird, welcher aus erneuerbaren Quellen gewonnen wurde [27, S.93f].

Die im Betrieb anfallenden Emissionen sehen für ein konkretes Fahrzeugbeispiel wie folgt aus: Ein mit Ökostrom betriebener eGolf verursacht 52 g CO_2e/km, mit dem deutschen Strommix betrieben, fallen 103 g CO_2e/km an. Ein konventioneller TSI Golf verursacht Emissionen von 24 g CO_2e/km für die Kraftstoffbereitstellung und weitere 108 g CO_2e/km entstehen im eigentlichen Betrieb, insgesamt also 132 g CO_2e/km [25, S.232].

Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Umwelt entstehen nicht nur durch Emissionen durch den Fertigungsprozess und die Bereitstellung der Antriebsenergie, sondern auch durch die Rohstoffentnahme und die notwendige Weiterverwertung der Bestandteile nach Produktlebensende.

Die Änderung am Rohstoffbedarf gegenüber einem herkömmlichen ICE treten vor allem in den Bereichen Motor (Kupfer, Neodym) und Batterie (Lithium) auf. Der Kupferbedarf je Fahrzeug steigt durch Elektrifizierung von derzeit etwa 25 kg (ICE) auf 30 kg (EV). Durch diesen Nachfrageanstieg sind zwar Preissteigerungen möglich, die Versorgung ist jedoch nicht gefährdet. Permanent erregte Motoren benötigen weiterhin den Rohstoff Neodym zur Herstellung der enthaltenen Dauermagnete. Hier sind 0,5 kg bis 1 kg je Fahrzeug nötig. Es ist unklar, ob die durch die Elektromobilität ansteigende Nachfrage befriedigt werden könnte. Zudem finden 97% der Neodymgewinnung in einem einzigen Land statt, so dass auch politische Faktoren einen großen Einfluss auf die Verfügbarkeit haben können [28, S.144f]. Auch sollte die Umweltbelastung, die durch die Förderung verursacht wird, nicht außer Acht gelassen werden. Da jedoch fremd erregte Motoren eine neodymfreie Alternative darstellen, welche ähnliche Leistungscharakteristika bietet, geht von einer möglichen Rohstoffknappheit oder der Zielsetzung der umweltschonenden Fertigung keine Gefährdung für die Elektromobilität aus [51, S.253, S.40].

Für die Batterie wird der Rohstoff Lithium benötigt. Der Bedarf liegt bei etwa 0,3 kg/kWh. Die Verfügbarkeit ist grundsätzlich gegeben, es ist jedoch mit Preisschwankungen zu rechnen, da die aktuellen Förderkapazitäten stark ausgebaut werden müssen. Zudem sind einige Lithiumquellen, etwa in Bolivien, auf Grund politischer Rahmenbedingungen nicht erschlossen. Für eine langfristige Nutzung der Lithium-Ionen-Technologie ist ein effektives Recyclingverfahren zur Zurückgewinnung des Lithiums aus Altbatterien unverzichtbar. Für weitere, in geringen Mengen zur Batteriefertigung verwendeten Rohstoffe wie Graphit, Aluminium etc., liegen keine Engpässe vor [28, S.149f].

Die Lebensdauer von Lithium-Ionen Fahrzeugbatterien wird für den Technikstand des Jahres 2014 auf etwa sieben Jahre geschätzt. Für das Jahr 2017 wird eine Verbesserung dieses Werts auf zehn Jahre erwartet [52, S.23]. Die Kombination der Lebenserwartung der Fahrzeugbatterie mit dem erwarteten Markthochlauf der Elektromobilindustrie ergibt die in der Zukunft voraussichtlich anfallenden Mengen an ausgedienten Batterien.

Es wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2020 etwa 1.000 Tonnen Altbatterien aus Hybrid- und Elektrofahrzeugen in Deutschland anfallen. Diese Zahl wird bis zum Jahr 2030 auf etwa 29.000 Tonnen ansteigen. Zwar existieren Konzepte zur Wieder- oder Weiterverwendung der Batterien aus ausgedienten EVs, jedoch wird angenommen, dass dies nur bei etwa acht Prozent der EVs umgesetzt wird und sich die Zweitnutzung auf lediglich zwei Jahre beschränkt. Die anfallenden Altbatterien müssen somit zum Großteil direkt weiter verwertet werden [53, S.15f].

Zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien können zwei unterschiedliche Verfahren, sowie Kombinationen dieser eingesetzt werden. Dies sind zum einen die *hydrometallurgischen Verfahren*, in welchen in nasschemischen Prozessen unter Einsatz verschiedener Säuren, Laugen und Fällungsmitteln, Rohstoffe aus den Altbatterien extrahiert werden. Zum anderen existieren *pyrometallurgische Verfahren*, in denen die Altbatterien eingeschmolzen, und die Rohstoffe, vornehmlich Metalle, von den restlichen Batteriebestandteilen getrennt werden. *Hydrometallurgische Verfahren* bieten den Vorteil, dass sie eine hohe Bandbreite der in den Batterien enthaltenen Rohstoffe zurückgewinnen können, jedoch sind sie zeitaufwändig und es fallen große Mengen Abwässer und Schlämme an. *Pyrometallurgische Verfahren* hingegen ermöglichen eine hohe Raum/Zeit-Ausbeute, jedoch ist der Vorgang energieintensiv und es fallen großen Mengen an Abgasen an, welche gereinigt werden müssen [54, S.213f].

Im experimentellen Verfahren „LithoRec - Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ sollen 85% bis 95% Lithium-Rückgewinnung möglich sein. Hierzu wird eine Kombination aus mechanischen und hydrometallurgischen Verfahren eingesetzt. Durch eine automatisierte Demontage der Zellen wird die in anderen Verfahren übliche, beim Schreddern der Zellen auftretende, Verunreinigung vermieden. Die so aufgearbeiteten Rohstoffe haben Batteriegüte, können also wieder in den Rohstoff-Kreislauf eingebracht werden [53, S.1f].

Grundsätzlich lässt sich die Umweltfreundlichkeit von EVs, insbesondere in Bezug auf den Schadstoffausstoß unter der Voraussetzung der Nutzung regenerativer Energien, als gegeben festhalten. Der zunehmende Anteil an Strom aus erneuerbaren Quellen im deutschen Strommix (vgl. Kapitel 4.1.2) begünstigt die Erschließung dieses Vorteils. Ein Austausch von Verbrennerfahrzeugen könnte insbesondere im betrieblichen Umfeld, in dem aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten vornehmlich Dieselfahrzeuge eingesetzt werden (66% aller Fahrzeuge im gewerblichen Einsatz verglichen mit 27% im privaten Sektor [21, S.13]), einen deutlichen ökologischen Mehrwert schaffen (siehe hierzu auch die in Kapitel 2.1.2 aufgeführten Schadstoffwerte). Für eine breite und lang anhaltende Nutzung der Elektromobilität ist ein Ausbau der derzeitigen Recyclingkapazitäten notwendig. Zudem sollte eine Adaptierung von Verfahren mit hohen Rückgewinnungsquoten der in den Batterien eingesetzten Rohstoffe angestrebt werden, um einen rationalen Umgang mit den knappen Materialressourcen sicherzustellen.

2.4. Fahrzeugflotten

Wie eingangs erwähnt, soll in dieser Abhandlung das betriebliche Umfeld als Einsatzkontext für EVs untersucht werden.

Betriebliche Fahrzeugflotten erfüllen je nach Betriebszweck unterschiedlichste Aufgaben und sind entsprechend divers aufgestellt. Mögliche Ausprägungen sind Nutzfahrzeugflotten zum Transport von Gütern oder Personen, Fahrzeuge für den reinen Werksverkehr oder PKW-Flotten, welche die Mobilität der Mitarbeiter sicherstellen [55, S.11].

Für den Zweck dieser Abhandlung findet eine Beschränkung auf die Kleinwagenklasse im betrieblichen Einsatz statt. Aufgabe dieser Fahrzeuge im Betrieb stellt somit primär nicht der Transport von Gütern, sondern die Abwicklung des Personenverkehrs dar.

Der Umfang der betrieblich gehaltenen Fahrzeuge lässt sich anhand der folgenden Zahlen verdeutlichen. In der Hand gewerblicher Halter befinden sich derzeit etwa 10,3% der zugelassenen PKWs, insgesamt 4.585.315 Fahrzeuge [21, S.13]. Bemerkenswert ist jedoch, dass ca. 64% der Neuzulassungen, insgesamt 1.937.740 Fahrzeuge, durch gewerbliche Halter vorgenommen werden [56]. Dies schließt zwar auch Kurzzeitzulassungen von Händlern ein, trotzdem entfällt ein Anteil von insgesamt 65% dieser Zulassungen auf das verarbeitende Gewerbe, KFZ-Vermietungen und weitere Geschäftszweige bzw. Dienstleister [57]. Da die gewerblich zugelassenen PKW nach ihrer vergleichsweise kurzen betrieblichen Nutzung auf dem Gebrauchtmarkt angeboten werden, hat die Fahrzeugwahl der gewerblichen Kunden einen deutlichen Einfluss auf die Art der insgesamt genutzten PKWs [52, S.34].

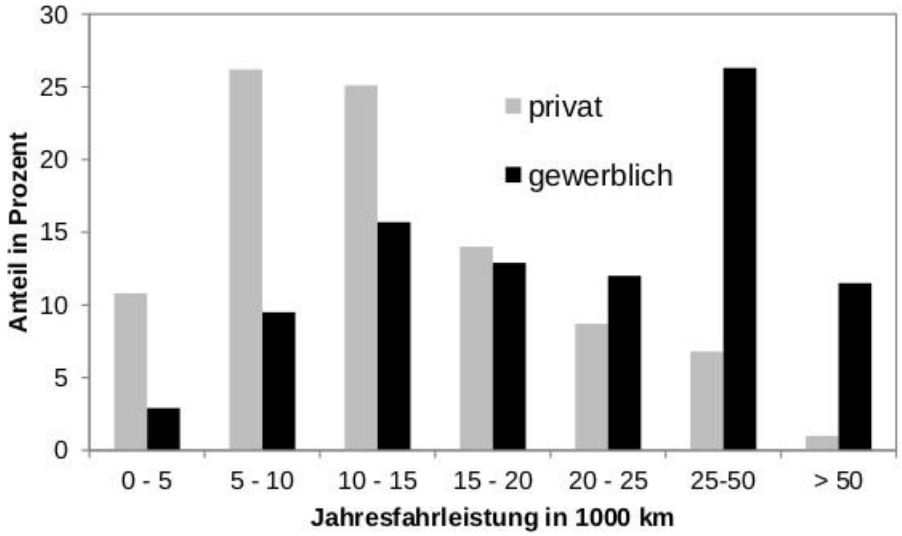


Abbildung 2.7.: Jahresfahrleistung gewerblich/privat [6, S. 11]

Für den Einsatz der Elektromobilität im gewerblichen Umfeld werden in der Literatur verschiedene Vorteile genannt, die es für eine rasche Adaption dieser als besonders prädestiniert ausweisen sollen. So wird angeführt, dass die Kaufentscheidungen im Business-Sektor stark wirtschaftlich orientiert sind. Es wird mehr Augenmerk auf die TCO gelegt, als im privaten Sektor [52, S.34f]. Daneben liegen oft gut planbare, we-

nig Schwankungen unterliegende Fahrprofile vor. Oft decken sich Tagesfahrleistung und EV-Reichweite. Sollte die EV-Reichweite für einzelne Fahrten nicht ausreichen, kann dies durch die Flottenzusammenstellung kompensiert werden [5, S.6]. Zudem besteht oft die Möglichkeit, Ladeinfrastruktur auf dem Firmengelände aufzubauen. Eine Abhängigkeit vom Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur liegt somit nicht vor [8, S.11].

Auch die Auswirkung einer hohen EV-Adaptionsquote im Geschäftsbereich auf den CO_2-Ausstoß, an dem dieser auf Grund der hohen Jahresfahrleistungen (vgl. Abbildung 2.7) einen überdurchschnittlich hohen Anteil verursacht, würden beträchtliche Folgen auf die Umwelt haben [6, S.11]. Nicht zuletzt ist anzuführen, dass immer mehr Unternehmen Nachhaltigkeitsaspekte in ihre Fuhrparkentscheidungen einfließen lassen. Umweltschonende Technologien werden demonstrativ präsentiert [52, S.34f]. So werden derzeit 68,2% der EV von gewerblichen Haltern betrieben [21, S.13].

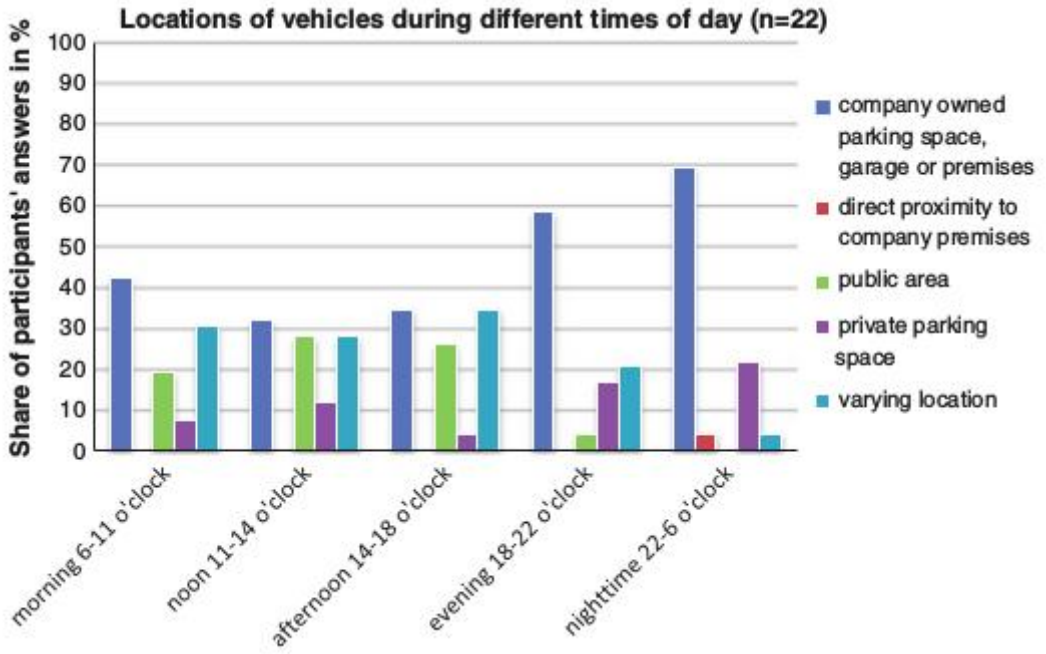


Abbildung 2.8.: Standort von Fahrzeugen zu unterschiedlichen Tageszeiten [58]

Die Chancen, welche das betriebliche Flottenumfeld für Elektromobilität in der Praxis bietet, verdeutlicht eine Erhebung unter 22 Unternehmen in der Modellregion Bremen/Oldenburg zwischen 2011 und 2014 [58, S.237f]. Die befragten Unternehmen wurden nach Größe zusammengefasst: Kleine Unternehmen (unter 10 Mitarbeiter), kleine bis mittlere Unternehmen (10 - 50 Mitarbeiter), mittlere Unternehmen (50 bis 250 Mitarbeiter) und große Unternehmen (mehr als 250 Mitarbeiter). Es konnte festgestellt werden, dass die durchschnittlich am Tag mit einem Dienstfahrzeug zurückgelegte Entfernung nur bei kleinen Unternehmen mit einem Wert von 120 km die 100 km-Marke übersteigt. Als Grund wird eine geringe Anzahl an Fahrzeugen im Betrieb angenommen. Bei kleinen bis mittleren Unternehmen liegt dieser Wert hingegen bei 79 km, bei großen Unternehmen bei 90 km. Die jährliche Fahrleistung lag bei mittleren Unternehmen bei ca. 11.500 km, bei

den anderen Unternehmensgrößen lag sie im Schnitt bei etwa 25.000 km. Auch zeigte sich, dass nur etwa 15% der Nutzer überwiegend spontan fuhren. 73% gaben an, ihre Fahrten seien planbare Ereignisse.

Abbildung 2.8 zeigt weiterhin, dass ca. 69% der Fahrzeuge über Nacht für ca. 8 Stunden auf dem Firmengelände stehen. Zusammengefasst lässt sich also nicht nur ein großer Teil der erhobenen betrieblichen Fahrten eines Tages mit der üblichen Reichweite eines BEV zurücklegen (vgl. z.B. [46]), auch bietet eine lange Standzeit auf dem Unternehmensgelände die Möglichkeit, die notwendige Ladung an firmeneigener Ladeinfrastruktur durchzuführen, ohne auf das Vorhandensein öffentlicher Lademöglichkeiten angewiesen zu sein. Acht der 22 befragten Unternehmen gaben sogar an, das an ihrem Unternehmensstandort eine Anlage zur Solarstromerzeugung stünde, welche zur Ladung der Fahrzeuge mitverwendet werden könne.

Ein Themenbereich, welcher jedoch im Kontext der betrieblichen Nutzung auf keinen Fall außer Acht gelassen werden darf, ist der Umgang der Nutzer mit der Technik. Die Umstellung von herkömmlichen Verbrennerfahrzeugen auf EVs erfordert vom Anwender einerseits die Gewöhnung an neue Abläufe (Laden statt Tanken), andererseits wird dieser jedoch auch damit konfrontiert, dass EVs sich von ihren Leistungsparametern gravierend von denen der ICEs unterscheiden. Die erforderliche Planung von Ladezeiten und die geringere Reichweite können den Nutzer derart beeinflusen, dass Ablehnung oder eine übervorsichtige Nutzung die Folge sind.

Empirische Erprobungen zeigen etwa, dass einige Nutzer bereits für Fahrstrecken von 50 km bis 100 km das EV stehen lassen, und auf ein Verbrennerfahrzeug umsteigen [8, S.38]. Die maximale Reichweite eines EVs ist in der Praxis daher nicht nur durch die Technik vorgegeben, sondern wird auch durch die Bereitschaft des Nutzers, den Stressfaktor diese auszureizen in Kauf zu nehmen, determiniert. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass diese Bereitschaft und damit die praktisch zurückgelegten Strecken mit der Verfügbarkeit von einfach zugänglicher, unkompliziert zu bedienender und leistungsstarker Ladeinfrastruktur wachsen [59, S.257f]. Dabei ist zu betonen, dass die Reichweitensteigerung oft eintritt, ohne dass eine deutliche Verlagerung der Ladevorgänge auf die Schnellladem̈oglichkeit erfolgt. Die positiven Auswirkungen beruhen zu einem großen Teil auf der Reduktion der der sogenannten Reichweitenangst[4] [60, S.7].

Weiterhin bedingen nicht nur die technischen Anforderungen, sondern auch die Komfortansprüche der Nutzer die notwendige Anzahl an Ladepunkten, welche vorzuhalten sind. Denn die Forderung, dass der Nutzer seine Arbeit unterbricht, um ein Fahrzeug nach Abschluss eines Ladevorgangs umzuparken, stößt in der Praxis auf Unmut[8, S.62].

[4] In der Literatur oft als „Range Anxiety“ bezeichnet

2.5. Problemstellungen und Lösungsansätze

Das grundlegende Problem des Einsatzes von Elektromobilität im betrieblichen Umfeld besteht in der Tatsache, dass ein E-Fahrzeug nur unter bestimmten Rahmenbedingungen Aussicht auf einen wirtschaftlichen Einsatz hat. In diesem Unterkapitel werden die entscheidenden Faktoren, von welchen die Wirtschaftlichkeit abhängt, zusammengefasst und Ansätze geschildert, um diese Rahmenbedingungen für den Betrieb sicherzustellen. Eine umfangreiche Analyse der Maßnahmen und die empirische Untersuchung ihrer Anwendbarkeit und Wirksamkeit in der Praxis erfolgt anschließend in Kapitel 3.

Die vorangegangenen Kapitel lassen sowohl für den ökonomischen, als auch für den ökologischen Einsatz von EVs klare Voraussetzungen erkennen. Um eine Wirtschaftlichkeit sicherzustellen sind, neben einem niedrigen Einkaufspreis des Fahrzeugs, welcher in dieser Abhandlung als nicht durch den Nutzer beeinflussbar angenommen wird, niedrige Stromkosten, sowie eine hohe Fahrleistung erforderlich.

Der ökologische Betrieb setzt wiederum einen Strombezug aus erneuerbaren Quellen voraus, um eine Einsparung von CO_2-Emissionen und anderen schädlichen Abgasen gegenüber einem ICE zu erzielen. Auch ist eine batterieschonende Betriebsweise anzustreben, da neben den hohen Kosten für einen Batterietausch durch Produktion und Recycling von Batterien hohe CO_2-Emissionen verursacht werden.

Diese klaren Voraussetzungen erfordern unterstützende Maßnahmen. So müssen, um die nötigen hohen Fahrleistungen zu erreichen, die Fahrzeuge optimal ausgelastet und die entsprechende Lade- und Verwaltungsinfrastruktur zur Verfügung gestellt werden. Außerdem muss die Umstellung von den, heute noch ausschließlich aus Verbrennerfahrzeugen bestehenden Fuhrparks, auf gemischte oder rein elektrisch betriebene Fahrzeugflotten entsprechend gemanagt werden, um eine Annahme der Veränderungen im Betrieb sicher zu stellen.

Potentiale, um die Stromkosten zu senken, bietet die Eigenstromerzeugung. Erfolgt diese durch Nutzung erneuerbarer Ressourcen, besteht gleichzeitig die Möglichkeit, einen ökologischen Vorteil gegenüber dem Bezug von regulärem Netzstrom zu erzielen. Beachtet werden muss jedoch, dass die Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien sehr volatil ist. Es muss daher Energiemanagement betrieben werden, um sicher zu stellen, dass die Energie zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung steht. Maßnahmen wie die Zwischenspeicherung von Strom, um die Verfügbarkeit zu gewährleisten und die Steuerung der bezogenen Leistung können hier Anwendung finden.

Zur Stromerzeugung am Betriebsstandort eignet sich besonders die Solarstromerzeugung. Die erforderlichen Solarmodule können mit geringem Aufwand auf Dächern, an Fassaden oder auf Freiflächen positioniert werden und zeichnen sich durch eine sehr gute Skalierbarkeit aus. Die Technik ist bewährt, ausgereift und die Eignung eines Standortes kann einfach anhand bestehender Geo-Informationsdaten festgestellt werden. Alternativen, wie die Windstromerzeugung setzen hier aufwändigere Anlagenkonstruktionen voraus, sowie langfristige Messungen am zukünftigen Anlagenstandort, um dessen Eignung zu prüfen.

Um die notwendige, hohe Fahrleistung für die Erreichung eines wirtschaftlichen Betriebs zu erzielen, muss eine optimale Auslastung der Fahrzeuge ermöglicht werden. Der Einsatz einer computergestützten Fahrzeugverwaltung, welche die Disposition der verfügbaren Ressourcen übernimmt, die Umsetzung überwacht und Pläne ggf. anpasst, unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen von EVs, ist anzustreben.

Zudem wird, um die nötige Auslastung zu erzielen, eine leistungsfähige Ladeinfrastruktur vorausgesetzt.

Einen weiteren Beitrag zur Erreichung der nötigen Fahrleistung könnte ein Vermieten der betriebseigenen EVs in Zeiten, in denen sie zur betrieblichen Nutzung nicht benötigt werden, leisten. Im Idealfall könnten durch diese Maßnahme zwei ICE durch ein EV ersetzt werden, das Firmenfahrzeug, sowie das Fahrzeug desjenigen, welcher die Möglichkeit hat, es außerhalb der Betriebszeiten zu leasen. Am geeignetsten erscheint hierfür das Modell des Rent-Sharing, bei dem Arbeitgeber und Mitarbeiter sich ein Fahrzeug teilen. Der Arbeitnehmer unterhält einen Mietvertrag über das Fahrzeug und bezahlt dafür eine oonatliche Gebühr. Das Fahrzeug steht ihm außerhalb der Geschäftszeiten zur Verfügung [61]. Es bietet den Vorteil, dass die Mieter einem bekannten, engen Personenkreis entstammen und meist nur außerhalb der Geschäftszeiten privat ein Fahrzeug benötigen. Außerdem muss keinen unternehmensfremden Personen Zutritt zum Betriebsgelände, auf dem die Fahrzeuge stehen, ermöglicht werden.

Für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Maßnahmen im Unternehmen darf auch das innerbetriebliche Change-Management nicht außer Acht gelassen werden. Es müssen Maßnahmen getroffen werden, um zu verhindern, das der Umstieg von Verbrennerfahrzeugen auf EVs zu Widerständen oder Ablehnungsreaktionen führt. Mögliche Maßnahmen umfassen Schulungen, Möglichkeiten zur Probenutzung der Fahrzeuge oder Einbeziehungsmaßnahmen in welchen die Mitarbeiter den Änderungsprozess mitgestalten können.

2.6. Versuchsaufbau und Ziele

Den Kern dieser Abhandlung bilden die Umsetzung und Untersuchung der aufgeführten Maßnahmen zur Steigerung der Ökonomie und der Ökologie des EV-Einsatzes in einer betrieblichen Fahrzeugflotte. Ziel ist die Erfassung der möglichen quantitativen, sowie der qualitativen Auswirkungen der Maßnahmen, auch mit Augenmerk auf ihre Praxistauglichkeit für den Betriebseinsatz. Diese Erhebung erfolgt im Rahmen des Forschungsprojekts eAutarke Zukunft, einem Unterprojekt des Schaufensters Elektromobilität Niedersachsen.[5] Als Versuchsumgebung dient die Fahrzeugflotte des ADAC Niedersachsen/Sachsen-Anhalt e.V.

Sie umfasste zu Projektbeginn sechs Fahrzeuge, welche von den 93 Angestellten über einen Netzwerk-Kalender gebucht und etwa zu Fahrten zu Terminen oder zwischen Geschäftsstellen eingesetzt werden konnten. Unter den sechs Fahrzeugen befinden sich drei Opel Insignia, ein VW T5, ein Opel Ampera REEV sowie ein elektrisch angetriebener Smart ED. Zudem ist die Geschäftsstelle in Laatzen mit einer 78 Kilowatt Peak (kWp) PV-Anlage, an der Fassade und auf dem Dach ausgestattet, welche seit 1999 zur Stromerzeugung genutzt wird.

In diesem Umfeld wurden im Projektzeitraum (Okt. 2014 bis Jun. 2016) die folgenden Untersuchungen durchgeführt. Im Rahmen des Projekts erfolgte eine Erweiterung des Fuhrparks um drei Elektrofahrzeuge vom Typ eGolf. Diese konnten gemeinsam mit den anderen Fahrzeugen des Fuhrparks von allen ADAC-Mitarbeitern für dienstliche Fahrten gebucht werden. Der so ausgestaltete Fuhrpark ermöglicht die grundlegende Erfassung des betrieblichen Mobilitätsbedürfnisses mit seinen Fluktuationen. Um die Möglichkeit einer Auslastungssteigerung der Fahrzeuge durch ein Carsharing-Konzept außerhalb der Geschäftszeiten zu prüfen, wurden zwei Fahrzeuge des Typs eGolf und ein Fahrzeug des Typs Smart ED nach Feierabend und an den Wochenenden jeweils einem Mitarbeiter für einen Monat zur Nutzung zur Verfügung gestellt.

Ergänzend wurde eine Lade- und Energiemanagementinfrastruktur auf dem Unternehmensgelände errichtet. Diese bestand aus einem Carport mit einer 7,5 kWp PV-Anlage, einem Batteriespeicher, einem Energie-Management-System, Netzanschluss, Messgeräten zum Erfassen der Energieströme, sowie einem DC- und fünf AC-Ladepunkten. Zum Erfassen und Managen von Fahrzeugbelegung und Ladeständen wurde weiterhin ein elektronisches Buchungsportal implementiert.

Neben diesen technischen Maßnahmen wurden auch über Mitarbeiterbefragungen und Fahrtberichte die Einstellungen und Erfahrungen der Nutzer erfasst und ausgewertet.

Ziel dieser Untersuchungen ist die Klärung der übergeordneten Fragestellung, ob im betrachteten Betriebsfuhrpark Einsatzpotential für EVs besteht. Ist dies der Fall, ist weiterhin zu ermitteln, ob durch ihren Einsatz ein wirtschaftlicher und/oder ökonomischer Vorteil gegenüber der Nutzung von Verbrenner-Fahrzeugen erzielt werden kann. Auch ist

[5] Förderkennzeichen:16SNI001G

zu klären, welche Infrastruktur für diese Fahrzeuge vorgehalten werden muss und welche Hemmnisse bei ihrer Integration in den Unternehmensfuhrpark auftreten können.

In einem weiteren Schritt wird erstmals empirisch die Possibilität der dualen Fahrzeugnutzung in einem neuartigen Carsharingmodell hin auf sein Einsatzpotential, seine Vereinbarkeit mit der betrieblichen Fahrzeugnutzung und die Auswirkung dieses Modells auf die Wirtschaftlichkeit des Flottenbetriebes, wie auch auf das Potential der Emissionsreduktion geprüft. Neben den technischen Ansprüchen des Modells werden in diesem Zusammenhang auch organisatorische Voraussetzungen für seinen Betrieb diskutiert.

Zuletzt wird auf die Fragestellung eingegangen, ob die Nutzung der EVs vereinbar ist mit einer Deckung ihres Strombedarfs aus lokal regenerativ erzeugter Energie. Neben der Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage und ihrer optimalen Dimensionierung, welche über eine Investitionsrechnung ermittelt werden, soll weiterhin das Potential der Emissionsreduktion durch ihre Nutzung in einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse der Anlage festgestellt werden. Weiterhin wird auf die Potentiale der Nutzung von Speichersystemen oder intelligenten Steuerungen eingegangen.

Die Beständigkeit der erzielten Ergebnisse wird anschließend durch Sensitivitätsanalysen geprüft. Es wird weiterhin auf aktuelle, sowie absehbare zukünftige Entwicklungen eingegangen, welche einen Einfluss auf das erprobte Konzept und seine zukünftige Nutzung haben könnten. Diese Analyse mündet in einer abschließenden Darstellung der zukünftigen Anwendung des Modells.

3. Empirische Untersuchung der Einsatzpotentiale von E-Fahrzeugen im Betriebseinsatz

3.1. Technische und organisatorische Eignung der Fahrzeuge

3.1.1. Der betriebliche Mobilitätsbedarf

In diesem Abschnitt wird analysiert, welchen Mobilitätsbedarf das Beispielunternehmen für dienstliche Zwecke aufweist und es werden verschiedene Möglichkeiten seiner Deckung betrachtet. Grundlage bildet eine statistische Auswertung vergangener Fahrten. Dies geschieht unter der Annahme, dass die Betrachtung der für das Unternehmen durchgeführten Dienstfahrten über einen ausreichend großen Zeitraum einen repräsentativen Überblick über den Transportmittelbedarf ermöglicht. Aufgezeichnet wurde die Fahrzeugnutzung des ADAC über einen Zeitraum von einem Jahr durch das in Abschnitt 3.1.4 erläuterte Buchungsportal, in welchem die Buchungszeiten, zurückgelegte Strecken, sowie Metadaten wie der Buchungszeitpunkt, das genutzte Fahrzeug, die buchende Person und der Nutzungskontext erfasst wurden. Die über das Buchungsportal erfassten Angaben wurden in Stichproben etwa mit den parallel geführten Fahrtenbüchern abgeglichen, um eine Validität der Ergebnisse sicherzustellen. Die Erhebung fand zeitgleich zur Erprobung der EVs statt, da vorher keine adäquate Möglichkeit der Fahrtdatenerfassung bestand. Durch diese Erweiterung des Fuhrparks um drei Fahrzeuge ist davon auszugehen, dass die Nutzungsintensität je Fahrzeug geringer ist, als sie sonst im Fuhrpark vorgelegen hätte. Daneben hatte auch die parallele Erprobung des Tandem-Modells (vgl. Abschnitt 3.3, Fahrzeugnutzung in diesem Kontext wird getrennt analysiert) einen Einfluss auf die Fahrzeugverfügbarkeit und Fahrzeugnutzung. Diesem Umstand wird mit einer Analyse des tatsächlichen Fahrzeugbedarfs Rechnung getragen.

Weiterhin wird die erhobene Fuhrparknutzung mit Referenzwerten anderer Unternehmen verglichen, um ihre Repräsentativität einzuordnen. Als Vergleichswerte dienen, im Rahmen des Schaufensterprojekts „Neue Mobilität im ländlichen Raum: Angewandte Elektromobilität - Technologiekonzepte - Mobilitätseffekte“ in der Modellregion Bremen/ Oldenburg im Zeitraum von Oktober 2011 bis März 2014, unter 22 Unternehmen verschiedener Größe erhobene Nutzungsdaten von Unternehmensfuhrparks [58, S.241f].

3.1.1.1. Empirisch erhobene Daten

Der Erhebungszeitraum erstreckte sich vom 10.08.2015 bis zum 09.08.2016. In ihm wurden 830 Dienstfahrten absolviert. Durchgeführt wurden diese hauptsächlich mit neun Fahrzeugen (vgl. Abschnitt 2.6, sowie Abbildung 3.1). Ein weiteres, zehntes Fahrzeug (Golf Plus) stand in diesem Zeitraum noch übergangsweise für einige Wochen zur Verfügung. Auf dieses entfielen lediglich 20 Fahrten. Der Fuhrpark wurde im Erhebungszeitraum von 62 unterschiedlichen Mitarbeitern dienstlich genutzt. Sie legten mit den Fahrzeugen des Fuhrparks 154.228 km zurück, im Durchschnitt 185,82 km je Fahrt. 50% der Fahrten lagen jedoch unter 100 km (vgl. Abbildung 3.2).

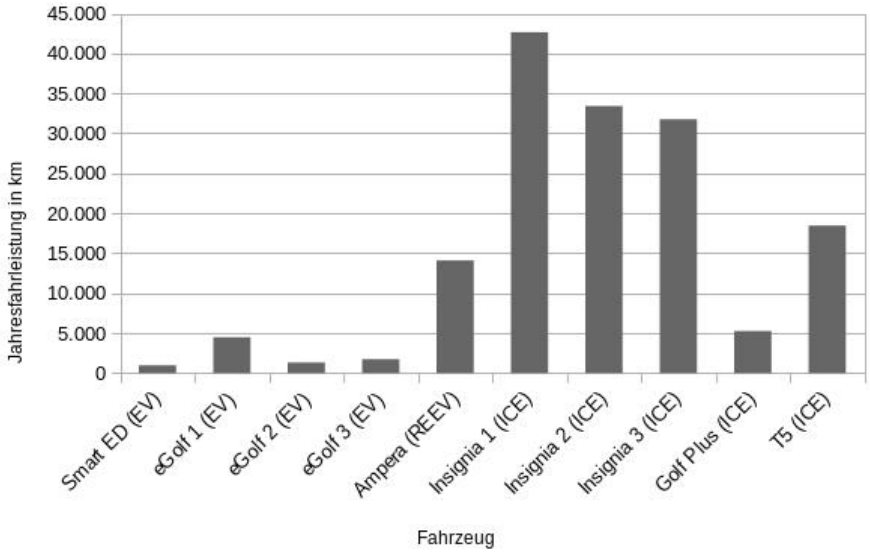


Abbildung 3.1.: Verteilung der dienstlichen Fahrleistung des Fuhrparks

Diese Streckenleistungen sind überdurchschnittlich hoch. PKW gewerblicher Halter weisen im Schnitt nur bei 6% der Fahrten eine Fahrleistung von mehr als 100 km auf [62, S.392]. Fahrziele waren etwa andere Geschäftsstellen z.B. in Hannover in 13 km, oder in Magdeburg in 160 km Entfernung.[6] Die verzeichneten Höchstfahrleistungen von 1.000 km und mehr sind auf Fahrten zur ADAC-Zentrale in München zurückzuführen.

Die kumulierte Buchungszeit aller Dienstfahrten betrug 22.637,75 Stunden. Im Schnitt lag die Zeitdauer einer Buchung bei 27,27 Stunden. Ebenso wie die Strecke liegt dieser Wert über den Kennwerten anderer betrieblicher Fahrzeugflotten (vgl. z.B. [58]).

Während 50% der Buchungen kürzer als 10,5 h waren, sich also nur über einen Tag erstreckten, etwa Fahrten zu anderen Geschäftsstellen, trieben andere Langzeitbuchungen diesen Schnitt in die Höhe. Diese entfielen oft auf die Nutzung der Fahrzeuge für mehrtägige Veranstaltungen, wie z.B. Motorsport-Events, welche sich über ein Wochenende erstreckten, oder auch mehrtägige Messeauftritte.

[6] Quelle: Openstreetmap.org

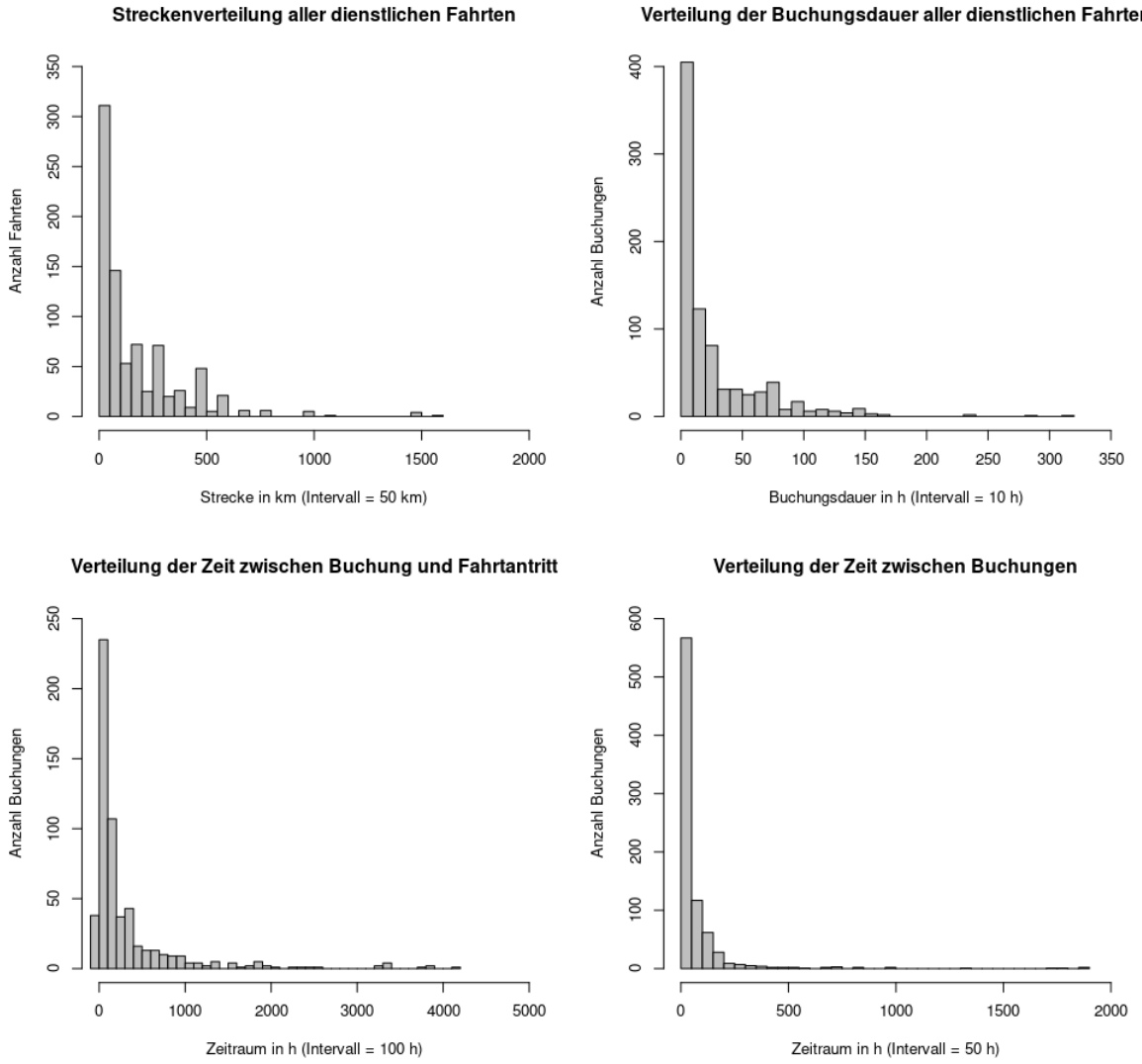


Abbildung 3.2.: Statistische Auswertung der Dienstfahrten, n = 830

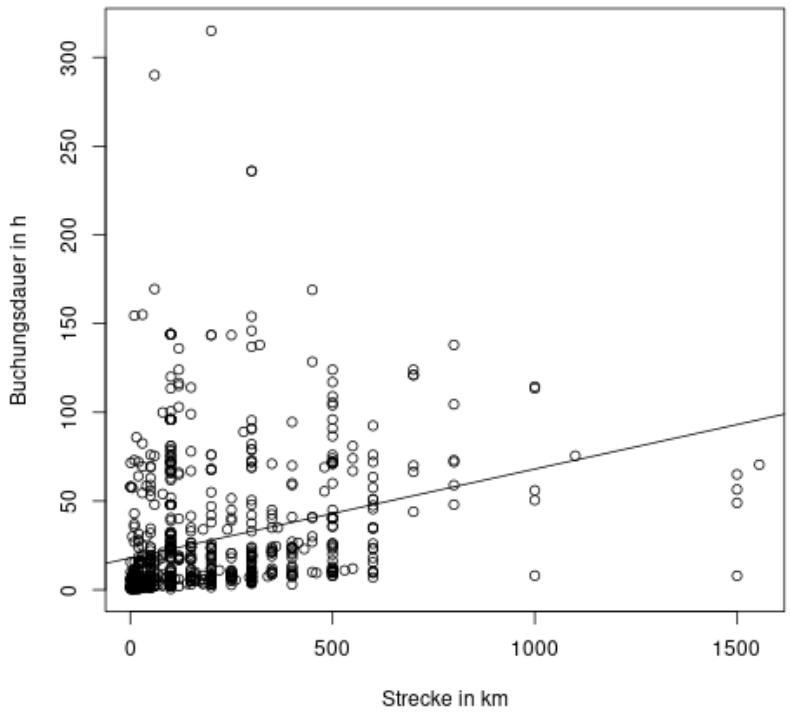


Abbildung 3.3.: Abhängigkeit zwischen zurückgelegter Strecke und Buchungsdauer

Die Fahrzeuge standen also während ihrer Abwesenheit vom Betriebsgelände viel, konnten in dieser Zeit jedoch nicht durch andere Nutzer in Anspruch genommen werden. Hierzu stellt Abbildung 3.3 die Abhängigkeit von zurückgelegter Strecke und Buchungsdauer dar.

Abbildung 3.4 zeigt die Verteilung von Fahrtantritt und Fahrtende der Dienstfahrten über den Tag hinweg. Anzumerken ist, dass einige Nutzer Fahrzeuge bereits um 0:00 Uhr buchten, wenn sie zum Buchungszeitpunkt ihren Fahrtbeginn noch nicht genau absehen konnten. Damit wollten sie sicher gehen, dass niemand das Fahrzeug für einen überschneidenen Zeitraum bucht. Gleiches gilt für das Buchungsende. Dieses Verhalten betraf ca. 8% aller Buchungen und verzerrt somit leicht die Analyseergebnisse in Richtung längerer Buchungszeiträume.

Die Zeit zwischen Buchung und Fahrtantritt betrug durchschnittlich 317,35 Stunden (13,22 Tage). Nur in 25% aller Fälle lag sie unter 9,3 Stunden. Buchungen waren also selten spontan, sondern meist lange im Voraus geplant. Dies deckt sich mit den Umfrageergebnissen in vergleichbaren Unternehmen, in welchen 73% der Befragten angaben, ihre Dienstfahrten seien überwiegend planbar, während nur 15% angaben, überwiegend spontane Fahrten zu absolvieren [58, S.242].

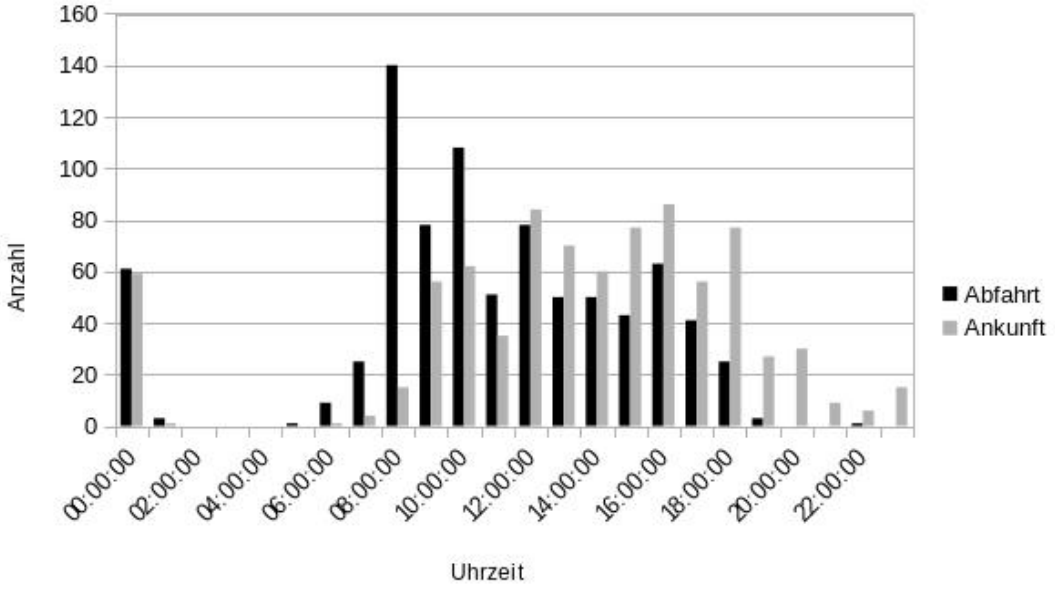


Abbildung 3.4.: Verteilung von Fahrtantritt und -ende aller 830 Dienstfahrten; Buchungen um 0:00 weisen einen unbekannten Start- oder Endzeitpunkt auf

Die Zeit zwischen zwei Fahrten auf demselben Fahrzeug lag im Durchschnitt bei 67,3 Stunden. Dieser Wert wurde durch das Vorhandensein selten genutzter Fahrzeuge in die Höhe getrieben. Der Median lag bei 19,5 Stunden. Nur bei 25% der Fahrten betrug der Zeitraum weniger als 4 Stunden.

3.1.1.2. Ableitung des Fahrzeugbedarfs

Die erhobenen Fuhrparkkennwerte geben einen umfangreichen Einblick in die Nutzung betrieblicher Fahrzeuge. Jedoch verzerren die Bedingungen, unter denen die Daten gewonnen wurden, die Ergebnisse. Dadurch, dass der Fuhrpark seine erfasste Ausgestaltung nicht durch einen bedarfsgesteuerten Ausbau erreicht hat, sondern durch die testweise Einführung zusätzlicher (Elektro-) Fahrzeuge einen unnatürlich hohen Fahrzeugbestand aufwies, eignet er sich nur bedingt als Referenz.

Um einen Musterfuhrpark als Vergleich für spätere, alternative Ausgestaltungsansätze der Fuhrparkplanung zu haben, wird nun ein hypothetischer Fuhrpark mit einer bedarfsgerechten Fahrzeuganzahl aufgestellt, dessen Kennzahlen als Vergleichswert für weitere Untersuchungen dienen.

Der tatsächliche Fahrzeugbedarf für die erfasste Fahrleistung wird heuristisch bestimmt. Für den Musterfuhrpark wird dabei zunächst nur die Nutzung von Verbrennerfahrzeugen unterstellt. Reichweitenrestriktionen und Tankzeiten können daher unberücksichtigt bleiben. Tankzeiten fallen nicht ins Gewicht und waren in den meisten der aufgeführten Buchungen schon enthalten. Ebenso ist sichergestellt, dass keine nicht erzielbare Reichweite vorliegt, da die erfassten Fahrten mit ICEs absolviert werden konnten.

Für den betrachteten Zeitraum wurde eine Liste aller Dienstfahrten erstellt. Für jede Fahrt wurde geprüft, ob sich diese mit der ihr vorangegangenen Fahrt überschneidet. Lag eine Überschneidung vor, wurde der geprüfte Datensatz auf eine zweite Liste verschoben. Auf der ersten Liste verbleiben nach Prüfung aller Fahrten diejenigen, die von einem einzigen Fahrzeug absolviert werden könnten. Das Ergebnis wurde als angenommene Jahresfahrleistung des ersten Fahrzeuges des theoretischen Fuhrparks festgehalten. Die Liste der nicht absolvierbaren Fahrten durchlief im Anschluss die Überschneidungsprüfung erneut. Das Ergebnis war die Fahrleistung des zweiten Fahrzeugs. Diese Prozedur wurde so lange wiederholt, bis alle Fahrten überschneidungsfrei auf Fahrzeuge verteilt waren. Das Ergebnis ist in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Anzumerken ist, dass dieses Vorgehen nur eine einfache Heuristik darstellt, welche keinesfalls eine optimale Fahrzeugauslastung und mit großer Wahrscheinlichkeit auch nicht die optimale Fahrzeuganzahl ermittelt. Es wird an dieser Stelle bewusst davon abgesehen, in einer komplexen Berechnung die optimale Fahrtverteilung (etwa durch Berechnung sämtlicher möglicher Kombinationen) zu ermitteln. Hintergrund ist, dass im Realbetrieb auch kaum eine Auslastungsoptimierung vorgenommen wird, sondern Fahrten durch den Nutzer einem Fahrzeug manuell zugewiesen werden. Weiterhin würde ein angenommener optimaler Auslastungsplan zwar für den Erfassungszeitraum die optimale Lösung bieten, jedoch ist nicht sichergestellt, dass dieser optimale Fuhrpark einer anderen Fahrzeitverteilung gerecht werden könnte (Problematik des Overfitting).

Tabelle 3.1.: Theoretischer Bedarf an Verbrennerfahrzeugen

Fahrzeug	**Fahrten**	%	**Strecke in km**	%	**Zeit in h**	%
1	198	23,86	35.526	23,03	6.445,68	28,47
2	191	23,01	39.564	25,65	5.434,55	24,01
3	153	18,43	28.934	18,76	4.498,02	19,87
4	119	14,34	22.944	14,88	3.004,87	13,27
5	92	11,08	16.887	10,95	1.798,97	7,95
6	52	6,27	6.558	4,25	941,17	4,16
7	15	1,81	2.097	1,36	367,00	1,62
8	10	1,20	1.718	1,11	147,50	0,65

Statt mit den im Fuhrpark vorgehaltenen neun Fahrzeugen (sowie einem zehnten, welches für einen kurzen Zeitraum verfügbar war), hätte das erfasste Fahrpensum mit acht Fahrzeugen bewältigt werden können. Dies deckt sich mit der Erkenntnis der hohen Stillstandszeiten der Fahrzeuge im Erfassungszeitraum. Auffällig ist, dass die Fahrzeuge 6 - 8 zusammen in der Summe nur 6,72% der Gesamtstrecke zurücklegen. Es ist zu überlegen, ob diese Fahrzeuge in einem tatsächlichen Fuhrpark betrieben werden sollten.

Im Schnitt hätte dieser Fuhrpark eine Fahrleistung von 19.278,5 km je Jahr und Fahrzeug. Damit liegt er weit über den durchschnittlichen 11.500 km je Jahr und Fahrzeug, welche in Unternehmen vergleichbarer Größe anfallen [58, S.242], jedoch unter den Spitzenfahrleistungen der Opel Insignia des ADAC-Fahrzeugpools, welche Jahresfahrleistungen von im Schnitt ca. 36.000 km aufwiesen.

3.1.1.3. Betrachtung unter wirtschaftlichen Aspekten

Nachdem die Bedarfsermittlung abgeschlossen ist, wird nun kalkuliert, welche Kosten der optimierte Fuhrpark im Betrieb aufweisen würde. Ermittelt werden diese, indem für die einzelnen Fahrzeuge eine Total Cost of Ownership (TCO)-Analyse [63, S.57] durchgeführt wird. Diese betrachtet neben den Kosten der Beschaffung auch die über den Nutzungszeitraum hinweg anfallenden Kosten für den Unterhalt und später die Entsorgung eines Gutes. Nur so ergibt sich ein umfassendes Bild der Kostensituation, welches mit den Kosten alternativer Mobilitätskonzepte verglichen werden kann.

Für die Ermittlung der Kosten wird unterstellt, dass die Fahrten des aufgestellten Fuhrparks mit einem Musterfahrzeug der mittleren PKW-Klasse absolviert werden.

Im Jahr 2015 stellte VW mit 9,5 Mio. insgesamt 21,4% der 44,4 Mio. PKW auf deutschen Straßen her. VW ist damit der mit Abstand größte Hersteller, gefolgt von Opel, welcher mit nur 4,78 Mio. Fahrzeugen vertreten ist. Unterteilt nach Antriebsart sind in Deutschland insgesamt 29,84 Mio Benzin- und 13,86 Mio Diesel-Fahrzeuge zugelassen. 5,72 Mio. Benzin- und 3,75 Mio. Diesel-Fahrzeuge wurden von VW gefertigt [21, S.18].

Als Musterfahrzeug soll daher an dieser Stelle der bereits in Kapitel 2.2 erwähnte VW Golf TSI als Sinnbild für den mittelgroßen PKW dienen. Der VW Golf wird auch in der Literatur oft als Referenzfahrzeug dieser Klasse herangezogen (vgl. etwa [25], [64]) und verfügt somit über sehr gut dokumentierte Charakteristika.

Tabelle 3.2.: Fuhrparkkosten in EUR

Fahrzeug	**Fixkosten**	**Fahrtkosten**	**Gesamt**	**je km**	**∅ km**
1	5.365,67	2.525,90	7.891,57	0,22214	0,22214
2	5.365,67	2.813,00	8.178,67	0,20672	0,21443
3	5.365,67	2.057,21	7.422,88	0,25655	0,22847
4	5.365,67	1.631,32	6.996,99	0,30496	0,24759
5	5.365,67	1.200,67	6.566,34	0,38884	0,27584
6	5.365,67	466,27	5.831,94	0,88929	0,37808
7	5.365,67	149,10	5.514,77	2,62984	0,69976
8	5.365,67	122,15	5.487,82	3,19431	1,01158
Summe			**53.890,97**		

Es wird für die Kostenbetrachtung angenommen, dass der Anschaffungspreis 23.050 EUR beträgt [47] und die Abschreibungsdauer bei 6 Jahren liegt [65]. Somit liegt die jährliche

lineare Abschreibungssumme bei 3.841,67 EUR. Der Kraftstoffverbrauch beträgt 5,1 l auf 100 km [47], bei einem Kraftstoffpreis von 1,39 EUR/l [48]. Als weitere Kosten fallen durchschnittlich 55 EUR je Monat an Werkstatt- und Reifenkosten an, sowie 28 EUR je Jahr an KFZ-Steuer [47]. Dazu kommen 836 EUR je Jahr an Versicherungskosten [5, S.33].

Angenommen werden daher Fixkosten in Höhe der Abschreibung, sowie Werkstatt-, Steuer- und Versicherungskosten von 5.365,67 EUR je Jahr und Fahrzeug. Als variable Kosten wird der Benzinverbrauch in Höhe von 0,0711 EUR je km veranschlagt.

Diese Gesamtkostensituation wird in Tabelle 3.2 dargestellt. In der letzten Spalte werden die durchschnittlichen Kosten je km, welche die Fahrzeuge aufweisen, auf den Fuhrparksdurchschnitt umgerechnet, da in der Realität eine gleichmäßigere Verteilung der Fahrten auf die jeweilige Fahrzeuganzahl anzunehmen ist, als sie die heuristische Verteilung der Fahrten auf die Fahrzeuge zum Ergebnis hat. Dieser Wert wird für jede Fahrzeuganzahl von 1 bis 8 berechnet.

Mit Erhöhung der Fahrzeugzahl sinkt die Auslastung der Fahrzeuge. Durch die fixen Kosten je Fahrzeug steigen damit die Kosten des Fuhrparks. Offensichtlich wird dies in der Berechnung des durchschnittlichen Kilometerpreises in Tabelle 3.2. Um zu verhindern, dass ein schlecht ausgelasteter Fuhrpark mit unverhältnismäßig hohen Kosten entsteht, wird dieser optimiert, indem wenig ausgelastete Fahrzeuge entfernt und die, auf sie entfallenen Fahrten durch Fremdbezug von Mobilitätsleistungen gedeckt werden. Dies können etwa Mietfahrzeuge bzw. Carsharing-Fahrzeuge sein, private Mitarbeiterfahrzeuge, die eingesetzt werden, wenn kein Dienstfahrzeug zur Verfügung steht, oder auch Taxidienste.

Tabelle 3.3.: Optimierter Fuhrpark, Kosten in EUR

Fahrzeug	**Fixkosten**	**Fahrtkosten**	**Gesamt**
1	5.365,67	2.525,90	7.892,57
2	5.365,67	2.813,00	8.178,67
3	5.365,67	2.057,21	7.424,88
4	5.365,67	1.631,32	6.999,99
5	5.365,67	1.200,67	6.570,34
Fremd		3.111,90	3.111,90
Summe			**40.178,34**

Für diese Optimierung wird angenommen, dass Mobilität im benötigten Maße für 0,30 EUR je km bezogen werden kann. Dies entspricht z.B. dem Standardvergütungssatz, mit welchem Unternehmen ihren Mitarbeitern die Dienstnutzung ihres Privatfahrzeugs vergüten können, ohne dass ein geldwerter Vorteil entsteht [66, §5 Abs.2].

Unter dieser Annahme werden die Fahrzeuge 6 - 8 aus dem Fuhrpark entfernt, da sie anteilig kaum Fahrten übernehmen und ihr Betrieb die durchschnittlichen Kilometerkosten des Fuhrparks auf über 0,30 EUR je km steigern würde. Ein Fremdbezug von Mobilität für die

auf sie entfallenden Fahrten ist kostengünstiger. Tabelle 3.3 zeigt den kostenoptimierten Fuhrpark.

Ergebnis dieser Optimierungsschritte ist ein Fuhrpark mit fünf Fahrzeugen, sowie einem geringen Fremdbezug von Mobilitätsleistungen, der den Mobilitätsbedarf des ADAC decken kann. Dieser optimale Fuhrpark würde jährliche Kosten in Höhe von 40.178,34 EUR verursachen.

3.1.1.4. Ökologische Auswirkungen

Für den so aufgestellten Fuhrpark sollen nun die durch seinen Betrieb entstehenden Umweltauswirkungen beziffert werden. Der Fokus liegt hierbei vor allem auf den bereits in den Kapiteln 2.1.2 und 2.3 thematisierten klimaschädlichen Gasen, welche bei der Produktion von Fahrzeugen und Betriebsstoffen und im Fahrzeugbetrieb anfallen.

Um die Klimaauswirkungen des Fahrzeugbetriebs zu quantifizieren, werden die über den Fahrzeuglebenszyklus hinweg emittierten, klimaschädlichen Gase erfasst. Um eine Vergleichbarkeit zu schaffen, werden die Gase aufsummiert als CO_2-Äquivalente, kurz CO_2e, angegeben. Die Auswirkungen von Methan (CH_4) entsprechen dabei dem Verstärkungsfaktor 27,75 der Auswirkungen von CO_2. Im Fall von Stickstoffmonoxyd (N_2O) liegt dieser Faktor sogar bei 298 [64, S.8f].

Bei der Rohstoffgewinnung und Herstellung der Fahrzeuge entstehen je Fahrzeug ca. 6 t CO_2e. Angenommen wird, dass für die Fertigung der durchschnittliche deutsche Strommix verwendet wird [64, S.16f]. Weiterhin wird der sogenannte Cut-Off-Ansatz verwendet. Recyclingfähige Sekundärmaterialien werden dem System ohne die Umweltlasten der Förderung zugeführt, verwertbare Materialien verlassen das System dafür ohne Gutschrift [64, S.13]. Für die folgenden Berechnungen wird angenommen, dass die Fahrzeuge 11,9 Jahre lang betrieben werden. Dies entspricht der durchschnittlichen Nutzungsdauer eines Kraftfahrzeugs in Deutschland [4, S.49f].

Ein konventioneller TSI Golf verursacht Emissionen von 24 g CO_2e/km durch die Kraftstoffbereitstellung und weitere 108 g CO_2e/km entstehen im eigentlichen Betrieb, insgesamt somit 132 g CO_2e/km [25, S.232].

Für die Berechnung der auf ein Jahr entfallenden Emissionen für ein Fahrzeug dient Formel 3.1.

$$Em./a = \frac{Em.Herstellung}{Nutzungsjahre} + Fahrleistung/a * Em.Betrieb/km \tag{3.1}$$

Für den Fremdbezug von Mobilität werden ebenfalls 132 g CO_2e/km unterstellt. Hinzu kommt der auf ein Jahr umgelegte Fertigungsaufwand, welcher jedoch nur anteilig auf den Fuhrpark umgelegt wird. Wird diesem hypothetischen Fremdfahrzeug dieselbe Jahresfahrleistung wie den Fuhrparkfahrzeugen (28.771 km) unterstellt, entfallen nur ca. 1/3

der durch dieses Fahrzeug verursachten, auf ein Jahr umgelegten, Herstellungs-Emissionen auf seine Nutzung im Fuhrpark.

Fuhrparkfahrzeuge:

$$5 * \frac{6.000}{11,9} + 143.855 * 0,132 = 21.509,87 \tag{3.2}$$

Fremdbezug:

$$1/3 * \frac{6.000}{11,9} + 10.373 * 0,132 = 1.537,30 \tag{3.3}$$

Die jährlichen Emissionen von fünf Fahrzeugen, mit einer Fahrleistung von 143.855 km und dem Fremdbezug von Mobilität in einem vergleichbaren Fahrzeug in Höhe von 10.373 km, belaufen sich auf (siehe Formeln 3.2 und 3.3) 23.047,17 kg CO_2e.

3.1.2. Leistungsfähigkeit der E-Fahrzeuge

Um die Tauglichkeit von Elektrofahrzeugen für den Betriebseinsatz festzustellen, wurde die bestehende Fahrzeugflotte des ADAC im Rahmen des betrachteten Projekts um drei Fahrzeuge mit rein batterieelektrischem Antrieb erweitert. Die Wahl fiel auf das Modell VW eGolf. Der fünfsitzige eGolf verfügt über eine Batteriekapazität von 24,2 kWh, welche laut Hersteller eine Reichweite von 196 km ermöglichen soll. Er lässt sich mit Wechselstrom über den Typ 2 Stecker-Standard mit max. 3,6 kW, oder über CCS mit Gleichstrom, max. 50 kW, laden [46].

Der Grund für die Auswahl waren seine durchschnittlichen Leistungswerte und seine Ansiedlung im, am häufigsten auf deutschen Straßen vertretenen, PKW-Segment (vgl. Abschnitt 3.1.1.3), welche ihn zu einem geeigneten Referenzfahrzeug machen. Neben der Möglichkeit einer Gleichstrom-Schnellladung wurde das verwandte Conversion Design (vgl. Kapitel 2.1.3) als Vorteil angesehen, da dieses dem unkundigen EV-Nutzer ein bekanntes Fahrzeugdesign und Handling bietet. Hierdurch sollten ein geringer Schulungsbedarf, sowie die Reduktion von „Berührungsängsten“ erreicht werden.

Die Fahrzeuge wurden im April 2015 in Betrieb genommen. Zuerst waren sie für interne Tests, Einführungsveranstaltungen für die Mitarbeiter und projektbegleitende Öffentlichkeitsarbeit (z.B. 7-Städte-Tour, WAVE-Trophy) reserviert. Ab August 2015 standen sie offiziell allen Mitarbeitern im Fahrzeugpool zur Verfügung.

Eine Analyse der Fahrtberichte, welche insbesondere von den Tandemnutzern (vgl. Abschnitt 3.3) angefertigt wurden, ermöglichte Rückschlüsse auf die tatsächlichen Leistungsparameter der Fahrzeuge.

Angegeben ist die Fahrzeugreichweite mit 196 km. In der Praxis ist mit einem Verbrauch von 100% der in der Batterie enthaltenen Energie bei 137,48 km zurückgelegter Strecke zu rechnen. Höhere Reichweiten ließen sich durch eine ökonomische Fahrweise durchaus erreichen (siehe Abbildung 3.5).
Die größten negativen Einflüsse auf die Reichweite hatten (nach Einfluss sortiert) Autobahnfahrten, eine zügige Fahrweise, sowie niedrige Temperaturen.

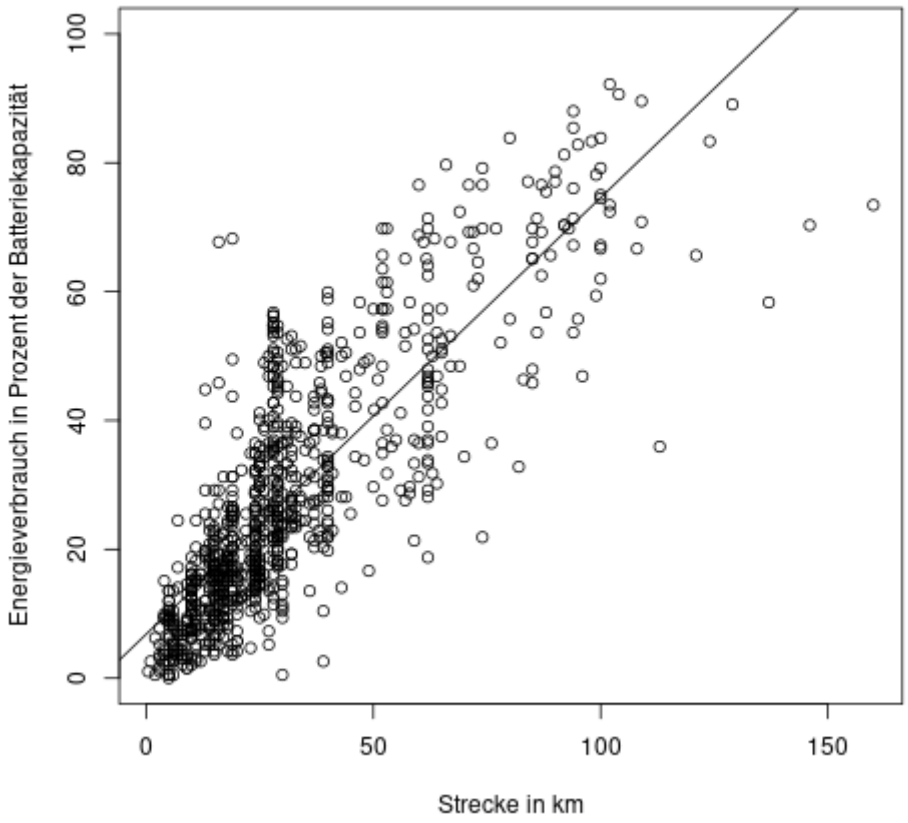


Abbildung 3.5.: Verbrauch des Batterieinhalts nach zurückgelegter Strecke

Um das Potential der E-Fahrzeuge im Diensteinsatz aufzuzeigen, werden in der folgenden Analyse die, in der Empirie gewonnenen, Leistungsdaten der E-Fahrzeuge mit den Eckdaten sämtlicher Fahrzeugbuchungen abgeglichen und das Substitutionspotential ermittelt.

Von den 830 Dienstfahrten erstreckten sich 476 (57,35% der Fahrten) über eine Strecke von maximal 140 km. Weitere 133 Fahrten (insgesamt 609 Fahrten, 73,37%) erstreckten sich über nicht mehr als 280 km. Sie wären somit mit einer Ladung am Fahrziel (*sog. Destination Charging*) zu bewältigen gewesen. In Kilometern bemessen, beträgt dieses Substitutionspotential für Fahrten innerhalb der einfachen EV-Reichweite 24.449 km, 15,85% der Gesamtfahrleistung des Fuhrparks. Die aufsummierte Buchungszeit dieser Fahrten beträgt 10.181,23 Stunden, 44,97% der Gesamtzeit aller Buchungen.

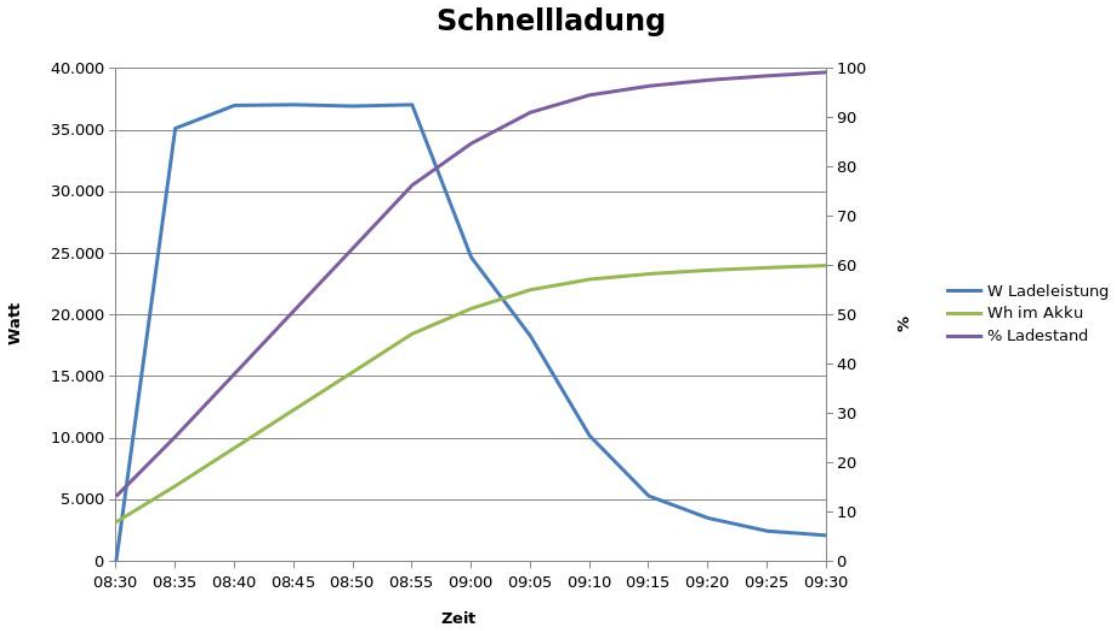


Abbildung 3.6.: Ladungsverlauf eines VW eGolf an einer 50 kW Schnellladesäule

Für Fahrten in der doppelten EV-Reichweite liegt dieser Wert bei 50.349 km, 32,65% der Gesamtfahrleistung des Fuhrparks. Die Buchungszeit würde auf 13.382,68 Stunden, 59,12% der Gesamtzeit steigen.

Im Durchschnitt lagen zwischen zwei Dienstfahrten mit einem Fahrzeug 67,3 Stunden (Median = 19,5 Std). Dieser hohe Wert ist zum einen dem Umstand geschuldet, dass an Wochenenden und nachts nur selten Dienstfahrten stattfanden, zum anderen trieb die Erweiterung des Fuhrparks um drei zusätzliche Fahrzeuge, ohne Änderung der Bedarfssituation, diesen Schnitt in die Höhe.

Bei 430 (51,81% aller Fahrten) der 476 theoretisch möglichen EV-Fahrten ist der Zeitraum zwischen der vorangegangenen Buchung und dem Fahrtantritt ausreichend, um per Schnellladung (Annahme: 38 kW Ladeleistung, siehe auch Abbildung 3.6) die für die zurückzulegende Strecke benötigte Energiemenge (0,1729 kWh/km) in die Fahrzeugbatterie zu laden. Da diese Berechnung eine Restladung einer vorangegangenen Buchung nicht berücksichtigt, ist davon auszugehen, dass dieser Wert in der Praxis höher liegt.

In der Summe besteht ein, nach Anzahl der Fahrten und auch nach Buchungszeiten bemessen, hohes Substitutionspotential durch Elektromobilität für den Fuhrpark. Jedoch kann unter den hier gesteckten Rahmenbedingungen nur eine geringe Kilometerleistung erreicht werden. Problematisch ist hier die eingangs erwähnte, vergleichsweise hohe, durchschnittliche Fahrleistung je Buchung des ADAC-Fuhrparks. Bereits die Standard-Strecke Laatzen - Magdeburg von 160 km kann nicht sicher ohne Zwischenladung absolviert werden und wird daher als nicht substituierbar angenommen.

3.1.2.1. Ableitung des Fahrzeugbedarfs

Analog zum in Abschnitt 3.1.1.2 ermittelten Fahrzeugbedarf für die erfassten Fahrten, erfolgt nun eine ebensolche Berechnung, jedoch unter Einbeziehung von Verbrennern und EVs als potentielle Fahrzeuge. Reichweitenrestriktionen und Ladezeiten finden bei der Auslastungsplanung der EVs Berücksichtigung.

Tabelle 3.4.: Theoretischer Fahrzeugbedarf an EVs und Verbrennern

Fahrzeug	**Fahrten**	**%**	**Strecke in km**	**%**	**Zeit in h**	**%**
EV 1	193	23,25	9.180	5,95	4.111,32	18,6
EV 2	128	15,42	6.993	4,53	2.646,10	11,69
EV 3	84	10,12	4.243	2,75	1.582,65	6,99
EV 4	38	4,58	1.778	1,15	1.051,17	4,64
EV 5	18	2,17	1.184	0,77	274,50	1,21
EV 6	7	0,84	381	0,25	167,50	0,74
EV 7	4	0,48	290	0,19	108,00	0,48
EV 8	1	0,12	100	0,06	24,00	0,11
EV 9	1	0,12	100	0,06	96,00	0,42
EV 10	1	0,12	100	0,06	96,00	0,42
EV 11	1	0,12	100	0,06	24,00	0,11
ICE 1	132	15,90	46.934	30,43	5.223,77	23,08
ICE 2	112	13,49	40.225	26,08	3.428,62	15,15
ICE 3	60	7,23	24.490	15,88	2.435,17	10,76
ICE 4	39	4,70	14.020	9,09	1.062,47	4,69
ICE 5	11	1,33	4.110	2,66	306,5	1,35

Das bekannte Vorgehen wird um einen Schritt erweitert. Dieser besteht in der initialen Aufteilung sämtlicher Fahrten, in Fahrten mit maximal 140 km zurückgelegter Strecke und Fahrten mit höherer Fahrleistung. Diese Fahrtlisten wurden analog zum, für den ausschließlich mit Verbrennerfahrzeugen bestückten, Fuhrpark heuristisch auf Fahrzeuge aufgeteilt. Für Fahrten mit einer Strecke über 140 km wurde von der Nutzung von ICEs ausgegangen und die Berechnung wie bisher durchgeführt.

Für Fahrten von bis zu 140 km Strecke wurde die zusätzliche Nebenbedingung eingeführt, dass zwischen zwei Buchungen auf einem Fahrzeug ausreichend Zeit für eine Ladung mit 38 kW Ladeleistung (Ladeleistung einer Schnellladung bis ca. 80% Ladestand, vgl. Abbildung 3.6) vorhanden sein muss, um die für die folgende Strecke nötige Ladung sicherzustellen. Anzumerken ist, dass diese Berechnung nicht die Restladung vergangener Fahrten berücksichtigte.

Das Ergebnis dieser Berechnung in Tabelle 3.4 zeigt eine deutlich höhere Fahrzeugzahl, als die vorangegangene Berechnung in Tabelle 3.1. Zudem weisen viele der zusätzlichen Fahrzeuge nur eine geringfügige Fahrleistung auf. Zu begründen ist dies damit, dass Bu-

chungen von Verbrennerfahrzeugen, welche in der Praxis direkt aufeinander folgten von diesem Modell auf Grund der obligatorischen Ladezeit als nicht vereinbar identifiziert wurden.

3.1.2.2. Betrachtung unter wirtschaftlichen Aspekten

Auch für diesen hypothetischen gemischten Fuhrpark erfolgt eine Kostenermittlung analog zum Vorgehen in Abschnitt 3.1.1.3. Wie bisher wird für die ICEs die Verwendung eines Fahrzeugs des Typs VW Golf angenommen. Für die nun hinzugekommenen EVs werden die Daten des VW eGolf angenommen.

Tabelle 3.5.: Fuhrparkkosten in EUR, sortiert nach Fahrleistung

Fahrzeug	**Fixkosten**	**Fahrtkosten**	**Gesamt**	**je km**	**∅ km**
ICE 1	5.365,67	3.337,01	8.702,68	0,18542	0,18542
ICE 2	5.365,67	2.860,00	8.225,67	0,20449	0,19496
ICE 3	5.365,67	1.741,24	7.106,91	0,29020	0,22670
ICE 4	5.365,67	996,82	6.362,49	0,45382	0,28348
EV 1	7.221,67	480,11	7.701,78	0,83897	0,39458
EV 2	7.221,67	365,73	7.587,40	1,0850	0,50965
EV 3	7.221,67	221,91	7.443,58	1,75432	0,68746
ICE 5	5.365,67	292,22	5.657,89	1,37662	0,77361
EV 4	7.221,67	92,99	7.314,66	4,11398	1,14476
EV 5	7.221,67	61,92	7.283,59	6,15168	1,64545
EV 6	7.221,67	19,93	7.241,60	19,00681	3,22376
EV 7	7.221,67	15,17	7.236,84	24,95461	5,03466
EV 8	7.221,67	5,23	7.226,90	72,2690	10,20653
EV 9	7.221,67	5,23	7.226,90	72,2690	14,63957
EV 10	7.221,67	5,23	7.226,90	72,2690	18,48153
EV 11	7.221,67	5,23	7.226,90	72,2690	21,84325
Summe			**116.772,69**		

Der Anschaffungspreis des eGolf liegt bei 34.900 EUR [46], mehr als 10.000 EUR über dem des Benziner-Golfs. Die jährliche Abschreibung beträgt somit 5.816,67 EUR. Die Versicherung liegt mit 901 EUR je Jahr [5, S.33] leicht über dem Satz des ICEs. Geringere Kosten weist der eGolf für Werkstattbesuche und Reifen auf. Diese liegen bei nur 42 EUR je Monat. Die KFZ-Steuer entfällt für den betrachteten Zeitraum sogar vollständig [46]. Zusammengefasst liegen die Kosten, welche nahezu unabhängig von der Fahrleistung anfallen, bei jährlich 7.221,67 EUR.

Je zurückgelegtem Kilometer fallen zudem 0,0523 EUR Stromkosten an [46, 49]. Dieser Betrag stellt den Bruttostromverbrauch dar, welcher 18,2 kWh je 100 km beträgt. Er enthält die auftretenden Ladeverluste von ca. 10%. Die Stromkosten gehen mit 0,2872 EUR/kWh in die Berechnung ein.

Tabelle 3.6.: Optimierter Fuhrpark, Kosten in EUR

Fahrzeug	**Fixkosten**	**Fahrtkosten**	**Gesamt**
ICE 1	5.365,67	3.337,01	8.702,68
ICE 2	5.365,67	2.860,00	8.225,67
ICE 3	5.365,67	1.741,24	7.106,91
ICE 4	5.365,67	996,82	6.362,49
EV 1	7.221,67	480,11	7.701,78
EV 2	7.221,67	365,73	7.587,40
EV 3	7.221,67	221,91	7.443,58
Fremd		2.442,90	2.442,90
Summe			**55.573,51**

Auch hier erfolgt eine wirtschaftliche Optimierung durch Entfernung kaum genutzter Fahrzeuge aus dem Fuhrpark. Um eine Vergleichbarkeit mit dem rein mit ICEs bestückten Fuhrpark aus Kapitel 3.1.1.3 sicherzustellen, wird auch hier eine Deckung von ca. 95% des Mobilitätsbedarfs durch eigene Fahrzeuge angestrebt. Für nicht absolvierbare Fahrten wird wieder von einem Fremdbezug zu identischen Konditionen wie bisher ausgegangen.

Das Ergebnis (Tabelle 3.6) ist ein Fuhrpark mit sieben statt fünf Fahrzeugen. Die Fahrleistung der ICEs beträgt 125.669 km, die der EVs 20.416 km. Fremd bezogen werden 8.143 km. Die Kosten für den Unterhalt des Fuhrparks liegen mit 55.573,51 EUR insgesamt 15.395,07 EUR über denen des vergleichbaren ICE-Fuhrparks.

3.1.2.3. Ökologische Auswirkungen

Der Vorgehensweise aus Abschnitt 3.1.1.4 folgend wird nun der Schadstoffausstoß des gemischten Fuhrparks kalkuliert. Für die Verbrennerfahrzeuge setzt sich dieser wieder aus den Emissionen der Fahrzeugfertigung und den bei der Kraftstoffproduktion und -verbrennung entstehenden Emissionen zusammen. Bei den EVs weicht diese Berechnung ab. Neben den Fertigungsemissionen werden durch den Betrieb der EVs nur die Emissionen der Stromproduktion verursacht. Lokale Emissionen im Betrieb entstehen nicht.

Es werden im Folgenden zwei Szenarien betrachtet. Da Strom aus unterschiedlichen Quellen mit sich bedeutend unterscheidenden Emissionswerten bezogen werden kann, wird sowohl die Nutzung des deutschen Durchschnittsstrommixes, als auch die Nutzung von in Deutschland gewonnenem Ökostrom analysiert. Es wird für die folgenden Berechnungen angenommen, dass ein mit Ökostrom betriebener eGolf 52 g CO_2e/km verursacht, mit dem deutschen Strommix betrieben werden 103 g CO_2e/km unterstellt [25, S.232].

Diese Berechnungen beziehen sich auf den Bruttoenergiebedarf, beziehen somit auch die Übertragungsverluste mit ein. Die EVs des Fuhrparks legen pro Jahr 20.416 km elektrisch zurück. Dies entspricht 3.821,86 kWh Bruttoenergiebedarf.

Die Aufwendungen der Fahrzeugfertigung belaufen sich für die EVs auf 11t [64, S.30]. Dieser, im Vergleich zur ICE-Produktion, hohe Wert ergibt sich vor allem aus der aufwändigen Batteriefertigung, welche ca. 50% der Emissionen verursacht. Verantwortlich ist insbesondere ein zur Zeit geringer Automatisierungsgrad der Fertigung. Mit seiner Steigerung in den kommenden Jahren ist eine deutliche Reduktion absehbar [64, S.22f]. Den EVs wird ebenso wie den Verbrennern eine Nutzungsdauer von 11,9 Jahren unterstellt. Da dieser Zeitraum die voraussichtliche Batterielebensdauer der heutigen EVs übersteigt, werden auf die Fahrzeuglebensdauer 1,5 Batteriesätze umgelegt.

Flottenemissionen im Jahr nach Formel 3.1:

ICEs:

$$4 * \frac{6.000}{11,9} + 125.669 * 0,132 = 18.605,11 \tag{3.4}$$

EVs mit Durchschnittsstrom:

$$3 * \frac{11.000}{11,9} + 20.416 * 0,103 = 4.875,96 \tag{3.5}$$

EVs mit Ökostrom:

$$3 * \frac{11.000}{11,9} + 20.416 * 0,052 = 3.834,74 \tag{3.6}$$

Fremd:

$$1/3 * \frac{6.000}{11,9} + 8.143 * 0,132 = 1.242,94 \tag{3.7}$$

In der Summe ergeben sich jährliche Emissionswerte von 24.724,02 kg CO_2e für die Nutzung des deutschen Durchschnittsstroms und 23.682,80 kg CO_2e für die Nutzung von deutschem Ökostrom. Damit werden die jährlichen Emissionswerte des reinen ICE-Fuhrparks um 1.676,85 kg CO_2e (Durchschnittsstrom) bzw. 635,63 kg CO_2e (Ökostrom) überschritten.

Ein Blick auf die Gesamtveränderung verdeutlicht die Auswirkungen der Umstellung. So führte die Integration von EVs in den Fuhrpark zu einer Zunahme der Fahrzeugzahl um 40% durch zwei zusätzliche, eigene Fahrzeuge. Ein weiterer Verbrenner wird gegen ein EV ausgetauscht. Diese Fahrzeuge weisen höhere Fertigungsemissionen auf, als die bisherigen Fuhrparkfahrzeuge. Jedoch steigen die Gesamtemissionen des Fuhrparks nur um 7,3% bzw. 2,8% und somit deutlich unterproportional zur Fahrzeugzahl. Ein Emissionsvorteil der EVs im Betrieb ist somit deutlich erkennbar, reicht aber in dieser Situation nicht für eine absolute Verbesserung aus.

3.1.3. Die Ladeinfrastruktur

Aus dem ermittelten Nutzungspotential ergibt sich ein Energiebedarf, den es zu decken gilt. Dieser beträgt im Jahr 3.821,86 kWh. Unter der Annahme, dass dieser Energiebedarf nur werktags gedeckt werden muss, ergibt sich unter der Woche ein durchschnittlicher Tagesenergiebedarf von $3.821,86/(52 * 5) = 14,70$ kWh.

Nachdem in Kapitel 2.1.3 die Ladetechnik mit Blick auf die fahrzeugseitige Technik betrachtet wurde, wird an dieser Stelle auf die Infrastruktur eingegangen, welche zur Ladung der EVs und somit zu ihrem Betrieb unerlässlich ist.

Zu differenzieren sind die Ladeeinrichtungen zunächst nach ihrem Standort und ihrem Betreiber. Die Nationale Entwicklungsplattform Elektromobilität (NPE) geht für das Jahr 2017 davon aus, dass 87% der in Deutschland betriebenen Ladeinfrastruktur sich im privaten Raum befindet, etwa in Privathaushalten oder auf Betriebsgeländen. Weitere 8% werden als halböffentliche Ladeinfrastruktur prognostiziert, welche z.B. auf Kundenparkplätzen, in Parkhäusern oder auf Autobahnraststätten zur Verfügung gestellt wird. Nur 5% werden öffentlich, also auf öffentlichen Parkplätzen oder am Straßenrand, bereitstehen. Zudem wird prognostiziert, dass die Stromkosten an wirtschaftlich betriebenen, öffentlichen Ladestationen auch bei hoher Nachfrage ca. doppelt so hoch wie an einer privat betriebenen Ladestation sind [44, S.46f]. Es ist somit davon auszugehen, dass für den verlässlichen und wirtschaftlichen Betriebseinsatz von EVs eigene Ladeinfrastruktur vorzuhalten ist. Eine opportunistische Nutzung (halb)öffentlicher Ladeinfrastruktur zur Reichweitensteigerung befindet sich jedoch im Bereich des Möglichen. In den folgenden Analysen wird nicht davon ausgegangen, dass eine Alternative zur betrieblichen Ladeinfrastruktur vorhanden ist.

Voraussetzung für die folgenden drei Varianten der technischen Ausgestaltung einer betriebseigenen Ladeinfrastruktur ist ein Betriebsgelände (Hof/Parkplatz/(Tief-)Garage) auf dem die Ladetechnik installiert werden kann und die Fahrzeuge während der Ladezeit stehen können.

Die simpelste Variante der Ladung besteht in der Nutzung des oft mit dem Fahrzeug mitgelieferten [29][46] „Notladegeräts“, welches eine Ladung mit einer maximalen Ladeleistung von **3,6 kW AC** an jeder Schuko-Steckdose erlaubt. Die Voraussetzungen für eine Ladung sind an den meisten Fahrzeugstellplätzen gegeben. Allerdings ist eine Ladezeit von 7-10 h für 150-200 km Fahrstrecke anzusetzen [30, S.282]. Für weitere Betrachtungen wird unterstellt, dass diese Variante keine Infrastrukturkosten verursacht.

Eine leistungsfähigere Lösung bietet eine Wallbox an. Je nach Ausführung liefern diese **3,6, 11 oder 22 kW AC**. Geladen wird entweder mit 16 A (3,6 kW einphasig oder 11 kW dreiphasig) oder 32A (7,2 kW einphasig oder 22 kW dreiphasig). Die dreiphasige Ladung reduziert die Ladezeit deutlich, sie liegt jedoch weiterhin über einer Stunde. Zudem setzt sie voraus, dass ein entsprechendes Ladegerät im Fahrzeug verbaut ist [30, S.282]. Fahrzeuge wie etwa der VW eGolf oder der BMW i3 sind nur in der Lage, mit einer Ladeleistungen von 3,6 kW an einer Wallbox zu laden [29][46]. Für eine 3,6 kW Wallbox

ist eine Investition von 500 EUR anzusetzen, laufende Kosten fallen nicht an [4, S.82]. Bei einer 22 kW Wallbox sind es 800 EUR [67]. Für die folgenden Berechnungen wird für eine 11 kW-Wallbox ein Preis von 650 EUR angenommen, dem Mittelwert zwischen 22 und 3,6 kW-Wallbox. Der Abschreibungszeitraum beträgt 7,5 Jahre [44, S.51]. Wegen der erforderlichen Ladezeit ist eine Wallbox je Fahrzeug anzusetzen.

Die leistungsfähigste und umfangreichste Variante besteht in der Ladung mit **20 bzw. 50 kW DC** an einer Schnellladesäule. Sie ermöglicht eine nennenswerte Ladung in einem Zeitraum von unter einer Stunde. Aufgrund der nötigen Anschlussleistung ist sie für eine Hausinstallation ungeeignet. Prädestiniert ist sie für Nutzfahrzeuge, z.B. in Lieferdiensten, mit planbaren Standzeiten und -orten [30, S.282]. Eine entsprechende Anlage kostet ca. 20.000 EUR. Hinzu kommen einmalige Montage- und Anschlusskosten von ca. 7.150 EUR. Die laufenden Kosten für Wartung und Betrieb werden von der NPE auf 3.075 EUR/Jahr beziffert. Der Abschreibungszeitraum liegt bei 7,5 Jahren [44, S.51]. Anzumerken ist, dass die genannten Kosten sich auf eine öffentlich betriebene Anlage beziehen. Es ist anzunehmen, dass sie bei einer rein betrieblich genutzten Anlage geringer ausfallen, da etwa der Unterhalt eines Abrechnungs- und Bezahlsystems entfällt. Durch die geringen Ladezeiten ist eine solche Anlage durch mehrere Fahrzeuge nutzbar. Eine 1 zu 1 Zuordnung von Fahrzeug und Ladeeinrichtung wie bei der Wallbox entfällt.

Die Auswirkungen der verschiedenen Ladevarianten sollen nun an einem Beispiel verdeutlicht werden. Hierzu wird wie bisher ein EV angenommen, welches über eine Reichweite von 140 km verfügt. Gradmesser für die Leistungsfähigkeit der Ladetechnik ist die mit dem Fahrzeug innerhalb von 24 Stunden absolvierbare Strecke. Angenommen wird hierbei die aus der Studie zum Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland [62, S.392, 398] entnommene durchschnittliche Fahrweite von ca. 14 km je Fahrt und die durchschnittliche Fahrtdauer von 24 min. In Kombination ergeben diese eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 35 km/h. Das Beispielfahrzeug kann mit dieser Geschwindigkeit 4 Stunden fahren, bevor ein Ladestopp eingelegt werden muss. Für diesen werden im Folgenden die vereinfachten Ladezeiten von 3,6 kW = 8 h, 11 kW = 2 h, 22 kW = 1 h, 50 kW = 0,5 h angenommen. Anschließend setzt das Fahrzeug seine Fahrt fort und wiederholt Lade- und Fahrzyklen bis zum Ablauf der Zeit. Ein bestimmter Ladezustand bei Periodenende wird nicht vorausgesetzt. Abbildung 3.7 stellt die erzielbare Tagesfahrleistung je nach Ladevariante dar.

Für den Betriebsalltag eignet sich die 3,6 kW-Variante nur bedingt. Zwar können rein rechnerisch 280 km absolviert werden, nach der ersten Hälfte der Strecke muss jedoch eine achtstündige Unterbrechung für die Ladung eingelegt werden. Ein realistisches Einsatzszenario für diese Technik stellt fast ausschließlich die Nutzung des Fahrzeuges tagsüber, nur innerhalb seiner einfachen Reichweite und die Ladung über Nacht dar. Geeignet wäre diese Variante z.B. für Lieferdienste mit fixen Routen und Zeiten, die eine sichere Einhaltung der Strecken- und Zeiteinschränkungen erlauben.

Eine Ladung mit 11 kW ermöglicht mit 560 km eine Verdoppelung der Fahrleistung. In der Praxis könnte beispielsweise eine Fahrt am Vormittag durchgeführt werden und nach

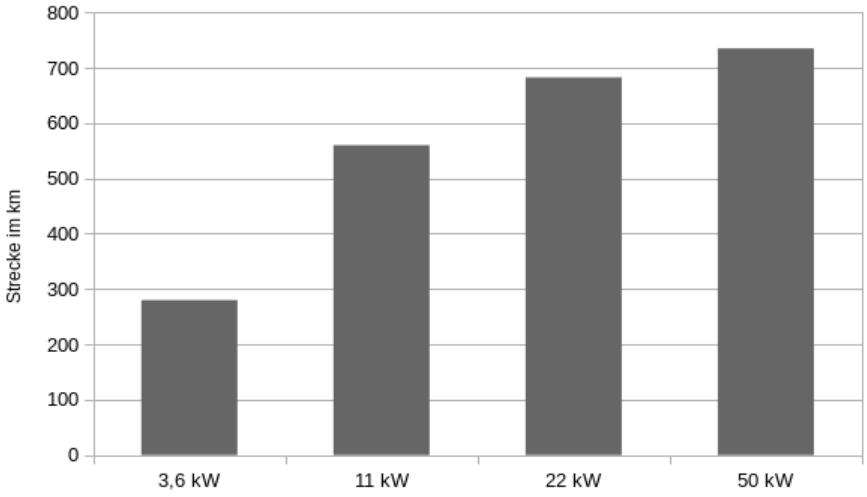


Abbildung 3.7.: Mögliche Tagesfahrleistung nach Ladeleistung

einer Zwischenladung stünde das Fahrzeug am Nachmittag erneut zur Nutzung bereit. Dies würde sich ungefähr mit den Peaks in der Abfahrtzeit in Abbildung 3.4 decken, welche um 8:00 und 16:00 liegen.

Rechnerisch beträgt die fahrbare Strecke mit 22 kW Ladeleistung 682,5 km. Mit einer Ladezeit von etwa einer Stunde wird das kurzzeitige Aufeinanderfolgen mehrerer längerer Fahrten möglich. Auch das Laden am Fahrziel kann einen nennenswerten Reichweitenzuwachs erzielen und den Einsatzradius der Fahrzeuge bei Bedarf verdoppeln. Die errechnete, maximale Tagesfahrleistung wird auch von Verbrennerfahrzeugen in der Praxis kaum überschritten (vgl. Abbildung 3.3).

Selbst mit einer Ladeleistung von 50 kW lässt sich dieses Ergebnis nur noch geringfügig verbessern. Diese ermöglicht eine Fahrleistung von 735 km. Die Ladezeiten fallen im Vergleich zu den Fahrzeiten kaum noch ins Gewicht. Einen nennenswerten Vorteil kann eine Ladeleistung von 50 kW und höher nur bei einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit bieten, etwa wenn mit dem EV lange Strecken auf der Autobahn zurückgelegt werden und unterwegs geladen werden muss.

In Tabelle 3.7 wird aufgeführt, wie sich die Nutzung unterschiedlicher Ladeinfrastrukturen auf die Fuhrparkkosten auswirkt. Für diese Analyse wird analog zum Vorgehen in Tabelle 3.4 berechnet, welche der Fahrten mit einer Strecke von maximal 140 km aus der Fuhrparkanalyse von den EVs absolviert werden könnten. Die angenommene Ladezeit variiert entsprechend der jeweiligen Ladeleistung. Die Fahrzeuganzahl wurde direkt auf drei EVs begrenzt. Nicht absolvierbare Fahrten werden wie bisher als durch Fremdmobilität gedeckt angenommen und mit entsprechenden Kosten (0,30 EUR/km) in die Kostenberechnung mit einbezogen. Die erste Spalte zeigt hierzu das bereits bekannte Ergebnis unter Annahme einer Ladung an einer 50 kW-Ladesäule.

Die Berechnungsergebnisse verdeutlichen, wie die von den EVs absolvierbare Fahrleistung mit sinkender Ladeleistung zurückgeht. Dies treibt die Kosten für den Fremdbezug

Tabelle 3.7.: Einfluss Ladeinfrastruktur auf Fuhrparkkosten, Kosten in EUR

	50 kW	**22 kW**	**11 kW**	**3,6 kW**
Fahrten	405	404	398	382
Strecke in km	20.416	20.316	19.836	18.856
Zeit in h	8.340,07	8.288,07	8.099,57	8.018,32
Fremdbezug zus. km	0	100	580	1560
Kosten Fremd zus.	0	30	174	468
Kosten Infrastruktur	27.150	2.400	1.950	0
Kosten Wartung/a	3.750	0	0	0
Abschreibungsdauer	7,5 J	7,5 J	7,5 J	-
Kosten Infrastruktur/a	6.695	320	260	0
Gesamtkosten	**62.268,41**	**55.923,41**	**56.007,41**	**56.041,41**

von Mobilitätsleistungen in die Höhe. Angegeben wird dieser Unterschied in der Tabelle als zusätzliche Kosten zu den, bei der bisher angenommenen Ladeleistung an einer Schnellladesäule, entstehenden Kosten von 2.442,90 EUR. Dem gegenüber stehen die Ausgaben für die Ladeinfrastruktur. Angenommen wird, dass jeweils eine Wallbox für ein Fahrzeug vorgehalten wird, oder ein Schnelllader für alle drei Fahrzeuge. Mit sinkender Ladeleistung gehen auch die Kosten für die Ladeinfrastruktur zurück. Aus den zusätzlichen Infrastrukturkosten und den variierenden Zusatzkosten für Fremdmobilität, ergeben sich in Kombination mit den unveränderten Kosten für den Betrieb der ICEs (vgl. Tabelle 3.6) die Gesamtkosten für den Fuhrparkunterhalt. Die minimalen Kosten ergeben sich bei der Nutzung von je einer 22 kW Wallbox je Fahrzeug. Diese liegen 15.745,07 EUR über denen des reinen ICE-Fuhrparks. Anzumerken ist zudem, dass hierzu ein anderes Fahrzeug hätte gewählt werden müssen. Der eGolf unterstützt keine 22 kW AC-Ladung. Ein alternatives Fahrzeug hätte jedoch etwa mit dem Renault ZOE [68] zu einem vergleichbaren Preis bezogen werden können.

3.1.4. Die Bedeutung der Informations- und Kommunikationstechnologie

Die Einführung von EVs in eine Fahrzeugflotte stellt das Flottenmanagement derzeit vor große Hürden, die es zu bewältigen gilt, um die Fahrzeuge effektiv für mehrere Nutzer verfügbar zu machen. Dies zeigt der Vergleich mit einem herkömmlichen Verbrennerfahrzeug deutlich. Dieses kann an Bord Kraftstoff für mehrere hundert Kilometer mitführen. Ein Tankstopp kann innerhalb weniger Minuten durchgeführt werden und ist bei der Verwaltung des Fahrzeuges oft kaum der Rede wert.

Damit mehrere Nutzer sich ein Fahrzeug teilen können, reicht es daher, die geplanten Zeiten der Fahrzeugnutzung z.B. in einem allen Nutzern zugänglichen Kalender festzuhalten und das Betanken des Fahrzeuges z.B. nach dem Verursacherprinzip zu regeln - jeder Nutzer tankt vor Abgabe das Fahrzeuges voll. Auf diese Weise kann jeder Nutzer i.d.R. davon ausgehen, dass er die von ihm geplante Strecke mit dem Fahrzeug zurücklegen kann.

Ein Abstimmen der Fahrleistung mit anderen Nutzern ist nicht erforderlich.

Die Situation stellt sich bei der Nutzung eines EV gravierend anders dar. Das Fahrzeug verfügt nur über eine Reichweite zwischen 100 km und 200 km, maximal ca. 400 km, [5, S.42] welche zudem noch abhängig von Witterung, Fahrstil und Nutzung elektronischer Verbraucher im Fahrzeug, z.B. der Heizung, stark schwankt [69]. Eine Ladung der Fahrzeugbatterie kann zwischen einer halben und acht Stunden in Anspruch nehmen (vgl. z.B. [46]) und öffentliche Ladesäulen sind rar gesät (5.500 öffentlich zugängliche Ladepunkte in Deutschland in 2014 [70] verglichen mit 14.622 Tankstellen in Deutschland im Jahr 2014 [71], welche jeweils über mehrere Zapfsäuen verfügen und an denen ein Tankvorgang nur einen Bruchteil der Ladezeit eines EVs in Anspruch nimmt). Bereits ein einzelner Fahrer muss seine Fahrten mit evtl. benötigten Ladestopps genau planen, um einen reibungslosen Ablauf zu gewähren. Verschiedene, untereinander nicht kompatible Ladestandards (vgl. 2.1.3) und verschiedene Ladeleistungen machen es zudem unbedarften Nutzern schwer, ihre Fahrt zu planen. Es ist daher für eine Fahrzeugverwaltung erforderlich, nicht nur die Zeiten zu erfassen, in denen das Fahrzeug genutzt wird, sondern auch geplante Strecken, Ladezeiten und Ladeleistungen und es muss ein steter Abgleich zwischen Planung und Umsetzung stattfinden, um eine Fahrzeugverfügbarkeit zu gewährleisten. Außerdem sollte den Nutzern eine möglichst einfache Handhabung von Fahrzeugen und Planungswerkzeugen ermöglicht werden.

In der hier beschriebenen EV-Erprobung wurde ein elektronisches Buchungsportal verwendet, welches eine grundlegende Fahrtenplanung unter Berücksichtigung prognostizierter Ladezeiten (auf Basis der am Stellplatz verfügbaren Ladeleistung) und Verbrauchswerte (heuristisch anhand der geplanten Strecke ermittelt) ermöglichte (vgl. [72, S.1621f] [73] [74]). Es fehlten jedoch Möglichkeiten zum automatischen Soll/Ist-Abgleich der Ladestände oder eine automatische Auslastungsplanung der Schnellladesäule. Diese Tätigkeiten mussten teilweise manuell durchgeführt werden. Daher erfolgt nun eine Zusammenfassung der Anforderungen, welche eine elektronische Buchungsverwaltung für das Management eines EV-Fuhrparks qualifizieren.

Die Grundfunktion eines Fahrzeug-Buchungsportals besteht darin, die Planung der Fahrzeugnutzung abzubilden und sicherzustellen, das die Buchungszeiträume der einzelnen Fahrzeuge überschneidungsfrei sind. Bei der Nutzung von EVs ist zusätzlich die Abbildung der Ladevorgänge und eine Prüfung, ob ein Fahrzeug eine angesetzte Fahrt mit der geladenen Energiemenge absolvieren kann, erforderlich. Da die Fahrten meist weit im Voraus gebucht werden (vgl. Abschnitt 3.1.1.1), ist von der Portalsoftware bei einer Buchungsanfrage zu prognostizieren, welcher Energiebedarf für die geplante Fahrt anfällt und ob dessen Deckung mit bereits angelegten Buchungen vereinbar ist. Dies umfasst nicht nur eine Überschneidungsfreiheit der Buchungen untereinander, sondern auch von Buchungszeiten und Ladezeiträumen. Neben dieser strategischen Planung muss auch eine operative Kontrolle erfolgen. Dauert etwa eine Buchung länger als geplant, oder wird mehr Energie verbraucht als angesetzt, kann sich dies auf nachfolgende Fahrten auswirken. Anzustreben ist hier eine direkte Verbindung von Fahrzeug und Buchungsportal,

damit etwa der prognostizierte Ladestand mit dem Realzustand abgeglichen und bei Bedarf Korrekturmaßnahmen (z.B. Umbuchung einer nachfolgenden Fahrt auf ein anderes Fahrzeug, Benachrichtigung des Buchenden) eingeleitet werden können. Zwar verfügen die meisten EVs heutzutage über ein UMTS-Modem und sind in der Lage, etwa ihren Ladestand darüber zu übertragen, zumeist kommunizieren sie jedoch nur mit Servern der Fahrzeughersteller und bieten keine Schnittstellen für Drittanbieter-Software.

Wenn eine Ladestation, z.B. eine Schnellladesäule, von mehreren Fahrzeugen genutzt wird, kann es weiterhin erforderlich sein, dass auch deren Auslastung in die Buchungsplanung mit einbezogen wird, um Nutzungskonflikte zu vermeiden.

Zu wünschenswerten, jedoch nicht zwingend erforderlichen Zusatzfunktionen zählt die Optimierung der Fahrzeugauslastung. EV-geeignete Fahrten sollten EVs zugewiesen werden, auch könnten etwa gleichmäßige Fahrzeugnutzung oder vergleichbare Optimierungsgesichtspunkte berücksichtigt werden.

Da für eine exakte Prognose des EV-Energieverbrauchs möglichst präzise Daten, etwa zu Strecke, Höhenprofil, Temperatur oder Durchschnittsgeschwindigkeiten nötig sind, welche der Buchende selten ohne großen Aufwand zur Verfügung stellen kann, würde sich als Zusatzfunktionalität auch die Integration eines Routenplaners in die Buchungssoftware anbieten. Diese könnte bei der bloßen Angabe des Fahrziels nicht nur die für die Energieprognose notwendigen Daten erfassen, sie könnte auch eine Planung von Zwischenladungen an geeigneten Orten unterstützen. Entsprechende Routenplaner für EVs existieren bereits (vgl. z.B. goingelectric.de/stromtankstellen/routenplaner/, lemnet.org) und ermöglichen eine Tourenplanung unter Berücksichtigung von Reichweitenrestriktionen und Ladestandorten.

Weiterhin könnten etwa Abrechnungsfunktionen für die unternehmensinterne Kostenrechnung integriert werden.

3.2. Fahrzeugnutzung im Realbetrieb

Nachdem das rechnerische Nutzungspotential der EVs ausführlich erörtert wurde, folgt nun eine Analyse der tatsächlichen dienstlichen Fahrzeugnutzung und der Faktoren, welche diese beeinflusst haben. Ziel ist es, Diskrepanzen zwischen den Nutzungsprognosen und der Realnutzung der Fahrzeuge aufzuzeigen und Ursachenanalyse zu betreiben, mit dem Fokus auf der größtmöglichen Ausschöpfung des Nutzungspotentials.

3.2.1. Abgleich Potential und reale Nutzung

Das Einsatzpotential der EVs wurde in Abschnitt 3.1.2 beziffert. Die präziseste Aussage für das Einsatzpotential der EVs trifft die Berechnung der möglichen Fahrleistung für die Fahrzeuge EV 1 bis EV 4 in Tabelle 3.4. Diese Daten sollen nun als Maß für den realen Nutzungsgrad der Fahrzeuge dienen.

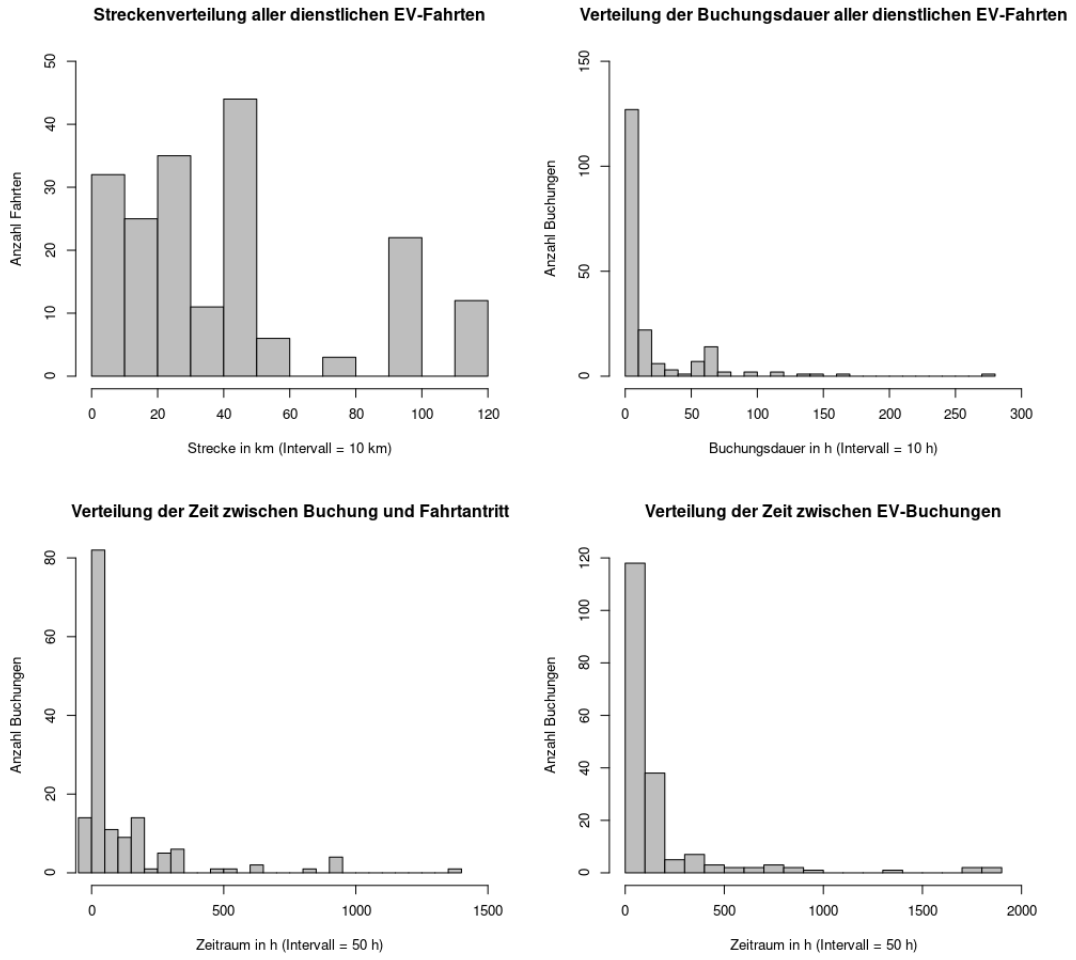


Abbildung 3.8.: Statistische Auswertung der elektrisch absolvierten Dienstfahrten, n = 190

Insgesamt wurden 190 Dienstfahrten, also 22,89% aller Fahrten bzw. 42,89% der theoretisch möglichen 443 elektrischen Fahrten auf den EVs des Fuhrparks absolviert. Die auf diesen Fahrten zurückgelegte Strecke belief sich auf 8.551 km, 38,53% des Substitutionspotentials und damit 5,44% der Strecke, welche der gesamte Fuhrpark zurückgelegt hat (siehe hierzu auch Abbildung 3.1). Die durchschnittlich je Buchung zurückgelegte Strecke betrug 45,01 km. Es wurde keine Entfernung über 120 km zurückgelegt (vgl. Abbildung 3.8). Somit gab es keine Fahrten, welche eine Ladung außerhalb des Betriebsgeländes zwingend erforderten. Die erzielte Buchungszeit lag bei 3.649,37 Stunden, 16,12% der Gesamtbuchungszeit des Fuhrparks oder 38,86% des errechneten EV-Potentials. Die durchschnittliche Buchung dauerte 19,21 Stunden, jedoch lag der Median bei 4,68 Stunden. Von den in Abschnitt 3.1.1.1 genannten 62 Fuhrparknutzern nahmen 41 Personen die EVs mindestens ein Mal dienstlich in Anspruch. Das sind 66,13%.

Zu beachten ist, dass dieser Abgleich nur das Potential der EVs bei ihrem Einsatz innerhalb ihrer einfachen Reichweite berücksichtigt. Ein Vergleich mit dem Nutzungspotential unter Annahme des Destination-Charging und somit der doppelten Fahrzeugreichweite (vgl. Berechnung in Abschnitt 3.1.2, 609 mögliche Fahrten ohne Berücksichtigung der Fahrzeugauslastung) hätte eine noch schlechtere Quote ergeben. Im Rahmen ihrer Erprobung wurden die E-Fahrzeuge fast ausschließlich auf dem Betriebsgelände geladen. Öffentliche Ladeinfrastruktur wurde nur in sehr wenigen Fällen für Dienstfahrten eingesetzt. Problematisch bei der Nutzung öffentlicher Ladeinfrastruktur war insbesondere die notwendige Planung vor Fahrtantritt. Der Standort einer geeigneten Ladesäule musste ermittelt werden. Die Vielzahl an Stecker-Standards und Ladeleistungen war für die Nutzer hierbei oft verwirrend. Zudem hätten Umwege in Kauf genommen werden müssen, um die gefundenen Lademöglichkeiten zu erreichen. Wenn sich die Lademöglichkeit nicht in der direkten Nähe des Ziels befand, konnte das Laden nicht parallel zum „Termin“ erfolgen, d.h. die Ladezeit war Wartezeit und somit nicht dienstlich nutzbar. Zudem bestand bei der Ausbausituation der Ladeinfrastruktur zu diesem Zeitpunkt immer das Risiko, auf eine besetzte oder defekte Lademöglichkeit zu treffen. Diese Situation führte dazu, dass sich Dienstfahrten mit E-Fahrzeugen ausschließlich innerhalb der einfachen Fahrzeugreichweite bewegten und Ladungen fast ausschließlich an der sicher verfügbaren, betrieblichen Ladeinfrastruktur stattfanden.

Da die Nutzung der EVs deutlich unter dem rechnerisch möglichen Einsatzpotential lag, wird in den folgenden Unterkapiteln auf mögliche Ursachen und Gegenmaßnahmen für den Nutzungsverzicht eingegangen.

3.2.2. Technische und organisatorische Faktoren

Ein entscheidender, technischer Faktor, welcher die Einsatzfähigkeit der EVs determiniert, ist die verfügbare Ladeinfrastruktur. In den bisher angestellten Berechnungen zur möglichen Nutzung der EVs wurde die maximale Ladeleistung an einer 50 kW Schnellladeeinrichtung unterstellt. Diese stand jedoch in der Praxis nicht über den vollen Erhebungszeitraum hinweg zur Verfügung. Durch den parallelen Aufbau von Test-Fahrzeugflotte und Ladeinfrastruktur war es über ca. 2/3 des Erhebungszeitraums hinweg auf dem Betriebsgelände nur möglich, die Fahrzeuge vom Typ eGolf mit maximal 3,6 kW zu laden. Eine zuverlässige Ladung an einer 50 kW Schnellladesäule war nur in den letzten vier Monaten des einjährigen Testlaufs möglich. Für den Smart ED stand über den gesamten Erhebungszeitraum hinweg eine 22 kW AC Lademöglichkeit bereit, die maximale für dieses Fahrzeug mögliche Ladeleistung.

Um den Einfluss einer geringen Ladeleistung zu berücksichtigen, wird nun ein Vergleich der Fahrleistung der EVs mit dem in Abschnitt 3.1.3 berechneten Nutzungspotential für eine Fahrzeugflotte unter der Nutzung von ausschließlich 3,6 kW-Ladeinfrastruktur durchgeführt. Mit Reduzierung der Ladeleistung sinkt die Anzahl der von einem angenommenen, drei EVs umfassenden, Fuhrpark durchführbaren Fahrten auf 382. Es ist nur noch eine Strecke von 18.856 km absolvierbar, bei einer Abwesenheit von 8.018,32 Stunden

vom Betriebsgelände. Vom realen, vier Fahrzeuge umfassenden Fuhrpark wurden somit 49,74% der rechnerisch möglichen Fahrten absolviert, dies entspricht 45,35% der möglichen Strecke und 45,51% der prognostizierten Buchungszeit. Zwar rückt so im Vergleich zur Berechnung aus Abschnitt 3.2.1 z.B. die erzielte Strecke um etwas mehr als 10% näher an das mögliche Maximum heran. Da in der Summe jedoch trotzdem kaum die Hälfte der möglichen Fahrten absolviert wurde, ist auszuschließen, dass die alleinige Ursache für die geringe Nutzung in der Ladeinfrastruktur zu finden ist.

Als organisatorischer Einflussfaktor ist die Nutzung von drei der vier EVs im sogenannten Tandemmodell (vgl. Kapitel 3.3) anzuführen. In diesem Programm wurden eGolf 2 & 3 neun Monate lang betrieben, der Smart ED auf Grund einer geringen Nachfrage nur fünf Monate. Es sah eine Sekundärnutzung der Fahrzeuge außerhalb der Kernarbeitszeiten des ADAC vor. Die Fahrzeuge standen daher nur acht Stunden täglich für die dienstliche Nutzung zur Verfügung. Dieser Zeitraum ist kürzer als die durchschnittliche Buchungszeit. Somit lag ein Nutzungskonflikt zwischen beiden Anwendungsfeldern vor. In Abbildung 3.1 ist ein deutlicher Unterschied zwischen der dienstlichen Fahrleistung des nahezu ausschließlich dienstlich[7] eingesetzten eGolf 1 und den im Tandemmodell genutzten Fahrzeugen eGolf 2 & 3 und Smart ED erkennbar. Um zu ergründen, ob alleine die Sekundärnutzung für die geringe Nutzung der Fahrzeuge im Diensteinsatz verantwortlich ist, wird die Nutzung des eGolf 1 getrennt mit seinem Nutzungspotential abgeglichen.

Dieser eGolf legte mit 85 Fahrten 44,04% der für ihn möglichen 193 Fahrten zurück (vgl. EV 1 in Tabelle 3.4). Die Gesamtstrecke lag mit 4.492 km, durchschnittlich 52,85 km je Fahrt, von erzielbaren 9.180 km, bei 48,93% der maximalen Auslastung. Von den möglichen 4.111,32 Stunden Fahrzeit wurden mit 2.204,18 Stunden nur 53,61% absolviert. Durchschnittlich lagen 78,53 Stunden Zeit zwischen zwei Buchungen und 116,26 Stunden Zeit zwischen Buchung und Fahrtantritt.

Wird weiterhin die Ausbausituation der Ladeinfrastruktur berücksichtigt und nur eine Ladeleistung von 3,6 kW angenommen, sinkt das Einsatzpotential auf 172 Fahrten mit 7.815 km und 3.698,82 Stunden Fahrzeit. Auf dieser Grundlage ergäbe sich eine Erfüllungsquote von 49,42% der möglichen Fahrten, 57,48% der absolvierbaren Strecke und 59,59% der Fahrzeit.

Diese Ergebnisse belegen, dass die hier genannten Faktoren nicht allein ursächlich für die geringe Nutzung der Fahrzeuge im Diensteinsatz sein können.

3.2.3. Menschliche Faktoren

Da die betrachteten technischen Einflussfaktoren die geringe Nutzungsquote der EVs nicht ausreichend erklären können, erfolgt nun ein Blick auf die Nutzerseite. Als erster Einstieg soll eine Erhebung unter den ADAC-Mitarbeitern zu Beginn des Projekts dienen (vgl. Fragebogen, Ergebnisse im Anhang).

[7] In 17 Fällen wurde das Fahrzeug z.B. wegen Reparaturarbeiten an einem Tandemfahrzeug für Tandemfahrten im 16:00 bis 8:00 Uhr Zeitfenster eingesetzt

In dieser Befragung gaben 74% der Mitarbeiter an, ein E-Fahrzeug in der Praxis erproben zu wollen. Weitere 18% waren unschlüssig, nur 8% lehnen eine Nutzung von E-Fahrzeugen ab. Bei den Faktoren, welche für die Mitarbeiter entscheidend für die Wahl eines Verkehrsmittels (dienstlich wie privat) waren, wurden mit dem höchsten Stellenwert gleichauf die Faktoren Zeit, sowie Kosten genannt. Diese wurden jeweils von 93% der Befragten als wichtig bis sehr wichtig eingestuft. Es folgte der Komfortaspekt, welcher von 85% der Befragten als wichtig bis sehr wichtig eingeschätzt wurde. Die geringste Rolle spielten die Umweltauswirkungen bei der Verkehrsmittelwahl. Diese wurden nur von 79% als wichtig bis sehr wichtig erachtet.

Beim Wissensstand zum Thema Elektromobilität fühlten sich die Mitarbeiter sowohl in den Bereichen E-Fahrzeugreichweite, als auch Ladearten, -zeiten und –infrastruktur überwiegend schlecht informiert.

Diese Befragungsergebnisse deuten darauf hin, dass keine generelle Ablehnung der Elektromobilität vorliegt. Allerdings ist der Kenntnisstand zu diesem Thema als nicht ausreichend einzustufen. Es liegt die Befürchtung nahe, dass Nutzer den Aufwand, sich mit der neuen Technik vertraut zu machen und eine gründlichere Fahrtplanung als bisher vorzunehmen, scheuen könnten. Das wiederum würde dazu führen, dass für Strecken, welche von den EVs problemlos zu bewältigen wären, auf Verbrennerfahrzeuge zurückgegriffen wird.

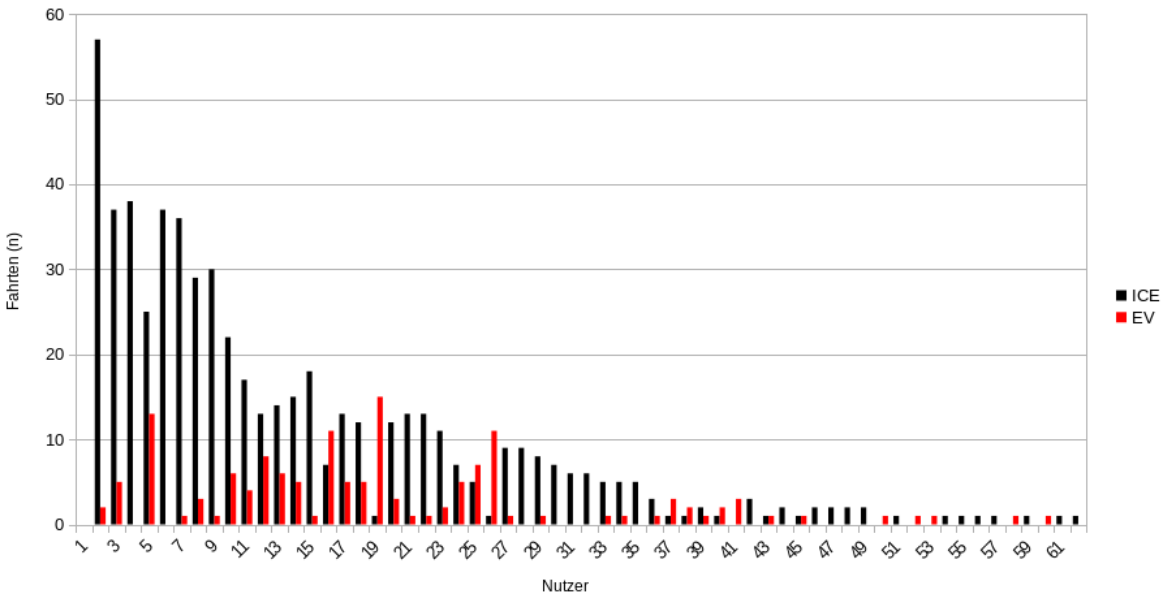


Abbildung 3.9.: Verhältnis von Nutzungsintensität des Fuhrparks und EV-Nutzung

Einen weiteren Hinweis darauf, dass Nutzervorbehalte einen großen Einfluss auf die Fahrzeugwahl haben ist die Nutzung des Opel Ampera REEV. So wies selbst dieses Fahrzeug, welches mit seiner Reichweite von 710 km [75] und der Möglichkeit des reinen Benzin-

betriebs, also dem Wegfall von Ladezeiten, sämtliche der angefallenen Strecken hätte bewältigen können, kaum eine höhere Anzahl an Fahrten auf, als der überwiegend dienstlich genutzte eGolf (Ampera 100, eGolf 85). Im Vergleich mit den anderen ICEs ist er bei der Streckenleistung weit abgeschlagen (vgl. Abbildung 3.1).

Die Akzeptanz der E-Fahrzeuge spiegelt sich in ihrer Nutzung im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen des Fuhrparks wieder. Die Fahrzeuge des unternehmenseigenen Fuhrparks wurden im Zeitraum der Datenerfassung von insgesamt 62 der 93 Mitarbeiter des Standorts genutzt. 41 von ihnen nutzten sowohl E-Fahrzeuge, als auch die Verbrenner-Fahrzeuge. Die übrigen 21 Personen nutzten nur Verbrenner-Fahrzeuge.

Abbildung 3.9[8] zeigt, dass nur zwei der Nutzer mit mehr als 10 Fahrten im Jahr generell auf die Nutzung von EVs verzichten. 19 der 21 Mitarbeiter, welche ausschließlich ICEs verwendeten, nutzten den Fuhrpark ohnehin kaum.

Eine Befragung durch das Institut für Transportation Design (ITD) Braunschweig unter den Mitarbeitern des ADAC zum Projektende liefert mögliche Gründe, aus denen die geringe E-Fahrzeugnutzung resultierte [76]. Sie ergab, dass viele Mitarbeiter noch keine Erfahrungen (40,7% der Befragten) mit den E-Fahrzeugen gesammelt hatten, jeder sechste war der Elektromobilität gegenüber allgemein skeptisch eingestellt. Der Aussage, dass die Nutzung zu kompliziert sei, oder dass der Befragte auf Grund mangelnder Kenntnis nicht beurteilen könne, ob eine EV-Nutzung für ihn in Frage käme, wurde kaum zugestimmt. Die Sorge, dass die Reichweite des Fahrzeugs nicht für die geplante Fahrt ausreichen würde, war die häufigste Begründung für eine Nichtnutzung der E-Fahrzeuge.

Dass eine Nutzung nicht möglich war, weil das Fahrzeug zur betreffenden Zeit ausgebucht oder nicht verfügbar war, gaben nur 4 von 15 Antwortenden an. Nutzer, die die EVs nutzten berichteten hingegen, überwiegend (71,9% der Befragten) keine Probleme bei der Fahrzeugnutzung gehabt zu haben. Lediglich 9,4% gaben an, dass sie mit dem Fahrzeug Probleme hatten, 21,9% berichteten von Problemen bei der Ladung. Die Buchung der Fahrzeuge stellte in keinem Fall ein Problem dar.

Diese Ergebnisse decken sich auch mit einer Studie des Fraunhofer ISI zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität [77]. Sie identifiziert starke Gewohnheiten und Routinen bei Mobilitätsentscheidungen und –verhalten der Nutzer, denen das konventionelle Fahrzeug als Vergleichsanker dient. Vor allem ein begrenztes Wissen über Elektromobilität stellt ein großes Hindernis für Akzeptanz und Nutzung dar.

Für die Einführung von EVs in einen Unternehmensfuhrpark ist daher zu empfehlen, den Mitarbeitern umfangreiche Testmöglichkeiten anzubieten, damit sie sich vor dem Produktiveinsatz mit den Fahrzeugen und ihren Leistungscharakteristika vertraut machen können. Unterschiede zu herkömmlichen Fahrzeugen müssen kommuniziert und Sorgen der Nutzer adressiert werden.

[8] Anmerkung: Das von den Mitarbeitern der Fuhrpark-Verwaltung für administrative Zwecke genutzte Administrator-Benutzerkonto wurde ausgeblendet

Es ist weiterhin zu erwarten, dass ein Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur in den kommenden Jahren Nutzern die Angst nimmt, ihr Ziel mit der verfügbaren Batterieladung nicht zu erreichen. Dies könnte die Nutzungsquote und die Bereitschaft, die Technik stärker auszureizen, positiv beeinflussen. Auch am Unternehmensstandort vorgehaltene Schnellladeinfrasturktur, welche im betrachteten Projekt erst zum Ende der Laufzeit hin fertiggestellt wurde, ist in der Lage, die Reichweitenangst der Nutzer zu senken und die Fahrzeugausnutzung so zu erhöhen [60].

Zuletzt könnten Maßnahmen des „Nudging“[9] angewandt werden, um Mitarbeiter zur Auseinandersetzung mit der neuen Technik zu bewegen. Etwa indem bei einer Fahrzeugbuchung innerhalb der Reichweite welche ein EV ohne jeden Zweifel zurücklegen kann, dieses Fahrzeug vorgeschlagen oder, als deutlich restriktivere Maßnahme, seine Nutzung sogar verpflichtend wird. Da solche, die freie Entscheidung des Nutzers stark einschränkenden, Maßnahmen jedoch ein großes Risiko der Auslösung einer Abwehrhaltung mit sich bringen, sollte ihr Einsatz sorgfältig abgewogen werden.

3.3. Potentiale zur Auslastungssteigerung

3.3.1. Bedeutung der Auslastung für E-Fahrzeuge

Beim Vergleich des reinen ICE-Fuhrparks und des gemischten Fuhrparks wird erkennbar, dass der gemischte Fuhrpark in der betrachteten Situation weder einen finanziellen, noch einen ökologischen Vorteil erwirken kann, obwohl die EVs im Vergleich mit den ICEs sowohl geringere Kraftstoffkosten, als auch einen geringeren Schadstoffausstoß im Betrieb erzielen.

Begründet ist dies in beiden Fällen darin, dass der Aufwand der Herstellung eines EVs und damit sowohl Schadstoffausstoß als auch Preis ungleich höher sind als beim ICE. Mit der geringen Auslastung der EVs im berechneten Szenario kann dies durch den sparsameren Betrieb nicht ausgeglichen werden.

Um den Energieaufwand der Fertigung auszugleichen und gegenüber einem Verbrennerfahrzeug einen Vorteil zu erzielen, müsste ein EV mit den in Kapitel 3.1.2.3 genannten Kennwerten, bei Betrieb mit dem deutschen Durchschnittsstrom, 14.480,55 km im Jahr zurücklegen. Wird die Nutzung von deutschem Ökostrom unterstellt, sind noch immer 5.252,1 km Fahrleistung im Jahr erforderlich.

Diese wird zwar im Durchschnitt von den EVs erfüllt (vgl. Tabelle 3.5), da sich jedoch ein zusätzliches Fahrzeug im Fuhrpark befindet, liegen die Gesamtemissionen noch immer leicht über denen des ICE-Fuhrparks.

Ein ökologischer Vorteil lässt sich durch die Nutzung von EVs also auch bei vergleichsweise geringer Auslastung erzielen. Jedoch ist das Potential der Fahrzeuge bei weitem nicht ausgeschöpft. Jeder zusätzliche Kilometer, welcher statt mit einem ICE mit einem

[9] dt.: Anstupsen, Beeinflussung des Entscheidungsverhaltens durch Entscheidungsanstöße, ohne jedoch dem Entscheidenden die Möglichkeit der Wahl zu nehmen vgl. z.B. [78]

der EVs zurückgelegt wird, spart weitere 29g CO_2e (Durchschnittsstrom) bzw. 80g CO_2e (Ökostrom) ein, oder sogar mehr, wenn die Produktion eines Fahrzeugs eingespart werden kann.

Ähnlich verhält es sich bei den Kosten. Um unter den in den Abschnitten 3.1.1.3 und 3.1.2.2 genannten Kostensituationen eine Kostengleichheit mit einem ICE zu erreichen, müsste ein EV eine Jahresfahrleistung von 98.723,40 km erreichen.

Die Situation stellt sich somit wie folgt dar. Durch den Umstieg auf EVs werden mehr Fahrzeuge nötig, um eine, einem reinen ICE-Fuhrpark ebenbürtige Deckung des Mobilitätsbedarfs zu ermöglichen. Diese Fahrzeuge sind jedoch deutlich geringer ausgelastet, als die ICEs. Um allerdings einen finanziellen wie ökologischen Vorteil aus dem Betrieb von EVs ziehen zu können, müssen diese eine höhere Fahrleistung erzielen, als es im reinen Betriebseinsatz möglich ist. Im Folgenden wird daher ein Konzept zur Sekundärnutzung der Fahrzeuge auf seine Vereinbarkeit mit dem eigentlichen Diensteinsatz und seine Wirksamkeit bei der Steigerung von Ökologie und Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge untersucht.

3.3.2. Ansatz „Carsharing im Tandem“

Das Carsharing stellt ein Mobilitätskonzept dar, welches in den letzten Jahren besonders in deutschen Metropolen rasant an Bedeutung gewonnen hat. Mittlerweile sind 1,26 Mio. Nutzer in Deutschland bei Carsharingdiensten registriert (Stand 1.1.2016). Damit sind die Nutzerzahlen allein im Vergleich zum Vorjahr um 21,2% gewachsen. In 537 deutschen Orten existiert bereits ein entsprechendes Angebot. Den Nutzern stehen etwa 9.100 Fahrzeuge im stationsbasierten Carsharing und ca. 7.000 im Free-Floating-Modell zur Verfügung [79].

Oft ersetzt das Carsharing zumindest ein Auto im Haushalt des Nutzers. Von den 43,4% der Carsharingnutzer, welche zu Beginn ihrer Teilnahme an einem Carsharing-Angebot noch mindestens ein eigenes Auto unterhielten, besaß weniger als die Hälfte (19% aller Nutzer) nach weniger als einem Jahr der Teilnahme noch ein eigenes Auto [80]. Insbesondere in der Demografie der 18- bis 29-jährigen ist eine deutliche Zunahme der Nutzung von Carsharing-Angeboten zu verzeichnen, während in dieser Gruppe der größte Rückgang der Nutzung eines eigenen Autos zu beobachten ist [81].

Dieser Entwicklung folgend wurde von der Universität Hildesheim ein Geschäftsmodell entwickelt, welches eine betriebliche Nutzung von EVs mit einem Carsharing-Modell verbindet. Dieses sogenannte Tandem-Modell stellt ein im Rahmen des Projekts eAutarke Zukunft entwickeltes Konzept zur Steigerung der Fahrzeugauslastung dar.

Grundidee ist, dass ein Fahrzeug sowohl dienstlich, als auch privat genutzt wird. So sieht dieses eCarsharing-Konzept der Universität in seiner ursprünglichen Ausführung vor, dass sich ein Arbeitgeber und ein Arbeitnehmer die Leasingkosten für ein Fahrzeug teilen. Der Mitarbeiter erhält ein Nutzungsrecht für das Fahrzeug außerhalb seiner Dienstzeiten und am Wochenende. Während der Mitarbeiter hingegen am Arbeitsplatz ist, steht das Fahrzeug im Fahrzeugpool des Arbeitgebers für Dienstfahrten zur Verfügung. Über

ein Webportal werden die Verwaltung und die Buchung des Fahrzeuges realisiert und sichergestellt, dass der Ladestand für die geplanten Fahrten ausreicht [72, S.1621f][73][74].

Diese Konzeption wurde zur empirischen Evaluation im Projektteil des ADAC herangezogen. Hierzu wurden zwei Fahrzeuge vom Typ eGolf, sowie ein Fahrzeug vom Typ Smart ED verwendet. Diese standen über einen Zeitraum von insgesamt neun Monaten hinweg sowohl im allgemeinen Fahrzeugpool für Dienstfahrten bereit, als auch für den Zeitraum von jeweils einem Monat einem „Tandempartner“, also einem Mitarbeiter, welcher das Fahrzeug außerhalb der Dienstzeiten und an Wochenenden privat nutzte, zur Verfügung. Zielsetzung dieser Erhebung war es, herauszufinden, ob das Zusammenspiel aus Infrastruktur und Organisation der Fahrzeugverwaltung in der Lage ist, ein EV auf dem heutigen Stand der Technik mit einer derart hohen Intensität zu nutzen. Gradmesser für den Erfolg sind vor allem die Verfügbarkeit der Fahrzeuge für Dienst- und Privatfahrten, als auch der Aufwand welcher für die Mitarbeiter entsteht, um ein EV zu nutzen. Da dieser organisatorische Aspekt im Vordergrund steht, wurde in diesem ersten Testlauf auf eine Beteiligung der Tandempartner an den Fahrzeugkosten verzichtet. Letztendlich sollte jedoch in einem Produktivbetrieb dieses Modells Ziel sein, einerseits zwei Fahrzeuge (Dienstwagen, Privatwagen) durch eines, das Tandem-Fahrzeug, zu ersetzen und somit ökologische Vorteile zu erschließen, andererseits ist die praktische Umsetzung des Modells nur dann möglich, wenn ein ökonomischer Vorteil für beide Seiten entsteht, also die Kosten für die zwei-Fahrzeug-Alternative unterschritten werden.

3.3.3. Der private Mobilitätsbedarf

Eine erfolgreiche Umsetzung des beschriebenen Carsharing-Ansatzes ist nur möglich, wenn die Fahrzeuge in der Lage sind, den Mobilitätsbedarf des Unternehmens und der Carsharing-Kunden, in diesem Fall der Mitarbeiter des Fuhrparkbetreibers, zu befriedigen. Nachdem der betriebliche Mobilitätsbedarf bereits in Abschnitt 3.1.1.1 analysiert wurde, wird nun der private Mobilitätsbedarf der Mitarbeiter behandelt.

Um eine Aussage über die Verkehrsmittelnutzung der potentiellen Nutzer treffen zu können, wurde im Rahmen dieser Abhandlung eine quantitative Befragung unter den Mitarbeitern des ADAC Niedersachsen/Sachsen-Anhalt durchgeführt (vgl. Anhang). Es wurden insgesamt 85 Personen nach ihren Mobilitätsgewohnheiten befragt. 95,29% von ihnen gaben an, einen PKW zu besitzen. Im Haushalt der Befragten waren zumeist mehrere Fahrzeuge vorhanden. Nur 28,24% gaben an, nur über einen PKW zu verfügen. 48,24% gaben hingegen an, über zwei Fahrzeuge im Haushalt zu verfügen. Bei 20,01% der Befragten betrug diese Zahl sogar zwischen 3 und 5 Fahrzeuge.

Für den Weg zur Arbeit stellte der PKW für mehr als 91,76% der Mitarbeiter das Mittel der Wahl dar (Mehrfachantworten waren bei dieser Frage möglich, 11 Teilnehmer haben Mehrfachangaben gemacht). Öffentliche Verkehrsmittel (10,59%) oder Fahrrad/Pedelec/E-Bike (7,06%) wurden hingegen kaum genutzt.

Der Weg zur Arbeit ist oft kurz. Im Schnitt lag er bei 27 km. Am Tag wurden von den Mitarbeitern mit dem privaten Kfz nur wenige Strecken neben dem Weg zur Arbeit

zurückgelegt. 40% der Befragten legten ausschließlich den Weg zur Arbeit mit ihrem Fahrzeug zurück. Die durchschnittliche Tagesfahrleistung lag bei 57,47 km.

Die Jahresfahrleistung betrug im Durchschnitt 19.313,33 km. Damit hatten die ADAC-Mitarbeiter eine überdurchschnittlich hohe private Jahresfahrleistung (vgl. Abschnitt 2.4). Diese wurde zu annähernd gleichen Teilen in der Stadt, auf Landstraßen, sowie auf Autobahnen zurückgelegt.

Bei elektromobilitätsspezifischen Fragen gab die Hälfte der Mitarbeiter an, außerhalb des Arbeitsplatzes Zugang zu einer Lademöglichkeit für ein E-Fahrzeug zu haben. Ein Fünftel war sich nicht sicher.

Die Ansprüche an ein Fahrzeug lagen bei den Befragten jedoch weit über dem, was zur Bewältigung der alltäglichen Fahrten notwendig wäre. Die gewünschte Reichweite eines E-Fahrzeugs lag bei nur etwa einem Viertel der Mitarbeiter innerhalb des mit den verwendeten Fahrzeugen erzielbaren Bereichs von etwa 140 km. Oft war der Wunsch um ein Vielfaches höher. Im Durchschnitt wurden 306 km Reichweite gefordert, damit ein E-Fahrzeug für die Befragten als Privatfahrzeug in Frage käme.

Eine Gruppe, welche besonders prädestiniert für die Rolle als Tandempartner erscheint, sind die Mitarbeiter, die mit ihrem Fahrzeug nur den Arbeitsweg zurücklegen und im Haushalt über ein weiteres Fahrzeug verfügen. Ein großer Teil der derzeitigen privaten Jahresfahrleistung in Form der Pendelstrecke zur Arbeit könnte mit dem EV absolviert werden, die von den Befragten angeführten Nachteile, wie der zu geringen Reichweite für eine längere Urlaubsfahrt (siehe auch [76]) lassen sich durch das zweite Fahrzeug im Haushalt kompensieren. Für den Tandempartner können sich finanzielle Vorteile durch den nur anteilig zu tragenden Fahrzeugunterhalt ergeben, für das Unternehmen sinkt die finanzielle Belastung durch Betrieb des EVs, die Allgemeinheit profitiert von der Senkung der Emissionen.

Von den befragten 85 Personen erfüllten 34 Personen die Kriterien einer Tagesfahrleistung von maximal 140 km, einem Interesse an der Nutzung eines EVs und dem Vorhandensein einer privaten Lademöglichkeit. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass es innerhalb des Unternehmens eine Zielgruppe für das Tandemangebot gibt.

3.3.4. Potentiale eines Carsharingansatzes

Es ist nun zu klären, wie groß das Potential für eine Doppelnutzung von Fahrzeugen in der betrachteten Fahrzeugflotte ist. Aus der Analyse des privaten Mobilitätsbedarfs lässt sich die folgende Zeiteinteilung abstecken. Ein in Vollzeit beschäftigter Mitarbeiter verbringt täglich acht Stunden Arbeitszeit und eine halbe Stunde vorgeschriebene Pause am Unternehmensstandort. Ein Fahrzeug, welches sowohl dienstlich, als auch privat genutzt werden soll, steht somit maximal 8,5 Stunden für dienstliche Zwecke zur Verfügung.

Es wird von einem Dienstbeginn um 8:00 Uhr ausgegangen und angenommen, dass die Arbeitszeit über die Woche hinweg gleichbleibend konstant ist. Mit dem Tandemmodell vereinbar sind somit Fahrten, die sich über weniger als 140 km Strecke erstrecken (Bedin-

gung für eine EV-Nutzung) und nicht vor 08:00 Uhr beginnen und nicht nach 16:30 Uhr enden.

Werden die im Kapitel 3.1.2 identifizierten 476 Fahrten mit einer Strecke von maximal 140 km nach diesen Kriterien gefiltert, bleiben 222 Fahrten (46,64%) übrig (ohne Berücksichtigung der Reichweitenrestriktion fallen 374 (45%) der 830 Fahrten des Fuhrparks in die Kategorie der Buchungen mit maximal 8,5 Stunden Dauer). Nur fünf dieser Fahrten erstrecken sich über einen Zeitraum von mehr als sieben Stunden. Von diesen weisen wiederum nur zwei eine Fahrstrecke von über 50 km auf. Es ist daher davon auszugehen, das es kein Problem ist, zumindest ein mal am Tag an der dienstlichen Ladeinfrastruktur (Annahme: 22 kW) eine Vollladung durchzuführen. Legt der Tandempartner den Weg zur Arbeit mit einem über Nacht geladenen Fahrzeug zurück, würde dieses im Schnitt bei Ankunft am Unternehmensstandort noch über 113 km Reichweite verfügen. Erfolgte keine Ladung über Nacht und wurde nur die Strecke zwischen Wohn- und Arbeitsort zurückgelegt, ist noch von einer durchschnittlichen Ladung von 86 km auszugehen. Es ist somit möglich, selbst direkt nach Ankunft des Tandempartners am Arbeitsplatz eine Dienstfahrt zu beginnen. Eine Wiederherstellung des vollen Ladezustands ist mit einer AC-Ladung von 22 kW in weit unter einer Stunde möglich. Mit geeigneter Schnellladeinfrastruktur wäre sogar ein nahezu leerer Fahrzeugakku bei Ankunft auf dem Betriebsgelände innerhalb kürzester Zeit zu kompensieren (vgl. Abbildung 3.6, welche genau diese Situation abbildet).

Um die Fahrleistung eines Fuhrparks mit Tandemfahrzeug(en) zu ermitteln, werden nun die 476 potentiellen EV-Fahrten unter Verwendung der Verteilungsheuristik auf drei Fahrzeuge verteilt. Dabei erfolgt zunächst die Verteilung der 222 mit dem Tandemmodell kompatiblen Fahrten. Im Folgenden werden mögliche Tandemfahrzeuge als EV i_t gekennzeichnet, während rein dienstlich zu nutzende Fahrzeuge die Bezeichnung EV i_d erhalten.

EV 1_t würde 165 Fahrten aufweisen, eine Strecke von 6.158 km zurücklegen und dafür 532,93 Stunden Zeit benötigen. Da diese Fahrleistung nicht unter derer der ersten drei EVs aus Tabelle 3.4 liegt, welche in den gemischten Fuhrpark aufgenommen wurden, ist die Fahrleistung dieses Fahrzeugs zunächst nicht als Ausschlusskriterium anzusehen.

EV 2_t hingegen könnte nur 40 Fahrten absolvieren. Die dabei erreichbare Strecke läge bei 1.427 km, die Fahrzeit betrüge 106,47 Stunden. Damit liegt die Fahrleistung gravierend unter der, die ein rein dienstlich genutztes EV erbringen könnte. Es wird daher nur ein Tandemfahrzeug in den Fuhrpark aufgenommen. Die restlichen identifizierten Fahrten mit Strecken von max. 140 km werden auf zwei weitere EVs aufgeteilt, um einen Vergleichsfuhrpark zu dem in Abschnitt 3.1.2.1 Aufgestellten zu modellieren. Das Ergebnis ist in Tabelle 3.8 aufgeführt.

Im Vergleich zum bisherigen gemischten Fuhrpark (vgl. Abschnitt 3.1.2.1) steigt die nicht von den Fahrzeugen absolvierbare Strecke von 8.143 km (5,28% der Gesamtfahrleistung des Fuhrparks) auf 10.010 km (6,49%). Somit lägen die Kosten für den Fremdbezug von Mobilitätsleistungen leicht über denen der vorangegangenen Berechnung.

Tabelle 3.8.: Modell Tandemfuhrpark

Fahrzeug	**Fahrten**	**%**	**Strecke in km**	**%**	**Zeit in h**	**%**
ICE 1	132	15,90	46.934	30,43	5.223,77	23,08
ICE 2	112	13,49	40.225	26,08	3.428,62	15,15
ICE 3	60	7,23	24.490	15,88	2.435,17	10,76
ICE 4	39	4,70	14.020	9,09	1.062,47	4,69
EV 1_t	165	19,88	6.158	3,99	532,93	2,35
EV 1_d	138	16,63	8.034	5,21	4.097,05	18,10
EV 2_d	81	9,76	4.357	2,83	2.299,33	10,16
Fremd	103	12,41	10.010	6,49	3.558,42	15,72

Im Gegenzug für diese leichte Verschlechterung der Eigendeckungsquote ist nun eines der EVs außerhalb der Kernarbeitszeiten nicht mit Dienstfahrten belegt und kann einer Sekundärnutzung zugeführt werden.

Eine pessimistische Schätzung des Nutzungspotentials in diesem Zeitraum sieht wie folgt aus. Ein Mitarbeiter verwendet das Fahrzeug ausschließlich für seine Fahrten zwischen Wohn- und Arbeitsort. Für diese wird der Unternehmensdurchschnitt von 27 km angenommen. Wird von fünf Arbeitstagen je Woche ausgegangen und 30 Urlaubs- und Feiertagen, finden im Jahr 230 Besuche der Arbeitsstätte statt. Für Hin- und Rückfahrten summiert sich damit die private Jahresfahrleistung des Mitarbeiters auf 12.420 km. Zusammen mit dem dienstlichen Fahrpensum würde das Tandemfahrzeug damit eine Jahresfahrleistung von 18.578 km erreichen. Diese Jahresfahrleistung würde im betrachteten Zeitraum der Dienstnutzung von sechs Jahren zu einer Gesamtfahrleistung von 111.468 km führen. Die angenommene Batterielebensdauer von 160.000 km wird nicht überschritten. Eine Überbelastung des Fahrzeugs ist nicht zu befürchten.

Die in Abschnitt 3.3.1 angeführte Streckenuntergrenze in Höhe von 14.480,55 km im Jahr für einen Emissionsvorteil durch die Nutzung eines EVs bei Nutzung des deutschen Durchschnittsstroms wäre somit deutlich überschritten. Das EV verursacht 118,83 kg CO_2e Emissionen pro Jahr weniger, als ein mit derselben Intensität genutztes Verbrennerfahrzeug. Sollte der Nutzer jedoch nicht nur seinen Privatwagen für den Weg zur Arbeit stehen lassen, sondern vollständig auf die Anschaffung eines ICEs verzichten, also etwa statt eines Zweitwagens in einem Haushalt mit zwei Berufstätigen ein Carsharingfahrzeug einsetzen, ergäbe sich zusätzlich die Einsparung der auf das Jahr umgelegten Fertigungsemissionen eines ICEs in Höhe von 504,20 kg CO_2e.

Werden die Jahresemissionen des Fahrzeugs anteilig nach Fahrzeugnutzung auf Unternehmen (ca. 1/3 bzw. 33,15%) und Tandempartner (ca. 2/3 bzw. 66,85%) umgelegt, entfallen für die Situation der Durchschnittsstromnutzung auf das Unternehmen 942,40 kg CO_2e, auf den Tandempartner 1.895,51 kg CO_2e. Bei der Nutzung von Ökostrom entfielen auf das Unternehmen 628,34 kg CO_2e und auf den Tandempartner 1.262,09 kg CO_2e.

Ein Vergleich macht deutlich, wie groß das Einsparpotential ist. Würde der Tandempartner den Weg zur Arbeit mit einem vergleichbaren eigenen PKW zurücklegen (An-

nahme: Nutzung VW Golf, siehe auch Abschnitt 3.1.1.4), betrügen die Jahresemissionen durch die Privatnutzung 2.143,64 kg CO_2e.

Die Auswirkungen des Tandemmodells auf die Emissionen des Unternehmensfuhrparks, analog zur Berechnung in Abschnitt 3.1.2.3 aufgestellt, verdeutlicht Tabelle 3.9.

Tabelle 3.9.: Tandem-Fuhrpark Emissionen

Fahrzeug	**kg CO_2e Durchschnittsstrom**	**kg CO_2e Ökostrom**
ICEs	18.605,11	18.605,11
EVs $1, 2_d$	3.125,01	2.493,07
EV 1_t	942,40	628,34
Fremd	1.489,39	1.489,39
Summe	**24.161,91**	**23.215,91**

Durch höhere Fremdbezüge von Mobilitätsleistungen resultiert aus der Veränderung für das Unternehmen nur eine minimale Verbesserung der Emissionen gegenüber dem in Abschnitt 3.1.2.3 betrachteten gemischten Fuhrpark. Diese beläuft sich auf eine Emissionsreduktion von jährlich 562,11 kg CO_2e (2,27%) bei der Nutzung von Durchschnittsstrom oder 466,89 kg CO_2e (1,97%) bei der Nutzung von Ökostrom. In beiden Fällen liegen die jährlichen Emissionen über denen des ICE-Fuhrparks aus Abschnitt 3.1.1.4. Nur in einer ganzheitlichen Betrachtung lässt sich eine Reduktion der Gesamtemissionen im Falle der Ökostromnutzung gegenüber dem ICE-Fuhrpark feststellen.

Tabelle 3.10.: Tandem-Fuhrpark, Kosten in EUR

Fahrzeug	**Fixkosten**	**Fahrtkosten**	**Gesamt**
ICE 1	5.365,67	3.337,01	8.702,68
ICE 2	5.365,67	2.860,00	8.225,67
ICE 3	5.365,67	1.741,24	7.106,91
ICE 4	5.365,67	996,82	6.362,49
EV 1_t	2.442,78	322,06	2.764,84
EV 1_d	7.328,34	420,18	7.748,52
EV 2_d	7.328,34	227,87	7.556,21
Fremd		3.003,00	3.003,00
Summe			**51.470,32**

Neben den Auswirkungen des Tandemmodells auf die Fuhrparkemissionen sind die Auswirkungen auf die Fuhrparkkosten zu klären, welche in der Praxis das stärkste Entscheidungsargument für oder gegen das Tandemmodell darstellen werden.

Für die Kostenbestimmung wird unterstellt, dass der Tandempartner die Kosten für die auf private Fahrten entfallende Stromnutzung in voller Höhe trägt. Weiterhin werden die

Fixkosten des Fahrzeugs von jährlich 7.328,34 EUR (7.221,67 EUR Abschreibungen, Versicherung etc., vgl. Abschnitt 3.1.2.2 und 106,67 EUR Abschreibungen Ladeinfrastruktur, vgl. Abschnitt 3.1.3) anteilig nach der Fahrzeugnutzung auf Unternehmen und Tandempartner verteilt.[10] Somit entfallen auf das Unternehmen mit 1/3 der Nutzung 2.442,78 EUR, auf den Tandempartner mit 2/3 Nutzungsanteil jährlich 4.885,56 EUR.

Die Fuhrparkkosten würden nach dieser Verteilung von den in Kapitel 3.1.3 ermittelten Gesamtkosten von 55.923,41 EUR auf 51.470,32 EUR/Jahr sinken (siehe Tabelle 3.10). Dies stellt einen deutlichen Rückgang dar, allerdings ist dieser nicht ausreichend, um den Unterschied zum ICE-Fuhrpark mit Kosten von 40.178,34 EUR (vgl. Abschnitt 3.1.1.3) zu kompensieren.

Um den Einfluss des Tandemmodells in Relation zu setzen eignet sich ein Blick auf die Kilometerkosten. Das Tandemfahrzeug ist mit 0,45 EUR je km genau so teuer, wie das teuerste ICE bzw. 0,17 EUR teurer als ein durchschnittliches ICE. Damit ist es 0,15 EUR teurer als der Fremdbezug von Mobilität. Jedoch ist es 0,50 EUR günstiger als das zweitgünstigste (das erste rein dienstlich betriebene) EV.

Der Unterschied durch das Tandemmodell ist deutlich erkennbar. Trotz der zusätzlichen Nutzung, liegt die dienstlich zurückgelegte Strecke des Tandemfahrzeugs etwa im Mittel zwischen der, der beiden anderen EVs. Weiterhin legt es die größte Anzahl an Fahrten im betrachteten Fuhrpark zurück (vgl. Tabelle 3.8). Das mangelnde Tandempotential des Fuhrparks ist also vor allem in den langen Fahrzeiten und den außerhalb des Tandemzeitraums liegenden Nutzungsfällen begründet. Könnten die Fixkosten der anderen EVs im Fuhrpark auch auf Tandemniveau abgesenkt werden, wäre eine Annäherung auf 1.663,08 EUR/Jahr Mehrkosten an den reinen ICE-Fuhrpark möglich.

Neben der betrieblichen Situation darf der Nutzen für den Tandempartner nicht außer acht gelassen werden. Da dieser durch Nutzung des Tandemmodells eine geringere Flexibilität bei der Fahrzeugnutzung in Kauf nimmt, muss sich für ihn ein anderer Vorteil ergeben, damit er das Modell überhaupt in Betracht zieht. Eine Senkung seines CO_2-Footprints alleine dürfte für die meisten Mitarbeiter kein ausreichender Anreiz sein (vgl. Abschnitt 3.2.3: Umweltauswirkungen bei Entscheidung für Verkehrsmittel deutlich weniger wichtig als z.B. Kosten). Daher ist insbesondere die Kostenentwicklung für den Tandempartner interessant. Unter der Annahme, dass ein Mitarbeiter alternativ zur Teilnahme am Tandemprogramm ein gleichwertiges Fahrzeug selbst unterhalten würde, lägen die jährlichen Kosten für einen entsprechenden Verbrenner bei den bereits in Kapitel 3.1.1.3 bestimmten 5.365,67 EUR zuzüglich der Kraftstoffkosten für 12.420 km von 883,06 EUR. Die jährlichen Kosten für dieses ICE würden sich somit auf 6.248,73 EUR (0,5 EUR/km) belaufen. Das Tandem-EV hingegen würde nutzungsunabhängige Kosten von 4.885,56 EUR, sowie Stromkosten in Höhe von 649,57 EUR verursachen. Die Jahreskosten würden sich auf 5.535,13 EUR (0,45 EUR/km) belaufen. Der Mitarbeiter könnte somit eine Kostenersparnis von 713,60 EUR im Jahr erzielen. Dieser Kostenvorteil könnte durch eine

[10] Auf die rechtlichen Vorschriften, nach welchen eine solche Umverteilung in der Praxis zu regeln ist, wird im folgenden Kapitel näher eingegangen

intensivere Nutzung noch ausgebaut werden, da durch die geringeren Betriebskosten des EVs jeder zusätzliche Kilometer, welchen der Tandempartner statt in einem ICE im Tandemfahrzeug zurücklegt, ihm eine zusätzliche Kostenersparnis verschafft.

Zuletzt ist zu erwähnen, dass um das hier identifizierte Tandempotential erschließen zu können, es in der Praxis eines entsprechenden Managements der Fahrzeugbuchungen bedarf. Fahrten unter 140 km innerhalb der Tandemzeiten müssen dem Tandemfahrzeug zugewiesen werden. Ist dies nicht möglich, oder liegen die Fahrten außerhalb des Tandemzeitraums, sind sie auf die rein dienstlichen EVs zu legen. Nur wenn die Fahrten eine Strecke von 140 km übersteigen, oder die EVs ausgebucht sind, sind die ICEs einzusetzen.

3.3.5. Rechtliche Situation

Geregelt wird die private Nutzung eines betrieblichen Kraftfahrzeugs im Einkommenssteuergesetz (EStG). Sie stellt einen Nutzungswert dar, welchen der Arbeitnehmer, der das Fahrzeug privat nutzt, versteuern muss. Dieser Wert kann auf zwei Arten ermittelt werden. Die sogenannte 1%-Methode sieht vor, dass für ein Fahrzeug, welches mindestens zu 50% betrieblich genutzt wird, ein monatlicher Betrag in Höhe von 1% des inländischen Listenpreises zum Zeitpunkt der Erstzulassung anzusetzen ist [82, §6.4]. Zusätzlich werden für Fahrten zwischen Wohn- und Arbeitsort für jeden Kilometer Entfernung 0,03% des Listenpreises pro Monat veranschlagt [82, §8.2]. Anzumerken ist, dass die Fahrten zwischen Wohnung und Arbeitsstätte nicht der Privat-, sondern der Erwerbssphäre zuzuordnen sind [83]. Eine Anwendung der 1%-Regelung ist für das im vorangegangenen Kapitel aufgestellte Nutzungsszenario somit möglich (betriebliche Nutzung >50%).

Für reine Elektrofahrzeuge sowie extern aufladbare Hybridfahrzeuge kann der Listenpreis um den in ihm enthaltenen Teil, welcher auf das Batteriesystem entfällt, gemindert werden. Hierzu durften initial je kWh Batteriekapazität 500 EUR vom Listenpreis abgezogen werden. Seit 2013 wird dieser Wert jährlich um 50 EUR reduziert. Begrenzt war der insgesamt vom Listenpreis abzuziehende Wert auf 10.000 EUR für das Jahr 2013. Er wird jährlich um 500 EUR gesenkt [82, §6.4].

Rechenbeispiel für einen 2015 angeschafften eGolf mit einem Listenpreis von 34.900 EUR mit einer Batteriekapazität von 24,2 kWh, bei einer Entfernung zwischen Wohn- und Arbeitsort von 27 km:

Listenpreis abzüglich Batterieminderung:

$$34.900 - [(24,2 * 400)|9.000] = 34.900 - 9.000 = 25.900 \tag{3.8}$$

1 % des (geminderten) Listenpreises:

$$25.900 * 0,01 = 259 \tag{3.9}$$

0,03% des (geminderten) Listenpreises je km zwischen Wohn- und Arbeitsort:

$$25.900 * 0,0003 * 27 = 209,79 \tag{3.10}$$

Monatlich zu versteuernder Nutzungswert insgesamt:

$$259 + 209,79 = 468,79 \tag{3.11}$$

Alternativ können statt dieser Pauschale auch die tatsächlich durch Privatfahrten entstandenen Fahrzeugkosten, nachgewiesen durch Belege und ein Fahrtenbuch, als Nutzungswert angesetzt werden. Auch in diesem Fall können die anfallenden Aufwendungen bei EVs oder PHEV nach dem o.g. Schema gemindert werden [82, §6.4].

Grundlegend für das Tandemmodell erforderlich ist jedoch der Beschluss, dass Zahlungen des Arbeitnehmers an den Arbeitgeber, oder auf dessen Weisung hin an Dritte, für die private Nutzung eines betrieblichen Fahrzeugs den Nutzungswert mindern [84]. Zahlt der Nutzer also einen adäquaten Anteil an den Fahrzeugkosten im Gegenzug für die private Nutzung an den Arbeitgeber, welcher das Tandemmodell anbietet, hat er keine zusätzliche Steuerlast.

Zusätzlich hat der Arbeitgeber die Möglichkeit, die Lohnsteuer in Höhe der Werbungskosten, welche der Mitarbeiter für Fahrten zwischen Wohnung und erster Tätigkeitsstrecke geltend machen könnte, mit 15% zu pauschalisieren. Die Entfernungspauschale liegt bei 0,3 EUR je vollem Kilometer zwischen Wohn- und Arbeitsstätte. Aus Vereinfachungsgründen kann eine Nutzung des Fahrzeugs von 15 Tagen je Monat (180 Tage/Jahr) angenommen werden. Der Mitarbeiter kann dann keine Werbungskosten für diese Strecken mehr geltend machen [82, §40 Abs. 1 S. 2]. Bei den hier angenommenen 27 km zwischen Wohn- und Arbeitsort:

$$15 * 0,3 * 27 = 121,50 \tag{3.12}$$

Der durch den Tandempartner zu versteuernde Betrag entspricht somit dem nach der 1% Regelung bestimmten geldwerten Vorteil abzüglich der Anteile an den Fahrzeugkosten, die der Nutzer an den Arbeitgeber zahlt, abzüglich der pauschal besteuerten Fahrten:

$$468,79 - 407,13 - 121,50 = -59,84 \tag{3.13}$$

Zahlt der Tandempartner den monatlich Betrag 407,13 EUR (2/3 der EV-Fixkosten je Monat), entsteht somit kein zu versteuernder Nutzungswert. Der den steuerlichen Nutzungswert übersteigende Betrag führt dabei weder zu negativem Arbeitslohn, noch zu Werbungskosten [84].

3.3.6. Betrieb des Tandemmodells in der Praxis

Für die Erprobung des Tandemmodells wurden drei Fahrzeuge, zwei des Typs eGolf und ein Smart ED, außerhalb der Arbeitszeiten den sogenannten Tandempartnern zur Verfügung gestellt. Üblicherweise wurde das Zeitfenster von 16:00 Uhr bis 09:00 Uhr des Folgetages, sowie die Wochenenden für den Tandemnutzer freigehalten. Teilweise wurden diese Zeiträume auch gegeneinander verschoben (z.B. 7:00 bis 15:30 und 10:00 bis 18:00), um einen größeren Zeitraum zur dienstlichen Nutzung abdecken zu können. Der dritte für das Projekt geleaste eGolf wurde nur ersatzweise im Tandemmodell genutzt.

Üblicherweise stand er voll für den Diensteinsatz zur Verfügung, um auch Dienstfahrten außerhalb des 9:00 bis 16:00 Zeitfensters absolvieren zu können.

Für eine Teilnahme an diesem Programm mussten sich die Mitarbeiter bewerben. Ein Fahrzeug wurde jeweils für den Zeitraum von einem Monat an einen Mitarbeiter vergeben. Insgesamt haben sich 41 Personen auf dieses Programm beworben. Hauptsächlich waren die Fahrzeuge vom Typ eGolf gefragt. Zwar wurden die Mitarbeiter in der Testphase nicht an den Fahrzeugkosten beteiligt, jedoch wurde dies in der Planungsphase in Erwägung gezogen und so den Mitarbeitern gegenüber kommuniziert. Ein Großteil der Bewerbungen ging bereits zu dieser Zeit ein. Ein grundsätzliches Interesse der Mitarbeiter, eine solche Leistung gegen Bezahlung in Anspruch zu nehmen, konnte damit festgestellt werden. Die Kosten für Ladungen, welche nicht an der ADAC Ladeinfrastruktur, während der Privatnutzung durchgeführt wurden, trugen die Teilnehmer selbst.

Von den 41 Bewerbern nahmen im Zeitraum von Oktober 2015 bis einschließlich Juni 2016 22 Mitarbeiter am Tandemprogramm teil. Ihre Fahrten innerhalb dieser Zeiträume dokumentierten die Nutzer in Berichtsheften (vgl. Anhang).

Im Erprobungszeitraum waren eGolf 2 & 3 in jedem Monat vergeben. Der Smart ED war, wegen mangelnden Interesses der Nutzer an einem Fahrzeug dieser Größenklasse, nur für fünf Monate als Tandemfahrzeug im Einsatz. Es wurden neben der dienstlichen Nutzung in der Summe 30.909,60 km im Tandemprogramm in den neun Monaten zurückgelegt. Insgesamt wurden 466 Tandemreservierungen, jeweils für die Zeit von Dienstende bis Dienstbeginn, inklusive der Wochenenden, angelegt. Die monatliche Fahrleistung (ausschließlich Tandem) lag bei eGolf 2 & 3 im Schnitt bei 1.521,06 km, beim Smart ED betrug sie 533,3 km. Die Entfernung zwischen Wohn- und Arbeitsort der Teilnehmer lag bei durchschnittlich 25,5 km. Die im Programm erreichte Höchstleistung von 3.987 km wurde im eGolf 3 im Monat Mai erzielt. In dieser Zeit nutzte ihn ein Mitarbeiter zum Pendeln zwischen seinem Wohnsitz in Wolfsburg und der Arbeitsstätte in Laatzen. Damit wurde eine Strecke von 105 km je Richtung[11] zurückgelegt. Durch die in Laatzen verfügbare CCS-Ladesäule mit 50 kW Nennleistung konnte trotzdem eine dienstliche Nutzung des Fahrzeuges ermöglicht werden.

Der Vollständigkeit halber ist zu den Fahrleistungen durch die Tandemnutzer anzumerken, dass die Nutzungszeiträume von einem Monat je Teilnehmer so gelegt wurden, dass sich diese nicht mit Urlauben oder anderen Abwesenheitszeiten des Mitarbeiters überschnitten, in denen das Fahrzeug vollständig im Unternehmen verblieben wäre. Es ist daher davon auszugehen, dass die durchschnittliche Fahrleistung je Monat, die ein langfristiger Tandempartner bei gleicher Nutzungsintensität zurücklegen würde, geringfügig niedriger ausfallen würde.

Die Auslastungssteigerung der Fahrzeuge durch das Tandemmodell ist deutlich erkennbar. Während der fast ausschließlich dienstlich genutzte eGolf im betrachteten neunmonatigen Nutzungszeitraum im Projekt insgesamt eine zurückgelegte Strecke von 4.830 km aufwies, betrug dieser Wert in den beiden im Tandemmodell genutzten eGolf-Fahrzeugen

[11] Quelle: Openstreetmap.org

12.134,6 km bzw. 16.658,5 km. Davon entfielen jeweils 11.648,6 km bzw. 15.730,5 km auf Tandemfahrten. Der Smart ED leistete insgesamt 3.629,5 km, davon 2.718 km im Tandemmodell (siehe Abbildung 3.10).

Auf ein Jahr hochgerechnet würden somit beide Tandemfahrzeuge vom Typ eGolf eine Fahrleistung oberhalb der in Abschnitt 3.3.1 kalkulierten Mindestfahrleistung für einen ökologischen Vorteil bei Verwendung des deutschen Durchschnittsstroms aufweisen. Die ökologische Vorteilhaftigkeit des Tandemmodells lässt sich somit bereits ohne die Berücksichtigung eines möglicherweise wegfallenden, privaten PKWs, praktisch belegen.

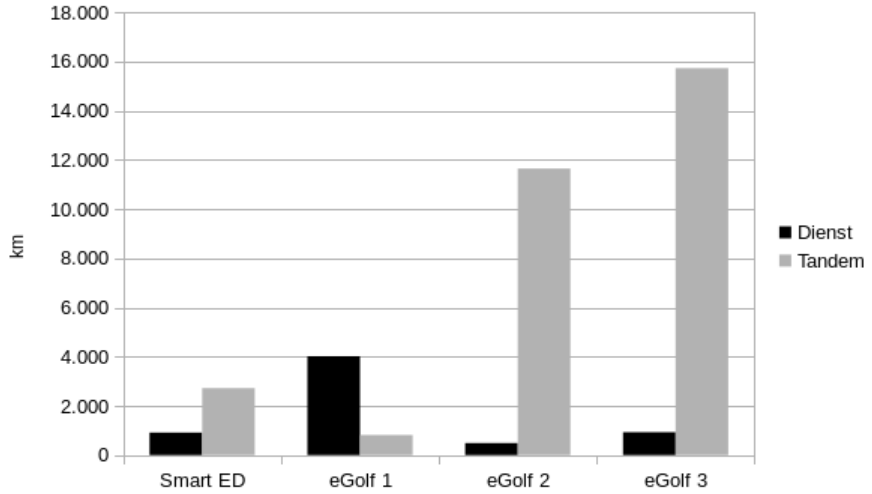


Abbildung 3.10.: Verhältnis von Dienstnutzung und Tandemnutzung

Zu klären ist nun die Frage, wie der Einsatz des Tandemmodells die dienstliche Fahrzeugnutzung beeinflusst. Die für das EV 1_t prognostizierte dienstliche Fahrleistung von 6.158 km pro Jahr bzw. 4.618,5 km in neun Monaten konnte von keinem der Tandemfahrzeuge auch nur ansatzweise erreicht werden. Die gesamte dienstliche Fahrleistung der Tandemfahrzeuge in den betrachteten neun Monaten liegt bei 2.326 km, nur etwa der Hälfte der von einem Fahrzeug zu erwartenden Fahrleistung.

Es lies sich beobachten, dass 62% der Dienstfahrten der beiden eGolf-Tandemfahrzeuge im betrachteten Jahr in Zeiträumen lagen, in denen keine ICEs zur Verfügung standen. Dies legt den Schluss nahe, dass die bereits in Abschnitt 3.2.3 behandelten Nutzervorbehalte einen großen Einflussfaktor darstellten. Die EVs wurden vornehmlich genutzt, wenn keine andere Option vorhanden war. Solange es möglich war, griffen viele Nutzer auf die gewohnten ICEs zurück. Die hohe Fahrzeugzahl im Fuhrpark begünstigte dieses Vermeidungsverhalten. Nur ein kleiner Mitarbeiterkreis (vgl. auch Abbildung 3.9) griff im Dienstalltag auch trotz Verfügbarkeit von Alternativen auf die EVs zurück.

Zusammenfassend lässt sich daher die Aussage treffen, dass die Nutzung der Tandemfahrzeuge im Diensteinsatz durchaus möglich ist. Die geringe Anzahl an erfassten Fahrten

lässt jedoch kaum eine tiefergreifende Analyse zu, ob eine hohe Auslastung in der Praxis zu möglicherweise bisher nicht in Betracht gezogenen Problemen führen kann.

Im erfassten Anwendungsszenario stellte sich die Nutzung der Ladeinfrastruktur wie folgt dar. Die zwei Tandemfahrzeuge von Typ eGolf nahmen morgens die Schnellladesäule in Anspruch. Der dienstlich genutzte eGolf konnte üblicher Weise über Nacht langsam geladen werden. Der Smart ED lud über 22 kW semi-schnell und konkurrierte nicht um die DC-Lademöglichkeit. Somit war zumindest ein Tandem-Fahrzeug kurz nach Ankunft durch die Nutzung der Schnellladesäule direkt wieder einsatzbereit. Durch die geringe Entfernung zwischen Wohn-und Arbeitsort der Mitarbeiter war oft noch nicht einmal eine Schnellladung erforderlich. Von den Tandemfahrzeugen wurde nur für 19% der Ladevorgänge (sowohl für die Dienstnutzung, als auch außerhalb) auf Schnellladeinfrastruktur zurückgegriffen. 81% der Ladungen konnten bei 3,6 kW erfolgen. Insgesamt erfolgten 67,76% der Ladungen an der ADAC-eigenen Infrastruktur, 32,24% führten die Tandemnutzer an heimischen Steckdosen oder öffentlicher Ladeinfrastruktur durch.

Nachteilig an der Schnellladung war, dass das Fahrzeug nach Beendigung des Ladevorgangs umgeparkt werden musste, um die Lademöglichkeit für andere Fahrzeuge frei zu machen. Dieses Problem bestand bei der redundant ausgelegten AC-Ladeinfrastruktur nicht. Durch die geringe Anzahl an Fahrten mit den EVs insgesamt, konnten keine nennenswerten Konflikte bei der Nutzung der Ladeinfrastruktur festgestellt werden. Bei intensiverer Nutzung könnte insbesondere in den Morgenstunden (vgl. Peak in der Fahrzeugnutzung in Abbildung 3.4) direkt nach Ankunft der Tandemfahrzeuge die Nachfrage nach Schnellladungen das Angebot übersteigen. Es sollte daher in Erwägung gezogen werden, diese Knappheitssituation durch Abbildung der Schnellladesäule im Buchungsportal und die Einbeziehung ihrer Auslastung in die Fahrtplanung (mit Plausibilitätsprüfung) zu managen.

Die Resonanz der Nutzer des Tandem-Modells war überwiegend positiv, teilweise wurde jedoch etwa von Problemen mit öffentlicher Ladeinfrastruktur berichtet. Oft wurde der Wunsch nach mehr Reichweite der Fahrzeuge für private Fahrten geäußert. Als Fahrzeug für den Arbeitsweg wurden die E-Fahrzeuge nahezu durchweg als tauglich befunden. Nur ein Nutzer brach die Partnerschaft vorzeitig ab. Besonders das ruhige Fahrverhalten und die hohe Beschleunigung wurden gelobt. Ein Großteil der Nutzer hätte die Nutzungszeit gerne verlängert. Für viele von ihnen käme ein E-Fahrzeug zwar nicht als Erst-, jedoch als Zweitwagen in Betracht. Für einen Haushalt mit zwei Arbeitnehmern und einem Fahrzeug könnte das Tandem-Modell daher eine Alternative zum Zweitwagen darstellen, welche bei einem entsprechenden Bezahlmodell Arbeitnehmer und Arbeitgeber einen Vorteil verschaffen würde.

Die Befragung der Tandempartner zum Projektende durch das ITD [76] behandelte auch diese Aspekte. Sie ergab, dass die Bereitschaft an einer hypothetischen kostenpflichtigen Teilnahme am Tandemprogramm in dieser Gruppe eine vorwiegend wirtschaftliche Entscheidung darstellt. Wenn es ihnen möglich wäre, durch das Sharing im Vergleich zur Nutzung des Privatwagens einen ökonomischen Vorteil zu erzielen, wären ca. 2/3 der

Befragten an der Teilnahme interessiert. Für einige der Tandempartner wäre sogar eine langfristige Teilnahme und der Verzicht auf einen eigenen PKW eine Option. Unter der gesamten befragten Belegschaft (n=54, von 93 Mitarbeitern am Standort) war die Teilnahme für ca. 55% unwahrscheinlich oder ausgeschlossen. Ein weiteres Drittel war unentschlossen. Wahrscheinlich oder ganz sicher zu einer längeren Teilnahme bereit waren je 5,6%, insgesamt also 11,2% oder 6 Personen. Damit liegt die Zahl der möglichen Partner bereits in dieser Subgruppe der befragten Mitarbeiter über dem Einsatzpotential für Tandemfahrzeuge im Unternehmensfuhrpark.

Ein weiteres interessantes Ergebnis dieser Befragung ist die unterschiedliche Einschätzung der Fahrzeuge von unterschiedlichen Mitarbeitergruppen. Mitarbeiter, welche nicht am Tandemprogramm teilgenommen hatten, äußerten als größte Sorge, die sie von einer Teilnahme am Tandemprogramm abhalten würde, Zweifel, dass die begrenzte Reichweite für ihre alltäglichen Fahrten ausreichen würde. Mitarbeiter, welche bereits am Tandemprogramm teilgenommen hatten, machten sich hingegen eher über die Wirtschaftlichkeit einer Teilnahme oder die Festlegung auf bestimmte Arbeitszeiten Gedanken.

Vom organisatorischen Standpunkt betrachtet erweist sich das Modell für einen Teil der Fahrzeugflotte als anwendbar. Da allerdings viele Dienstfahrten außerhalb der Kernarbeitszeiten stattfinden, könnte etwa im Fall des ADAC jedoch keine Umstellung des gesamten Fuhrparks auf dieses Modell erfolgen. Nur für einen kleinen Teil der Fahrzeuge kann das Tandemmodell eine wirksame Maßnahme zur Steigerung der Fahrzeugauslastung darstellen (vgl. Abschnitt 3.3.4).

Es zeigt sich weiterhin, dass die Möglichkeit einer Schnellladung (>=22kW) der Fahrzeuge auf dem Betriebsgelände hilft, eine Vereinbarkeit von betrieblicher und privater Nutzung zu ermöglichen und eine hohe Verfügbarkeit der Fahrzeuge sicherzustellen. Ohne diese sind weite Fahrten zwischen Wohn- und Arbeitsort des Tandempartners kaum mit einer dienstlichen Nutzung des Fahrzeugs vereinbar, da das Fahrzeug in diesem Fall einen beträchtlichen Anteil des Arbeitstages, wegen der nötigen Fahrzeugladung, nicht für dienstliche Zwecke nutzbar wäre.

Allerdings zeigen sich in der Praxis vereinzelt auch Problemfälle, für die noch keine optimale Lösung gefunden wurde. So steht etwa das Fahrzeug bei einem überraschenden Krankheitsfall des Mitarbeiters nicht für die dienstliche Nutzung zur Verfügung. In diesem Fall kann es schwierig sein, kurzfristig einen Ersatz für die ausgefallene Mobilitätsleistung zu beschaffen.

Zusammenfassend lässt sich das Tandem-Modell als technisch durchaus umsetzbar einstufen. Schnellladem̈oglichkeiten können eine hohe Verfügbarkeit der Fahrzeuge sicherstellen. Ein Management der Fahrzeugnutzung über eine intelligente Buchungssoftware ist in der Lage die Fahrzeugdisposition so zu regeln, dass Nutzungskonflikte verhindert werden. Allerdings besteht hier durchaus Ausbaupotential bei dem Abgleich zwischen Planung und tatsächlicher Fahrzeugnutzung. Etwa könnte eine Schnittstelle zur Ladeinfrastruktur helfen, von der Planung abweichende Ladezustände zu erkennen und frühzeitig die Nutzungsplanung anzupassen.

Das Potential des Modells, im besonderen Fall des ADAC, ist als eingeschränkt einzustufen, da viele Fahrzeuge für wiederkehrende, mehrtägige Veranstaltungen benötigt werden, was mit einer privaten Nutzung außerhalb der Arbeitszeiten nur schwer vereinbar ist. In Unternehmen mit einer geringeren Fahrzeugnutzung außerhalb der Kernarbeitszeiten hingegen, könnten durchaus Potentiale zur Nutzungssteigerung des Fuhrparks erschlossen werden. Lägen etwa im Fall des ADAC sämtliche Fahrten unter 140 km innerhalb der Kernarbeitszeiten der Mitarbeiter, könnten mindestens zwei Tandemfahrzeuge ihren Einsatz finden. Auch eine höhere Fahrzeugreichweite würde das Einsatzpotential entsprechend positiv beeinflussen.

Derweil prüft der ADAC eine Überführung des Modells mit langfristigen Nutzungsverträgen in den Produktivbetrieb.

3.4. Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel vorgenommenen Untersuchungen haben ergeben, dass im betrachteten Szenario ein signifikantes Einsatzpotential (>50% aller Dienstfahrten) für EVs existiert. Würde dieses Potential erschlossen werden, würden die Fuhrparkkosten, im Vergleich zu einem ausschließlich mit Verbrennerfahrzeugen bestückten Referenzfuhrpark, um 39% ansteigen. Auch kann der Einsatz von EVs in dieser Situation die Gesamtemissionen des betrachteten Fuhrparks nicht unter die des konventionellen Vergleichsfuhrparks senken, der Unterschied zwischen beiden Fuhrparks ist jedoch sehr gering (je nach Stromquelle emittiert der gemischte Fuhrpark 2,8% - 7,3% mehr CO_2e, da er ein zusätzliches Fahrzeug umfasst). Anzumerken ist, dass ein Fuhrpark untersucht wurde, der überdurchschnittlich hohe Fahrstrecken aufweist, welche schlecht mit einem EV-Einsatz vereinbar sind.

In der Praxis liegt die Fahrzeugauslastung unter dem errechneten Potential (nur ca. 43% des Austauschpotentials wurden erschlossen). Als ein wichtiger Faktor, welcher diese Situation beeinflusste, wurde die ausbaufähige Nutzereinbeziehung bei der Fuhrparkumstellung identifiziert.

Als wichtige Faktoren für den zielgerichteten Betrieb von EVs konnten weiterhin die Ladeinfrastruktur und ein Fahrzeugverwaltungssystem identifiziert werden. Das beste Preis/Leistungsverhältnis für das untersuchte Szenario wies die 22kW-AC-Ladung auf.

Für das Tandemmodell konnte ein signifikantes Potential zur Steigerung der Fahrzeugauslastung ermittelt werden. Ein EV, welches von einer herkömmlichen Nutzung in das Tandemmodell überführt wird, erfährt eine Zunahme der km-Leistung um ca. 100%. Dies entspricht 7% der Gesamtfahrleistung des Fuhrparks (dieser Wert wurde um den gestiegenen Fremdbezug von Mobilität, ein Plus von 1,2%, bereinigt). Bereits mit nur einem Tandemfahrzeug ist es möglich, die Fuhrparkemissionen im Vergleich zum ICE-Referenzfuhrpark zu senken (unter Einbeziehung des Wegfalls eines Privat-PKW). Weiterhin ist das Tandemmodell in der Lage, die Kosten im Vergleich zum gemischten Fuhrpark ohne Tandemmodell zu senken.

Der Abstand zum reinen ICE-Fuhrpark wird auf 28% verringert. Liegen andere Fahrprofile vor, als im betrachteten Fuhrpark (geringere Strecke je Buchung, weniger Buchungen außerhalb der Kernarbeitszeiten), kann eine absolute Kostensenkung erzielbar sein.

4. Stromversorgung der Fahrzeugflotte

In Kapitel 3 wurden ausführlich die mögliche Auslastung von EVs in einer betrieblichen Fahrzeugflotte, der durch die Nutzung entstehende Strombedarf, sowie dessen Deckung über unterschiedliche Ladesysteme, behandelt. Festgestellt wurde in diesen Betrachtungen (vgl. Kapitel 3.3.1), dass die Art der Stromgewinnung (überwiegend aus fossilen Energieträgern oder aus erneuerbaren Quellen) einen entscheidenden Einfluss auf den CO_2-Footprint der Fahrzeugflotte hat. Weiterhin wurde in den Kostenbetrachtungen erkenntlich, dass der Strombezug für die Fahrzeugflotte auch einen Kostenfaktor darstellt, welcher sich auf die Gesamtkosten des Fuhrparkbetriebs auswirkt.

Bisher wurde der Bezug des Stroms aus dem öffentlichen Stromnetz zu den entsprechenden Stromtarifen angesetzt. Es stellt sich jedoch die Frage, ob eine Reduktion der CO_2-Emissionen und der Stromkosten möglich ist, wenn der zum Flottenbetrieb benötigte Strom teilweise oder insgesamt, lokal aus einer erneuerbaren Energiequelle gewonnen wird.

Fraglich ist, ob eine Nutzung lokal erzeugten Stroms mit dem Energiebedarf einer EV-Fahrzeugflotte vereinbar ist, oder ob es nicht möglich ist, eine ausreichende Schnittmenge von Energieerzeugungs- und Energieverbrauchsprofil zu erzielen. Sollte dies möglich sein, ist zu beurteilen, ob ein Vorteil, sowohl durch Verringerung von Emissionen als auch von Kosten, auf diese Weise erzielt werden kann, wie hoch er ausfällt und ob die Nutzung des Tandemmodells einen Einfluss auf diese Maßnahme hat.

Einen Überblick über die gebräuchlichen Methoden der Gewinnung elektrischer Energie aus regenerativen Quellen ermöglicht die Analyse der Herkunft des deutschen Durchschnittsstroms. Die aus erneuerbaren Quellen gewonnene Energie deckte im Jahr 2015 bereits ca. 30% des deutschen Stromverbrauchs. Die Erzeugung erfolgte zu 13,5% aus Windkraft, zu 6,8% aus Biomasse, zu 5,9% aus PV und zu 3% aus Wasserkraft [85, S.12].

Für die Verwendung von Wasserkraft zur Energiegewinnung werden an den wenigsten Unternehmensstandorten die benötigten Voraussetzungen vorliegen. Feste Biomasse wird in Kleinstanlagen bisher überwiegend als Energieträger zur Wärmegewinnung (z.B. in Pelletheizungen) eingesetzt. Biogasanlagen zur Stromerzeugung bieten maximal für landwirtschaftliche Betriebe eine Option [86, S.36f].

Zur lokalen Gewinnung von Windenergie stellen Kleinwindkraftanlagen zwar eine Option dar, die Voraussetzungen für ihren wirtschaftlichen Einsatz sind jedoch ausreichend starke und gleichmäßige Windverhältnisse am Standort. Aufgrund des komplexen Zusammenspiels verschiedenster Faktoren bei der Windentstehung, sind, für eine genaue Vorhersage der Windverhältnisse für einen Standort nach meteorologischen Standards, mindestens

Winddaten von fünf, für Langzeitvorhersagen sogar von 30 vorangegangenen Jahren erforderlich [87, S.28f].

Besonders die komplexen Windströmungen in urbanem Gebiet sorgen dafür, dass Windturbinen ohne hohe Aufständerung starken Turbulenzen ausgesetzt sein können, welche die erzielbaren Energieerträge deutlich reduzieren [87, S.48f].

Daneben kann der Betrieb von Windkraftanlagen zu Auswirkungen führen, welche im urbanen Raum als störend wahrgenommen werden können, etwa Schattenwurf oder Lichtreflexionen der Flügel, Geräuschentwicklung oder Vibrationen [88, S.90f].

Eine für den urbanen Raum weitaus geeignetere Form der Stromerzeugung bietet die PV, welche sich, zum Zweck der lokalen Eigenversorgung mit elektrischem Strom, bereits jetzt großer Beliebtheit erfreut. Allein für das Jahr 2016 schätzt der Bundesverband der Energie-und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) die, zur Selbstversorgung von Unternehmen und Privathaushalten aus eigenen PV-Anlagen bezogene, Energiemenge auf 3,9 Mrd. kWh. Dies entspricht ca. 10% der gesamten Brutto-Stromerzeugung aus PV des Jahres 2015 von 38,46 Mrd. kWh [85, S.65]. Auf Grund dieser Charakteristika wird die PV-Stromerzeugung in der folgenden Betrachtung als Beispielmethodik der lokalen Stromerzeugung herangezogen.

Für die folgende Eignungsbetrachtung werden die in der Praxis erzielten Leistungswerte von zwei am ADAC-Standort installierten PV-Anlagen herangezogen. Dies sind zum einen eine 78 kWp PV-Anlage, welche an der Fassade und auf dem Dach des Verwaltungsgebäudes installiert und als reine Einspeiseanlage ausgelegt ist. Sie eignet sich zur Ermittlung von Ertragszahlen. Daneben existiert eine auf dem Carport, welcher die Ladeinfrastruktur beherbergt, installierte 7,5 kWp Dachanlage. Diese dient der Versorgung der Ladeinfrastruktur mit Energie und speist nicht in das öffentliche Stromnetz ein. Eine den Bedarf übersteigende Stromproduktion dieser Anlage kann in einer Batterie gespeichert werden. Energiedefizite bei der Flottenversorgung werden aus dem öffentlichen Stromnetz gedeckt. Sie ist exemplarisch als Muster für eine Anlage zur Flottenversorgung zu sehen, und kann durch eine genaue Aufzeichnung der Energieerträge und -verbräuche Aufschlüsse über die Bedürfnisse der EVs und die Eignung der PV-Anlage zur Deckung dieser geben.

Aus den gewonnenen Daten wird anschließend eine hypothetische Anlage kalkuliert werden, welche auf die Flottenbedürfnisse zugeschnitten ist. Die Kennwerte dieser Anlage dienen zur Bestimmung der möglichen Emissionsreduktion und einem möglichen finanziellen Vorteil gegenüber dem Fremdbezug des Stroms.

Hierzu werden unterschiedliche Szenarien betrachtet, um mögliche Entwicklungen, etwa von Strompreisen und Nutzungsfällen für eine Entscheidungsfindung zu berücksichtigen.

Weiterhin wird in zusätzlichen Abschnitten neben der reinen Nutzung einer PV-Anlage auch die Nutzung von Speichersystemen auf ihre Tauglichkeit zur Förderung des Verbrauchs von selbst produziertem Strom untersucht. Zuletzt werden Potentiale der Steuerung der Energieverbräuche zur Steigerung der Eigenstromversorgung thematisiert.

4.1. Eigenstromproduktion durch Photovoltaik als Mittel zur Kostensenkung und Schadstoffminderung

4.1.1. Grundlagen Photovoltaik und Stand der Technik

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Photovoltaik als Mittel zur lokalen Stromerzeugung. Diese beruht auf dem photoelektrischen Effekt, welcher von Alexandre-Edmond Becquerel im Jahr 1839 entdeckt wurde. Er ermöglicht die direkte Umwandlung von Licht in elektrischen Strom mit Hilfe eines Halbleiters. Erste Solarzellen aus Silizium, die nach diesem Prinzip arbeiteten, wurden 1954 von der Firma Bell entwickelt [89, S.175]. Ihren ersten Einsatz erfuhren sie in der Raumfahrt als Stromversorgung des Vanguard 1 Satelliten, welcher 1958 in eine Erdumlaufbahn gebracht wurde. Die Erfolge im Weltraumeinsatz legten auch die Nutzung der Technologie auf der Erde nahe. Erste Ansätze hierzu wurden in den 1960er Jahren evaluiert, jedoch erwiesen sich die damaligen Solarzellen als ungenügend. Erst die in den 1980er Jahren aufkommenden kristallinen Silizium-Zellen vereinten Eigenschaften wie hohe Stabilität und ausreichende Rohstoffverfügbarkeit, sowie die Freiheit von giftigen Substanzen. Diese Zellen stellen auch heute noch den Status Quo in der PV-Technik dar [90, S.227].

Aktuell am Markt vertreten sind monokristalline Siliziumzellen mit ca. 30% Verbreitungsgrad. Am weitesten verbreitet sind jedoch polykristalline Siliziumzellen, welche ca. 60% der genutzten Zellen ausmachen. Andere Zelltypen nehmen nur eine Nebenrolle ein. So stellen Zellen aus amorphem Silizium nur ca. 5% der genutzten Zellen. Weitere 5% bestehen aus anderen Materialzusammensetzungen [91, S.63].

Monokristalline Solarzellen zeichnen sich durch einen sehr hohen Siliziumgehalt aus, welcher einen hohen Wirkungsgrad ermöglicht. In der Praxis liegt dieser zwischen 15% und 18%. Die hohe Materialreinheit erfordert jedoch einen aufwändigen und somit energie- und kostenintensiven Herstellungsprozess. Daher werden polykristalline Solarzellen weltweit am häufigsten eingesetzt. Ihr Fertigungsverfahren verwendet weniger reines Silizium. Daher ist eine kostengünstigere Produktion möglich, jedoch erzielen die Zellen einen geringeren Wirkungsgrad von ca. 13% bis 15%. Beide Zelltypen weisen eine Lebensdauer von etwa 30 Jahren auf [92, S.574f].

Um aus diesen Modulwirkungsgraden den möglichen Energieertrag ableiten zu können, ist die solare Strahlung am Anlagenstandort entscheidend. Exemplarisch ist die auf den Standort Hannover auftreffende Strahlungsenergie und ihre Verteilung über das vorangegangene Jahrzehnt hinweg in Abbildung 4.1 aufgeführt. Die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) erfassten Werte [93] ergeben einen mittleren Strahlungseinfall von 1.034,5 $\mathrm{kWh}/(m^2 a)$, $\sigma = 18{,}17$ für den betrachteten Zeitraum.

Die über das Jahr hinweg schwankende Strahlungskurve wird weitestgehend von zwei Faktoren determiniert. Einflüsse sind einerseits der sich über das Jahr hinweg ändernde

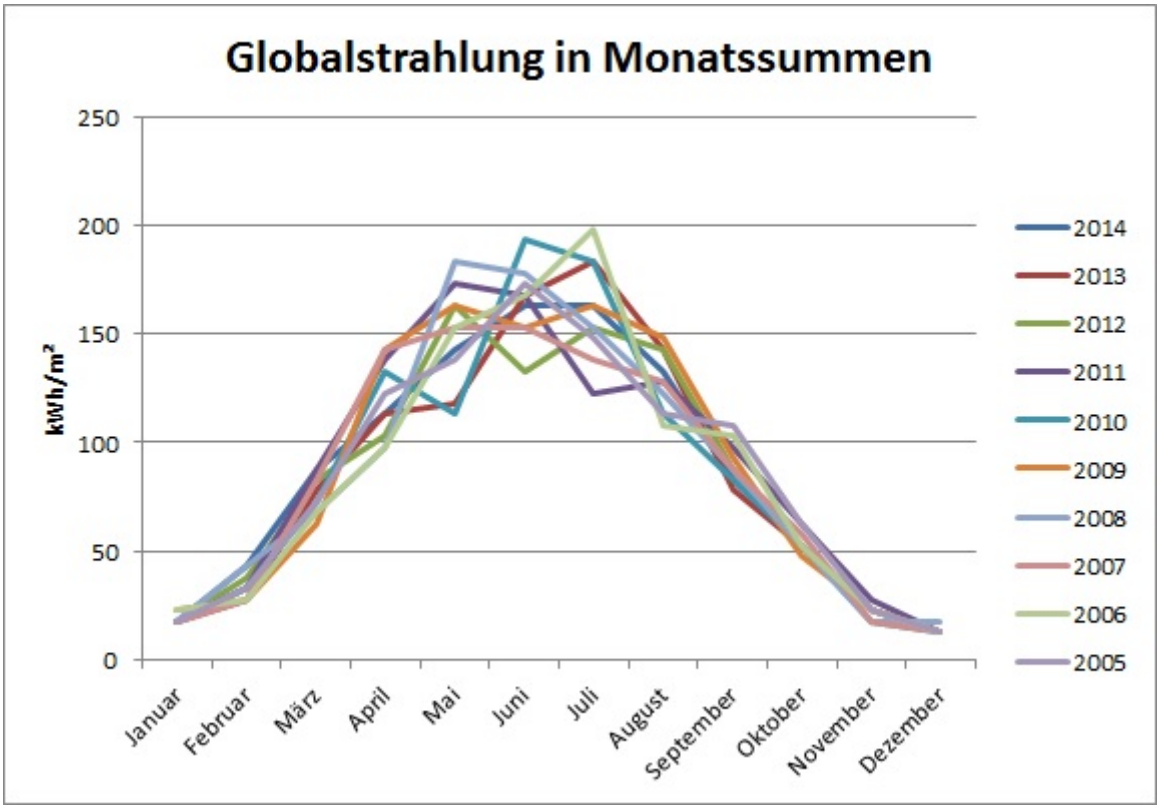


Abbildung 4.1.: Globalstrahlung Hannover 2005 - 2014 (Eigene Darstellung auf Basis von DWD [93])

Einfallswinkel der Sonnenstrahlen, andererseits die mit der Jahreszeit schwankende Wetterlage (insbesondere Bewölkung). Für Planungsvorhaben werden diese Daten in Form von Strahlungsstatistiken, z.B. aus Datenbanken von Wetterämtern, bezogen [94, S.26].

Als Informationsquelle dient oft ein Geographisches Informationssystem (GIS). Im europäischen Raum ist in diesem Bereich etwa das PVGIS [95] ein erwähnenswertes Projekt. Es verknüpft Geodatenbanken von lokalen Strahlungsmessdaten mit Simulationsmodellen, welche über ein Webinterface mit einer interaktiven Karte zugänglich sind [96]. Über dieses Werkzeug ist es möglich, aufgeschlüsselte Berechnungen über zu erwartende Jahreserträge einer PV-Anlage an einem spezifischen Standort zu generieren. Dieses System wird auch im Laufe dieser Abhandlung zur Erstellung von Ertragsprognosen verwendet werden.

Entscheidend für den Ertrag ist neben der verfügbaren Strahlungsenergie am Standort die Ausrichtung der Anlage. Der maximale Jahresertrag in Deutschland kann bei Neigung der Solarzelle von 30° zum Horizont (der Sonneneinfallswinkel beträgt im Schnitt ca. 60°, die höchste Energieausbeute wird bei Auftreffen der Strahlung im 90° Winkel erreicht) in südlicher Ausrichtung erzielt werden [92, S.567]. Entsprechend der Neigung der Solarzellen weicht die einfallende Strahlungsenergie von den in der Horizontalen gemessenen Strahlungsdaten der Wetterämter ab. Die Berechnung ist entsprechend anzupassen

[94, S.28]. Komplexere Informationssysteme, wie etwa das PVGIS, passen ihre Prognoseberechnungen anhand der eingegebenen Ausrichtungsparameter an.

Damit hohe Stromerträge erzielt werden können, muss ein Anlagenstandort verschiedene Voraussetzungen erfüllen. Hierzu zählen Verschattungsfreiheit, eine gute Hinterlüftung der Zellen (eine starke Aufwärmung der Zellen vermindert ihre Leistungsfähigkeit [92, S.574,583]) und Verschmutzungsfreiheit (Anm. Verfasser: etwa Laub, Vogelkot, Moosbewuchs - eine regelmäßige Reinigung der Anlage ist durchzuführen, um ihre Leistungsfähigkeit zu erhalten). Je nach Eignung des Standortes reduziert sich die unter Laborbedingungen mögliche Leistung einer Solarzelle auf etwa 85% bei sehr guten Standortbedingungen, auf ca. 75% für eine durchschnittliche Anlage und sinkt sogar bis auf 50% für Anlagen, welche starke Verschmutzungen oder Defekte aufweisen. Beispiele für Installationsweisen an unterschiedlichen Aufstellungsorten sind etwa die Freilandaufstellung, die aufgeständerte Installation auf Flachdächern, oder die Dachintegration [92, S.583f].

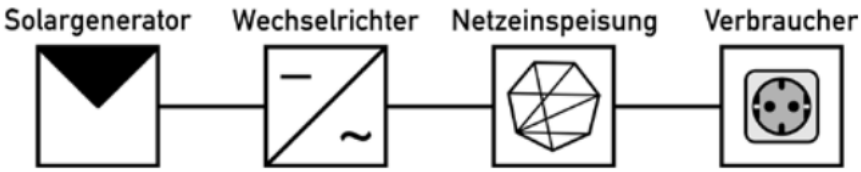


Abbildung 4.2.: Blockschaltbild einer PV-Anlage mit Netzeinspeisung [94, S.108]

Neben den Solarpanelen benötigt eine PV-Anlage zum Betrieb weitere Komponenten (vgl. auch Abbildung 4.2). Bei einer typischen Dachanlage sind das Wechselrichter, Befestigungsstrukturen, Kabel und Verbindungselemente. Bei größeren Anlagen können auch Transformatoren für die Netzanbindung erforderlich sein [97, S.347]. Neben dem in Abbildung 4.2 dargestellten netzgekoppelten Betrieb ist auch eine Konfiguration der Anlage als Inselsystem möglich. In diesem Fall entfällt die Netzanbindung zwischen Anlage und Verbraucher. Stattdessen findet hingegen oft eine Batterie als Pufferspeicher Anwendung. In diesem Fall ist ein Laderegler vonnöten, der eine Überladung oder Tiefentladung der Batterie verhindert, sowie eine Sperrdiode, die eine Rückspeisung von Strom in den Solargenerator unterbindet [94, S.107f].

Auch diese Komponenten wirken sich auf die Erträge der Anlage aus. Jedoch ist ihr Einfluss bei weitem nicht so gravierend, wie etwa Standortwahl oder Verschmutzungssituation. Gebräuchliche Wechselrichter z.B. erreichen heutzutage Wirkungsgrade von über 98% [98, S.221f].

4.1.2. Rechtliche Situation

Die rechtlichen Rahmenbedingungen zum Betrieb einer PV-Anlage, der Eigennutzung des produzierten Stroms oder seiner Einspeisung in das Stromnetz regelt das EEG. Dieses wurde im Jahr 2000 verfasst [99] und über die folgenden Jahre hinweg angepasst und

erweitert. Die zur Zeit aktuelle Fassung stammt aus dem Jahr 2014 [100]. Das Ziel des EEGs ist es, „im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen“ [100, §1.1]. Hierzu wurde eine gestaffelte Zielvorgabe formuliert, welche vorsieht, dass bis zum Jahr 2050 80% des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien gewonnen werden. Zwischenschritte sind die Ziele von mindestens 18% bis zum Jahr 2020, 40-50% bis zum Jahr 2025 und 55-60% bis zum Jahr 2035 [100, §1.2,3]. Erreicht werden soll dies unter anderem durch einen Zubau von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus solarer Strahlungsenergie von 2.500 Megawatt (MW) Leistung pro Jahr [100, §3.3]. Eine Anlage zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien muss vom jeweiligen Netzbetreiber an das Stromnetz angeschlossen werden [100, §8.1]. Die Kosten hierfür trägt der Anlagenbetreiber [100, §16.1]. Der Anlagenbetreiber erhält den Anspruch auf eine Einspeisevergütung für den von ihm direkt oder aus einem Zwischenspeicher in das Netz eingespeisten, aus erneuerbaren Quellen erzeugten Strom [100, §19.1,4]. Diese finanzielle Förderung wird für einen Zeitraum von 20 Jahren zuzüglich des Jahres der Inbetriebnahme der Anlage gewährt [100, §22].

Eine Förderung etwa für in, an oder auf Gebäuden befindlichen PV-Anlagen, wird gestaffelt nach der Leistung der Anlage in kW gezahlt (vgl. 4.1).

Tabelle 4.1.: Förderhöhe je PV-Anlage nach [100, §51.2]

Anlagenleistung	**Förderhöhe**
bis einschl. 10 kW	13,5 Cent pro kWh
bis einschl. 40 kW	12,80 Cent pro kWh
bis einschl. 1 MW	11,49 Cent pro kWh
bis einschl. 10 MW	9,23 Cent pro kWh

Diese Werte werden zur Einhaltung der Zielkorridore für den Zubau von 2.400 bis 2.600 MW dynamisch gesteuert. Seit dem 1. September 2014 verringern sich diese Beträge monatlich um 0,5% gegenüber dem Vormonat. Diese Verringerung wird gesteigert, wenn der Zielkorridor überschritten wird (vgl. 4.2). Wird der Zielkorridor unterschritten, wird die monatliche Absenkung des Förderbetrags wie in Tabelle 4.3 dargestellt verringert.

Im letztgenannten Fall erhöht sich der nach §51 anzulegende Wert zum ersten Kalendertag des jeweiligen Quartals einmalig um 1,5% [100, §31.4].

Das EEG regelt nicht nur die Föderung der Anlagenbetreiber, sondern schreibt auch die EEG-Umlage auf Letztverbraucher und Eigenversorger fest. Definiert ist die EEG-Umlage als eine durch die Elektrizitätsversorgungsunternehmen an die Letztverbraucher weiterzugebende und an den Übertragungsnetzbetreiber zu zahlende Summe. Ihre Höhe ergibt sich aus der Differenz der Kosten des Netzbetreibers für den gelieferten Strom und seinen Einnahmen [100, §60.1]. Auch von Letztverbrauchern, welche den von ihnen verbrauchten Strom selbst produzieren, kann die EEG-Umlage ganz oder teilweise eingefordert werden. 100% der EEG-Umlage werden fällig, wenn es sich nicht um eine Stromerzeugung aus einer EEG-Anlage oder einer hocheffizienten Kraft-Wärme-Kopplungs (KWK)-Anlage handelt.

Tabelle 4.2.: Absenkung der Förderung nach [100, §31.3]

Überschreitung des Zielkorridors	**Monatliche Absenkung**
bis einschl. 900 MW	auf 1,00%
um mehr als 900 MW	auf 1,40%
um mehr als 1.900 MW	auf 1,80%
um mehr als 2.900 MW	auf 2,20%
um mehr als 3.900 MW	auf 2,50%
um mehr als 4.900 MW	auf 2,80%

Tabelle 4.3.: Verringerung der Absenkung nach [100, §31.4]

Unterschreitung des Zielkorridors	**Verringerung monatliche Absenkung**
um bis zu 900 MW	auf 0,25%
um mehr als 900 MW	auf null
um mehr als 1.400 MW	auf null

Andernfalls können für die Zeiträume vom 31.7.2014 bis 31.12.2015 30% der EEG-Umlage, vom 1.1.2016 bis zum 31.12.2017 35% der EEG-Umlage und ab dem 1.1.2017 40% der EEG-Umlage eingefordert werden [100, §61.1].

Die Zahlung der EEG-Umlage entfällt bei Eigenversorgung, wenn weder unmittelbar, noch mittelbar ein Anschluss an das Stromnetz besteht, oder wenn eine vollständige Selbstversorgung mit Strom gegeben ist und für nicht verbrauchten Strom keine Förderung in Anspruch genommen wird. Auch kleinere Anlagen zur Stromerzeugung mit maximal 10 kW Leistung und einer Gesamtproduktion von maximal 10 Megawattstunden (MWh) p.a. sind für die Dauer von 20 Jahren zuzüglich, des Jahres der Inbetriebnahme von der EEG-Umlage befreit [100, §61.2]. Auch bei Bestandsanlagen entfällt die EEG-Umlage, sofern diese vor dem 1.8.2014 zu Eigenverbrauchszwecken oder vor dem 1.9.2011 in Betrieb genommen wurde [100, §61.3,4].

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Regelungen der EEG es einem Anlagenbetreiber ermöglichen, überschüssigen Strom gegen eine Vergütung in das öffentliche Stromnetz einzuspeisen. Jedoch können unter bestimmten Voraussetzungen selbst bei 100%iger Eigenstromnutzung Kosten in Form der EEG-Umlage entstehen. Dieser Sachverhalt kann den Anlagenbetreiber unter Umständen vor die Entscheidung stellen, ob er eine Einspeisung gegen eine Vergütung vornimmt, dafür jedoch auf eigenverbrauchten Strom eine EEG-Umlage zahlt oder keine Einspeisung von Überschüssen vornimmt und dafür keine EEG-Umlage fällig wird, aber auch keine Vergütung beansprucht werden kann.

4.1.3. Wirtschaftliche Optimierung

4.1.3.1. Grundlagen und Methodik der Kostenbestimmung

Der Definition nach stellt elektrischer Strom im Unternehmenskontext einen Betriebsstoff dar, welcher zur Herstellung der Betriebsbereitschaft von Betriebsmitteln nötig ist [101, S.953]. Im Kontext dieser Arbeit wird der elektrische Strom hauptsächlich als Mittel zum Betrieb von EVs behandelt. Diese können im jeweiligen Unternehmen etwa für logistische Aufgaben, wie den Transport von Erzeugnissen oder Rohstoffen verwendet werden, aber auch um die Mobilität von Dienstleistern sicher zu stellen, damit diese zum Ort der Leistungserbringung gelangen können. Auch für administrative Tätigkeiten werden im Betriebsalltag oft entsprechende Fortbewegungsmittel benötigt. Weniger im Fokus steht die Nutzung des elektrischen Stroms zum Betrieb etwa von Fertigungsmaschinen, Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)-Infrastruktur oder z.B. der Gebäudeklimatisierung. Aber auch diese Nutzungsaspekte sollten bei der Ausgestaltung der betrieblichen Energieversorgung nicht außer acht gelassen werden.

Ausgehend von der angenommenen Situation, dass ein Betrieb seinen bestehenden Fuhrpark von konventionellen Verbrennerfahrzeugen auf EVs umstellen möchte, ist es hingegen vor allem sinnvoll, diese zusätzlichen Energieverbraucher und ihren Bedarf gesondert zu betrachten. Auf Grund des zusätzlichen Strombedarfs, der sich sowohl in der Höhe des Gesamtverbrauchs, als auch in Form von Lastspitzen (besonders beim zeitgleichen Laden mehrerer Fahrzeuge und bei Schnellladungen) bemerkbar macht, ist es möglich, dass bestehende Stromverträge erweitert werden und auch etwa neue Zuleitungen gelegt werden müssen. Daher sollte zumindest in Erwägung gezogen werden, den für die EVs benötigten elektrischen Strom durch den Einsatz von z.B. PV, Kleinwindkraftanlagen oder Blockheizkraftwerken am Unternehmensstandort zu erzeugen, somit das Stromnetz zu entlasten und möglicherweise finanzielle Vorteile zu erschließen. Voraussetzungen sind Flächen, auf welchen die Erzeugungsanlagen montiert werden können (z.B. Flachdächer von Unternehmensgebäuden für PV-Panele) und geeignete Umweltbedingungen wie Sonnenstrahlung, Wind etc. am Unternehmensstandort.

In der Betriebswirtschaftslehre ist eine Abwägung zwischen Eigenfertigung und Fremdbezug von Produkten oder Leistungen ein Standardthema. Eine umfassende Auseinandersetzung mit dieser Fragestellung hat in den 1990er Jahren in vielen Unternehmen zu einer Abkehr von der Diversifikationsstrategie hin zur Konzentration auf wenige Kerngeschäftsfelder geführt. Ziel war und ist die Erschließung von Kostenreduktionen und den Vorteilen einer schlankeren Unternehmensgestaltung. Die Entscheidungsgrundlage bilden etwa die Kosten für eine selbst oder fremd erbrachte Leistung, Kapazitätsbeschränkungen und auch langfristige Faktoren, wie eine strategische Bedarfsmengenplanungen oder Transaktionskosten, welche je nach Entscheidung an- oder entfallen [102, S.260f]. Bekannt ist diese Abwägung auch unter der Bezeichnung Make-or-Buy-Entscheidung [103, S.9].

Aus rein wirtschaftlicher Sicht stellt eine Energieerzeugungsanlage ein Investitionsgut dar, da sie entsprechend der Definition eines Investitionsgutes (vgl. [104]) ein Gut ist, welches nicht als Selbstzweck, sondern für die Herstellung anderer Güter angeschafft wird und über eine lange Lebensdauer verfügt, also über einen Zeitraum von mehreren Jahren abgeschrieben wird.

Vergleichbar mit einer in der Produktion eingesetzten Maschine verursacht sie über ihre Lebenszeit hinweg Kosten (Montage, Abschreibung, Wartung, Entsorgung, etc.) und wandelt Eingangsfaktoren (Licht, Wind, Kraftstoff) in ein Gut (elektrischen Strom) um, welches gehandelt oder selbst verbraucht werden kann.

Da in dieser Arbeit der Fokus auf dem Eigenverbrauch des elektrischen Stroms liegt, ist zu klären, ob eine positive Differenz zwischen den Kosten, die durch den Anlagenbetrieb verursacht werden und den Kosten für die alternative (vermiedene) Fremdbeschaffung von elektrischem Strom besteht, wodurch ein finanzieller Vorteil für das Unternehmen durch den Betrieb der Anlage erzielt werden könnte.

Die Bezugskosten für eine kWh Netzstrom liegen derzeit (Stand August 2015) zwischen durchschnittlich 28,72 ct für Haushalte und 15,23 ct für industrielle Großabnehmer [49]. Viele Unternehmen kleiner und mittlerer Größe sind preislich zwischen Haushalts- und Großverbrauchertarifen angesiedelt. So zahlt etwa der ADAC Niedersachsen/Sachsen-Anhalt e.V., dessen Liegenschaft ca. 500.000 kWh jährlich verbraucht, einen Preis/kWh von 19,63 ct. Weiterhin ist bei der Kostenbetrachtung zu berücksichtigen, dass im Fall einer netzgekoppelten Energieerzeugungsanlage für nicht selbst verbrauchten Strom, welcher in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird, ein Erlös in Höhe der Einspeisevergütung angesetzt werden kann (vgl. Kapitel 4.1.2). Da diese Kapitalflüsse verteilt über die gesamte Lebensdauer der Anlage anfallen, ist ein Vergleich mit der Alternative des Fremdbezugs über eine Investitionsrechnung angebracht.

Im Folgenden wird die Berechnung der kWh-Kosten mit der Annuitätenmethode nach Wagner 2015 [94, S.177f] erläutert. Grundsätzlich entsprechen die Kosten K je kWh den jährlichen Anlagenkosten als Kostenannuität AN (Finanzierungskosten der Investition, sowie laufende jährliche Kosten) geteilt durch den jährlichen Energieertrag W_A.

$$K_{kWh} = \frac{AN_{ges}}{W_A} \tag{4.1}$$

Die Annuität entspricht hierbei der Anfangsinvestition IN umgerechnet in gleiche Jahreszahlungen bei der Laufzeit t und dem Zinssatz z.

$$AN = IN * WF_{(q,t)} \tag{4.2}$$

q = Aufzinsungsfaktor = $1 + z$
z = Kalkulationszinssatz
t = Periodenindex

Genutzt wird zur Umrechnung des Kapitalwertes in gleich hohe Annuitäten der sogenannte Wiedergewinnungsfaktor *WF*.

$$WF_{(q,t)} = \frac{q^t * (q-1)}{q^t - 1} \tag{4.3}$$

4.1.3.2. Anwendung der Kostenbestimmung auf ein Testszenario

Im Folgenden wird exemplarisch anhand einer Beispielanlage aufgezeigt, welche Einflüsse die verschiedenen genannten Faktoren auf die Wirtschaftlichkeit einer PV-Anlage haben. Verwendet werden die Eckdaten der im Rahmen des Projektes eAutarke Zukunft am ADAC-Standort im Jahr 2016 errichteten, PV-Anlage zur Stromversorgung der betrachteten EV-Fahrzeugflotte. Diese Daten (vgl. Tabelle 4.4) spiegeln somit den aktuell am Markt erhältlichen Stand der Technik, sowie die aktuelle Preissituation wider.

Aufgrund der kurzen Betriebsdauer liegen bisher keine Messwerte zur Moduldegeneration oder der Haltbarkeit anderer Anlagenbestandteile vor. Für diese Faktoren werden daher Kennwerte aus der Literatur angesetzt.

Tabelle 4.4.: Eckdaten Beispielanlage

Leistung	7,5 kWp
Modultyp	Conergy PowerPlus 250P
Modulanzahl	30 Module
Wechselrichter	SMA Sunny Tripower 7000TL-20
Anlagenpreis	15.000 EUR
Standort	Hannover
Ausrichtung	Süd
Neigung	10 Grad (baulich bedingt)
Laufzeit	20 Jahre

Mit Hilfe des in Kapitel 4.1.1 erklärten PVGIS lässt sich eine durchschnittliche Jahresleistung von ca. 6.260 kWh für die Anlage prognostizieren (siehe Anhang). Berücksichtigt sind in dieser Angabe bereits Systemverluste, etwa durch Temperatureinflüsse, Lichtreflexion und Übertragung bzw. Umwandlung des Stroms, in Höhe von 26,2% der theoretisch möglichen Anlagenleistung. Die im Jahr erzeugte Energiemenge würde beispielsweise ausreichen, um mit einem eGolf mit einem Verbrauch von 18,5 kWh/100 km [46] eine Strecke von ca. 34.775 km zurückzulegen, vorausgesetzt, es kann sämtlicher Strom zur Zeit der Erzeugung geladen werden. Zum Vergleich ist an dieser Stelle das in Kapitel 3.1.2 bestimmte EV-Nutzungspotential im betrachteten Fuhrpark anzuführen, welches sich (bei ausschließlicher Betrachtung von Strecken in einfacher Reichweite) auf 24.449 km je Jahr beläuft.

Der Anlagenpreis (Netto-Systempreis inkl. Montage und Lieferung) für eine kristalline PV-Dachanlage, in der Größe zwischen 3 kWp und 10 kWp, liegt (Stand 2013) im Schnitt

bei 1.607 EUR/kWp (min: 1.250 EUR, max: 2.000 EUR). Der durchschnittliche Bruttopreis mit 19% Mwst. liegt somit bei 1.912,33 EUR/kWp. Für Anlagen über 10 kWp liegt dieser Preis im Schnitt um 200 EUR niedriger [105, S.23f]. Damit ist die hier betrachtete Anlage im mittleren Preissegment anzuordnen.

Neben den Kosten für die Anlage selbst, fallen über den Betriebszeitraum hinweg Kosten für ihren Unterhalt an. Betriebskosten belaufen sich auf ca. 35 EUR je kWp [106, S.11], also auf ca. 260 EUR/Jahr für die betrachtete 7,5 kWp-Anlage. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass Wechselrichter eine deutlich kürzere Lebensdauer als PV-Module haben. Diese liegt zwischen 10 und 15 Jahren [107] [97, S.349]. Ein Wechselrichter verursacht im Schnitt 18,43% der Anlagenkosten bei PV-Anlagen unter 30 kWp [105, S.26]. Für die betrachtete Anlage liegen diese Kosten somit bei ca. 2.750 EUR.

Weiterhin ist neben dem Anlagenpreis für eine Kostenberechnung auch der Zinssatz für das eingesetzte Kapital nötig, zu dem entweder ein Kredit zur Anlagenfinanzierung aufgenommen wird oder zur Abbildung der entstehenden Opportunitätskosten durch die Bindung von Eigenkapital. Auch diese Ausgaben müssen von der Investition refinanziert werden, um mindestens eine Kostendeckung zu erreichen [108, S.412]. Als Vergleichswert wird an dieser Stelle die durchschnittliche jährliche Rendite für langfristige öffentliche Anleihen in Höhe von 0,54% [109] verwendet. Es ist davon auszugehen, dass ein Unternehmen zu diesem Zinssatz sein Kapital alternativ zur betrachteten Investition sicher anlegen könnte. Kann dieser Zinssatz von der Investition nicht refinanziert werden, stellt diese Vergleichsalternative die wirtschaftlich sinnvollere Anlageentscheidung dar.

Der letzte entscheidende Faktor für die Berechnung, ist der Zeitraum, über den die Investition läuft. Solarmodule können durchaus eine Lebensdauer von 25-30 Jahren aufweisen [110, S.39]. Der Leistungsverfall liegt im Schnitt bei etwa 0,1% relative Abnahme des Wirkungsgrades pro Jahr [110, S.42]. Für die hier angestellte Berechnung wird angenommen, dass dieser Rückgang linear verläuft. Für die Kostenberechnung wird der mittlere, über die Laufzeit erzielbare, Ertrag angesetzt.

Da jedoch mit zunehmender Laufzeit einer Investition das Risiko steigt, dass sich bestimmende Rahmenbedingungen ändern, ist eine kurze Amortisationszeit einer Investition erstrebenswert. Im Folgenden wird daher die Laufzeit der Investition auf 20 Jahre festgelegt. Eine anteilige Zahlung EEG-Umlage, welche nach 20 Perioden fällig sein könnte (vgl. 4.1.2), entfällt hierdurch ebenfalls.

Produzenten sind seit 2014 verpflichtet, mindestens 85% der produzierten PV-Module in einem herstellerübergreifenden Recyclingsystem kostenlos zurückzunehmen und zu recyceln [110, S.71]. Es werden daher keine Kosten für die Entsorgung der Anlage am Ende ihrer Nutzungszeit angenommen.

Es folgt nun die Anwendung der Berechnungsformel auf das festgelegte Beispielszenario. Bei einer Laufzeit von 20 Jahren und einem Zinssatz von 0,54% berechnet sich der Wiedergewinnungsfaktor wie folgt:

$$WF_{(q,t)} = \frac{q^t * (q-1)}{q^t - 1} = \frac{1,0054^{20} * (1,0054-1)}{1,0054^{20} - 1} = 0,05288334 \tag{4.4}$$

Der folgende Zwischenschritt besteht in der Abzinsung sämtlicher Ausgaben auf einen äquivalenten Investitionsbetrag (K_0) in Periode 0.

$$K_{0Anlagenkosten} = 15.000 \tag{4.5}$$

Es wird von einem Wechselrichtertausch zu beginn von Periode 11 ausgegangen.

$$K_{0Wechselrichter} = K_{Wechselrichter} * q^t = 2750 * 1,0054^{10} = 2605,82 \tag{4.6}$$

Betriebskosten für alle 20 Perioden (p):

$$K_{0Betrieb} = \sum_{p=1}^{20} K_{Betrieb} * q^{-p} = \sum_{p=1}^{20} 260 * 1,0054^{-p} = 4.916,48 \tag{4.7}$$

aufsummiert beträgt K_0 somit:

$$K_0 = K_{0Anlagenkosten} + K_{0Wechselrichter} + K_{0Betrieb} = 22.522,30 \tag{4.8}$$

Hiermit lässt sich wiederum die Annuität AN, also die zinsbereinigten, gleichgroßen jährlichen Anlagenkosten, berechnen. K_0 entspricht hierbei der Investition IN.

$$AN = IN * WF_{(q,t)} = 22.522,2992 * 0,05288334 = 1.191,05 \tag{4.9}$$

Um die Kosten je kWh zu bestimmen, ist nun noch der mittlere Jahresertrag der Anlage $\varnothing W_a$ zu ermitteln. Dieser setzt sich zusammen aus dem erwarteten Jahresertrag W_a in der ersten Periode von 6.260 kWh und dem zu erwartenden Leistungsrückgang, hier als r bezeichnet, von 0,1% pro Jahr.

$$\varnothing W_a = W_a - \frac{W_a * r * t}{2} = 6.260 - \frac{6.260 * 0,1\% * 20}{2} = 6.197,40 \tag{4.10}$$

Mit dieser mittleren Ertragszahl lassen sich nun die mittleren, jährlichen Stromkosten in EUR/kWh errechnen.

$$K_{kWh} = \frac{AN_{ges}}{\varnothing W_A} = \frac{1.191,05}{6.197,40} = 0,1922 \tag{4.11}$$

Tabelle 4.5 stellt die erzielbaren Stromkosten je kWh gängigen Stromtarifen sowie der erzielbaren Einspeisevergütung gegenüber.

Tabelle 4.5.: Übersicht über die Energiepreise

Stromkosten PV	0,1922 EUR/kWh
Haushaltsstrompreis	0,2872 EUR/kWh [49, S.7]
ADAC-Strompreis	0,1963 EUR/kWh
Industriestrompreis	0,1523 EUR/kWh [49, S.22]
Einspeisevergütung	0,1231 EUR/kWh [111]

Diese Gegenüberstellung verdeutlicht, dass gegenüber dem Haushaltsstrompreis, welchen auch kleinere Betriebe zahlen, eine Einsparung von ca. 1/3 der Kosten erreicht werden kann. Im Vergleich zum Großabnehmerpreis des ADACs ist hingegen nur eine minimale Einsparung erzielbar. Abnehmer auf Industrieniveau können Strom günstiger beziehen, als er mit dieser Anlage erzeugt werden kann. Eine Produktion des Stroms, um ihn einzuspeisen, ist unwirtschaftlich.

Bei Betrachtung dieser Momentanwerte ist zu beachten, dass der Strompreis keinesfalls gleichbleibend ist. Die Strompreisentwicklung der letzten Jahre weist deutliche Preisanstiege auf. So stieg der durchschnittliche Haushaltsstrompreis je kWh von 13,94 ct im Jahr 2000 kontinuierlich auf einen Höchstwert von 29,14 ct im Jahr 2014, um dann wieder leicht zu sinken, auf den heutigen Wert von 28,72 ct. Verantwortlich sind unter anderem ein Mehrwertsteueranstieg, ein Wachstum der EEG-Umlage von 0,2 ct auf 6,17 ct, sowie leichte Anstiege von Stromsteuer, Netzentgelt und Beschaffungskosten [49, S.7]. Auch der Industriestrompreis stieg von durchschnittlich 6,05 ct im Jahr 2000 auf einen Höchstwert von 15,32 ct im Jahr 2014 und fiel wieder leicht auf den heutigen Wert von 15,23 ct. Größte Verursacher sind hier auch der Anstieg der EEG-Umlage von 0,2 ct auf 6,17 ct, sowie ein Anstieg der Stromsteuer von 0,26 ct auf 1,537 ct. Daneben ist auch hier ein leichter Anstieg der Anteile von Beschaffung, Netzentgelt und Vertrieb von 5,46 ct auf 7,19 ct zu verzeichnen [49, S.22].

Da es sich beim Betrieb einer PV-Anlage um eine langfristige Investition handelt, die sich nur amortisiert, wenn ihre Betriebskosten/kWh über ihren Betriebszeitraum hinweg die alternativen Strombezugskosten aus dem öffentlichen Stromnetz im Mittel unterbieten, muss geklärt werden, wie sich diese alternativen Stromkosten voraussichtlich über den Investitionszeitraum hinweg entwickeln werden.

Hierzu soll eine Prognose zur Entwicklung des Haushaltsstrompreises bis zum Jahr 2030 herangezogen werden. Die betreffende Studie wurde vom Energiewirtschaftlichen Institut der Universität Köln [112] entwickelt.

Diese Studie berücksichtigt in unterschiedlichen Szenarien sowohl die Preisentwicklung fossiler Energieträger, Preise für CO_2-Emissionsrechte, als auch die Veränderung der Energieversorgung durch vermehrte Nutzung erneuerbarer Energien, welche einen Netzausbau und ein verändertes Betriebsschema konventioneller Kraftwerke zur Folge haben. So kommt den konventionellen Kraftwerken zunehmend die Aufgabe zu, als „Lückenfüller“ zwischen der volatilen Stromerzeugung aus regenerativen Quellen und der Gesamtstrom-

nachfrage zu fungieren. Dies führt zur Reduktion der durchschnittlichen Kraftwerksauslastung und somit zum Anstieg der spezifischen Erzeugungskosten.

Diese Entwicklung hat zur Folge, dass je nach betrachtetem Szenario der Haushaltsstrompreis bis zum Jahr 2030 einen Wert zwischen 270 EUR/MWh und 323 EUR/MWh annimmt. Dies entspricht im Vergleich zum heutigen Preisniveau einem minimalen Preisrückgang oder einer leichten Preiszunahme. Es ist somit auf absehbare Zeit nicht anzunehmen, dass der Haushaltsstrompreis unter die Stromgestehungskosten der PV-Anlage sinkt.

Bei der Betrachtung, der in diesem Unterkapitel durchgeführten Berechnungen muss berücksichtigt werden, dass nur eine vergleichsweise kleine Anlagengröße als Rechenbeispiel diente. Bei größer dimensionierten Anlagen können Synergieeffekte auftreten, welche die Wirtschaftlichkeit der Anlage steigern (vgl. z.B. [105, S.23f]). Allerdings ist auch die EEG-Umlage auf Eigenstromverbraucher bei Anlagengrößen ab 10 kWp oder 10.000 kWh/a zu berücksichtigen, welche zu zusätzlichen Kosten führt (vgl. 4.1.2). In den folgenden Kapiteln wird die hier betrachtete Anlage weiterhin als Beispiel für die PV-Stromerzeugung zur Nutzung mit EV dienen. Ziel ist die Ermittlung der optimalen Anlagenausgestaltung zur Versorgung der EVs.

4.1.3.3. Bestimmung der kostenoptimalen Anlagengröße

Die vorangegangenen Berechnungen zeigen, dass der benötigte Strom aus einer eigenen PV-Anlage günstiger bezogen werden kann, als aus dem öffentlichen Stromnetz (sofern keine Sondertarife in Anspruch genommen werden können). Auch ist die jährliche Stromproduktion der angenommenen Anlage mehr als ausreichend, um den Strombedarf der hypothetischen Fahrzeugflotte zu decken. Allerdings wurde in den bisherigen Betrachtungen die Verteilung der Verfügbarkeit des selbst produzierten Stroms nicht berücksichtigt.

Die Stromerzeugung einer PV-Anlage verläuft über ein Jahr hinweg nicht linear, sondern, wie die Strahlungskurve in Abbildung 4.1 zeigt, in Form einer Glockenkurve. Einen vergleichbaren Verlauf nimmt die Ertragskurve über einen Tag hinweg an, an dem sie sich von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang erstreckt und etwa in der Mittagszeit den höchsten Ertrag erzielt.

Die Stromnachfrage hingegen richtet sich nach der Verteilung der Dienstfahrten und ist nur einer geringen saisonalen Schwankung unterlegen. Exemplarisch wird diese Situation anhand der im Monat Juni 2016 im Projekt gemessenen Stromerträge und -verbräuche dargestellt, vgl. Abbildungen 4.3, 4.4.

Als Darstellungsform für die PV-Erträge wird an dieser Stelle der Boxplot gewählt. Dieser ist ein beliebtes Instrument zur grafischen Analyse der Streuung von ordinalen und metrischen Variablen. Die Box stellt den Verteilungsraum vom ersten bis zum dritten Quartil dar. Der Median wird durch eine waagerechte Linie gekennzeichnet. Die Bereiche vom Minimalwert bis zum ersten Quartil, sowie vom dritten Quartil in Richtung des Maximalwertes werden durch eine Linie gekennzeichnet [113, S.52f]. In der Variante nach dem Entwickler der Boxplots, JW. Tukey [114], ist die Maximallänge der Linien („Whisker“)

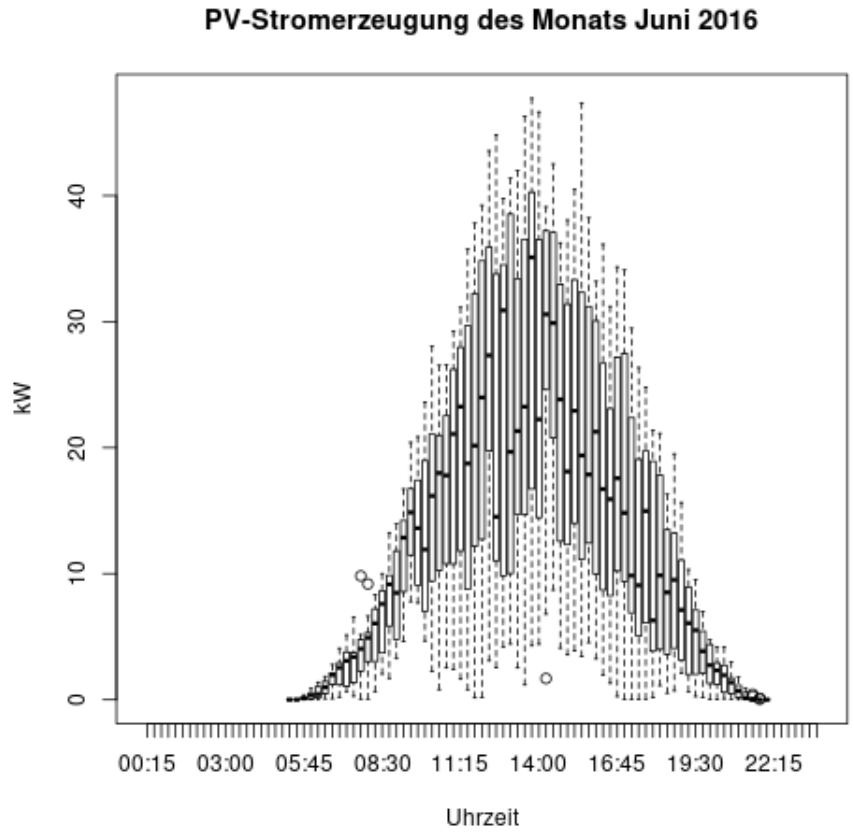


Abbildung 4.3.: Verteilung des PV-Stromertrags des Monats Juni 2016 in 15 min Durchschnittswerten (ungedrosselte Fassadenanlage)

auf das 1,5-fache der Länge der Box beschränkt. Bei Werten, die außerhalb dieses Bereiches liegen (Anm.: in den folgenden Grafiken als Punkte gekennzeichnet), liegt der Verdacht nahe, dass es sich um Ausreißer handelt.

Abbildung 4.3 verdeutlicht die glockenkurvenförmige Verteilung der Stromerträge einer PV-Anlage über einen Tag hinweg. Aufgezeichnet wurden diese Daten im Monat Juni 2016 am ADAC-Standort. Zu beachten ist, dass es sich bei der betrachteten Anlage um die 78 kWp Fassadenanlage des ADAC handelt. Erträge dieser Anlage wurden direkt in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Hingegen wurden die Erträge der Carport-Anlage, welche bisher als Referenz diente, teilweise zwischengespeichert und die Anlage aus vergütungstechnischen Gründen abgeregelt, wenn der produzierte Strom nicht verbraucht werden konnte. Eine unverfälschte Betrachtung des Ertragspotentials ist somit nicht möglich. Durch die vergleichbaren Standortbedingungen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Ertrag der Carport-Anlage etwa einem Zehntel des Ertrages der Fassadenanlage entspricht.

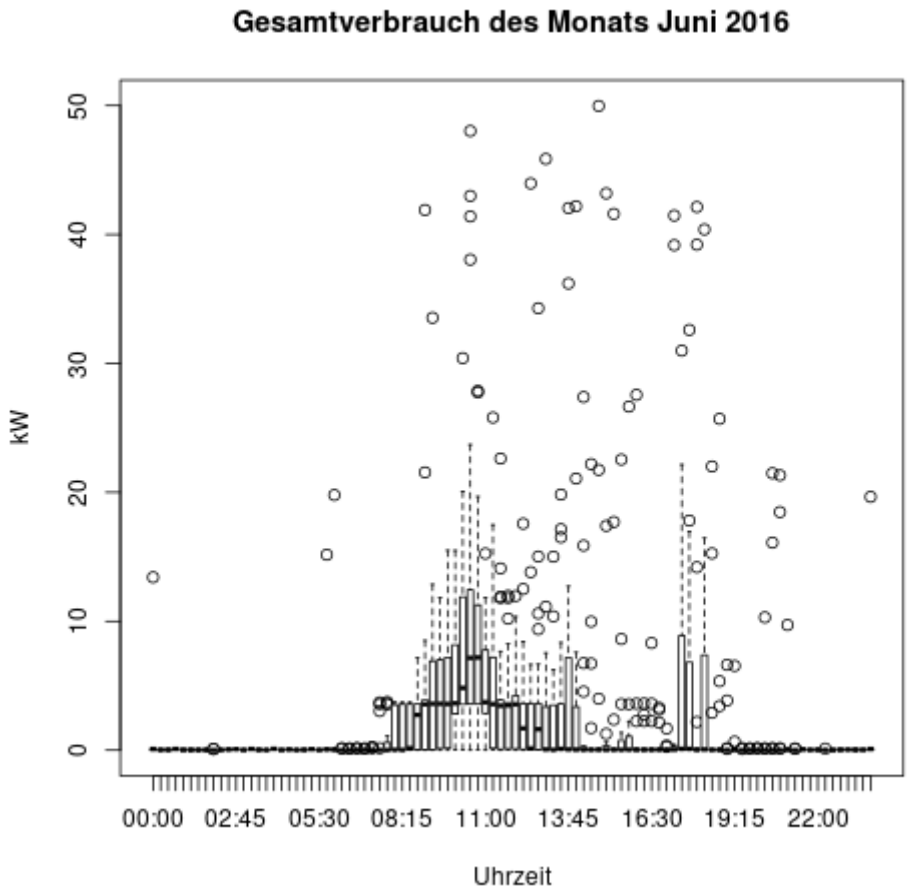


Abbildung 4.4.: Verteilung des Gesamtstromverbrauchs der EVs im Monat Juni

Dem gegenüber steht die Verbrauchskurve, bestimmt durch die Fahrzeugladungen. Anzumerken ist, dass zum Zeitpunkt der Datenaufzeichnung das Tandemmodell erprobt wurde. Erfasst wurden für diese Aufstellung sämtliche Ladungen, sowohl an AC- als auch an DC-Ladepunkten. Deutlich erkennbar ist die Stromnachfrage in den Morgenstunden, verursacht durch die zwei Tandem-Fahrzeuge vom Typ eGolf, welche zeitlich leicht versetzt, durch unterschiedliche Ankunftszeiten am Unternehmensstandort mit 3,6 kW Wechselstrom laden. Teilweise werden Ausschläge auf mehr als 20 kW verzeichnet, verursacht durch die zusätzliche Ladung des Smart ED mit 22 kW AC. Diese Nachfrage hält sich bis in die frühen Nachmittagsstunden. Am Nachmittag selbst sind Ladungen mit 3,6 kW nur vereinzelt zu verzeichnen. Erst zwischen ca. 17:00 und 18:00 sind wieder regelmäßigere Ladungen zu erkennen, welche überwiegend von Tandem-Fahrzeugen vor der Rückfahrt verursacht wurden. DC-Schnellladungen hingegen sind über den Tag hinweg, kaum einem regelmäßigen Muster folgend, verteilt.

Der Vergleich von Ertrags- und Verbrauchskurve zeigt, dass diese sich in ihren Verläufen gravierend unterscheiden. Nur in den Morgen- und in geringem Umfang auch in den Abendstunden besteht eine konsistente Nachfrage, die hauptsächlich auf das Tandemmodell zurückzuführen ist. In den Zeiten hoher Energieproduktion hingegen, ist die Nachfrage sehr inkonsistent.

Es besteht somit eine Diskrepanz zwischen Stromertrag und Stromverbrauch. Diese Situation wirkt sich auf die Gesamtstromkosten aus, die für den Unterhalt der Fahrzeugflotte anfallen. Nur Strom, der direkt aus der PV-Anlage konsumiert wird, kann zu den günstigen 19,22 ct bezogen werden. Stromnachfrage, die den PV-Ertrag übersteigt, muss hingegen aus dem Netz gedeckt werden, im Fall kleinerer Unternehmen zu einem Preis von 28,72 ct. Weiterhin kann PV-Strom, welcher nicht vom Unternehmen verbraucht werden kann, allenfalls für eine Vergütung von 12,31 ct in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden und verursacht dem Unternehmen somit Kosten. Damit die Nutzung von PV-Strom einen wirtschaftlichen Vorteil bieten kann, ist zwar keine absolute Deckung des Strombedarfs durch die PV-Anlage notwendig (und in der Praxis auch nicht umsetzbar, da es unvermeidbar ist, dass Fahrzeuge auch zu Zeiten geladen werden müssen, zu denen kein Stromertrag vorliegt), jedoch muss ein signifikanter Anteil des Strombedarfs durch den selbst erzeugten Strom gedeckt werden. Umgekehrt sollte jedoch eine Überproduktion vermieden werden, da der nicht selbst konsumierte Strom nur unter Herstellungskosten abgegeben werden kann. In der hier beschriebenen Kostensituation muss das Verhältnis von Eigennutzung zu Einspeisung der Anlagenproduktion bei mindestens 42,2% Eigennutzung zu maximal 57,8% Einspeisung liegen, damit die Anlage einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber dem reinen Netzbezug bieten kann. Ein Unternehmen sollte daher bestrebt sein, seine PV-Anlage so zu dimensionieren, dass sowohl Fremdbezug von Strom, als auch eine Überschussproduktion minimiert werden.

Im Folgenden wird für unterschiedliche Nutzungsszenarien und Anlagendimensionen geprüft, ob diese Voraussetzung für den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb erfüllt werden kann. Als Grundlage dienen hierzu die Stromproduktion der PV-Anlage über einen repräsentativen Zeitraum hinweg, sowie, dem gegenübergestellt, die Stromnachfrage aus einem vergleichbaren Zeitraum. Abgeleitet werden hieraus die Eigennutzungsquote, der notwendige Netzbezug und die Netzeinspeisung.

Als Daten für die Energieproduktion dienen die Ertragsdaten der Fassaden-PV-Anlage der Monate Juli bis Dezember 2016. Diese liegen in Form der Energieproduktion in 15 min Durchschnittswerten vor. Aus diesen wurden die zu erwartenden Ertragswerte, der um den Faktor 10 kleineren Referenzanlage, am selben Standort bestimmt.

Unter der Annahme, dass sich die Kosten für eine PV-Anlage nahezu linear verhalten (für die Anlagengröße zwischen 3 kWp und 10 kWp kann dies angenommen werden, außerhalb dieses Bereiches treten leichte Abweichungen auf, vgl. [105, S.23f]), wurden diese Ertragswerte wiederum mit dem Faktor 0 bis 10 multipliziert, um aufzuzeigen, wie sich eine veränderte Anlagengröße auf Eigennutzungsquote, Eigendeckungsquote und Gesamtkosten für die Deckung des Energiebedarfes auswirkt.

Grundlage für die Bestimmung der Nachfrage bildeten die möglichen EV-Fahrten der entsprechenden Monate des hypothetischen, für ein Jahr berechneten Fuhrparks aus Kapitel 3.1.2. Unter der Annahme, dass ein Fahrzeug geladen wird, sobald es seine Fahrt beendet hat und die Ladung dem Energiebedarf der absolvierten Fahrt sowie den Ladeverlusten entspricht, wurden Zeitpunkt, Dauer und Höhe der Nachfrage ebenfalls in 15 min Durchschnittswerten bestimmt. Aus diesen Halbjahresdaten wurde eine Hochrechnung für ein Jahr erstellt.

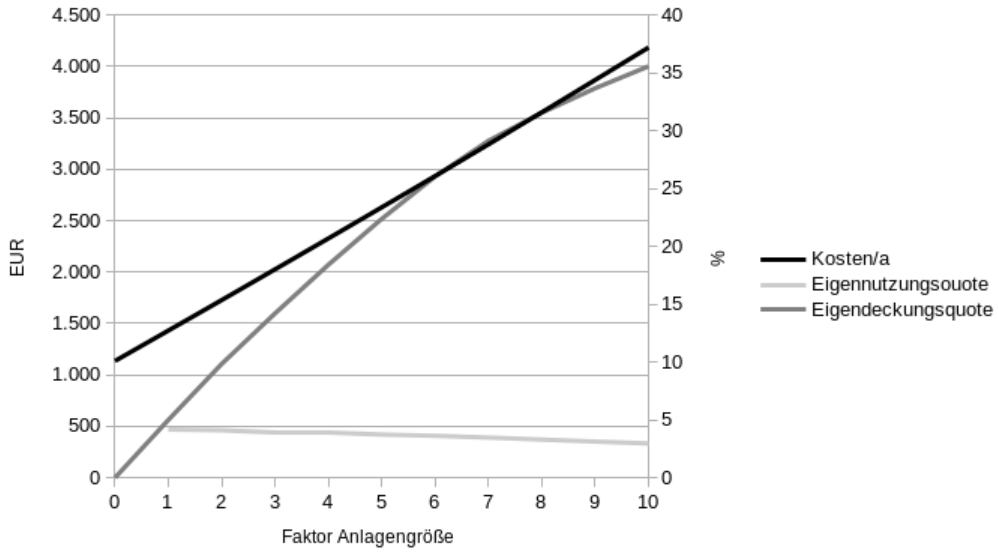


Abbildung 4.5.: Kosten und Eigendeckungsquote für unterschiedliche Anlagengrößen bei angenommener 22 kW-Ladung

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Es zeigt sich, dass die kostenminimale Anlagengröße bei Null, also beim vollständigen Netzbezug der benötigten Energie liegt. Die aktuelle Anlage (Faktor 1) kann nur ca. 5% des Strombedarfs decken. Dies bessert sich zwar mit steigender Anlagengröße, der Einkaufspreis aus dem öffentlichen Stromnetz kann jedoch nicht unterboten werden. 95% des Stroms würden eingespeist werden und dem Unternehmen somit je kWh Kosten von 6,91 ct verursachen, der Differenz zwischen den Betriebskosten der Anlage je kWh und der Einspeisevergütung.

Wird zusätzlich ein Tandemfahrzeug in die Betrachtung aufgenommen, sinkt die Eigendeckungsquote um 0,9%, da dieses eine zusätzliche Nachfrage in den Morgenstunden generiert, welche die Stromproduktion übersteigt.

Das grundlegende Problem verdeutlicht Abbildung 4.6. In ihr werden für den Monat September die erzielbaren Stromerträge und die Stromnachfrage abgetragen. Besonders interessant ist, dass in diesem Monat der Stromertrag mit 588,24 kWh und der Verbrauch

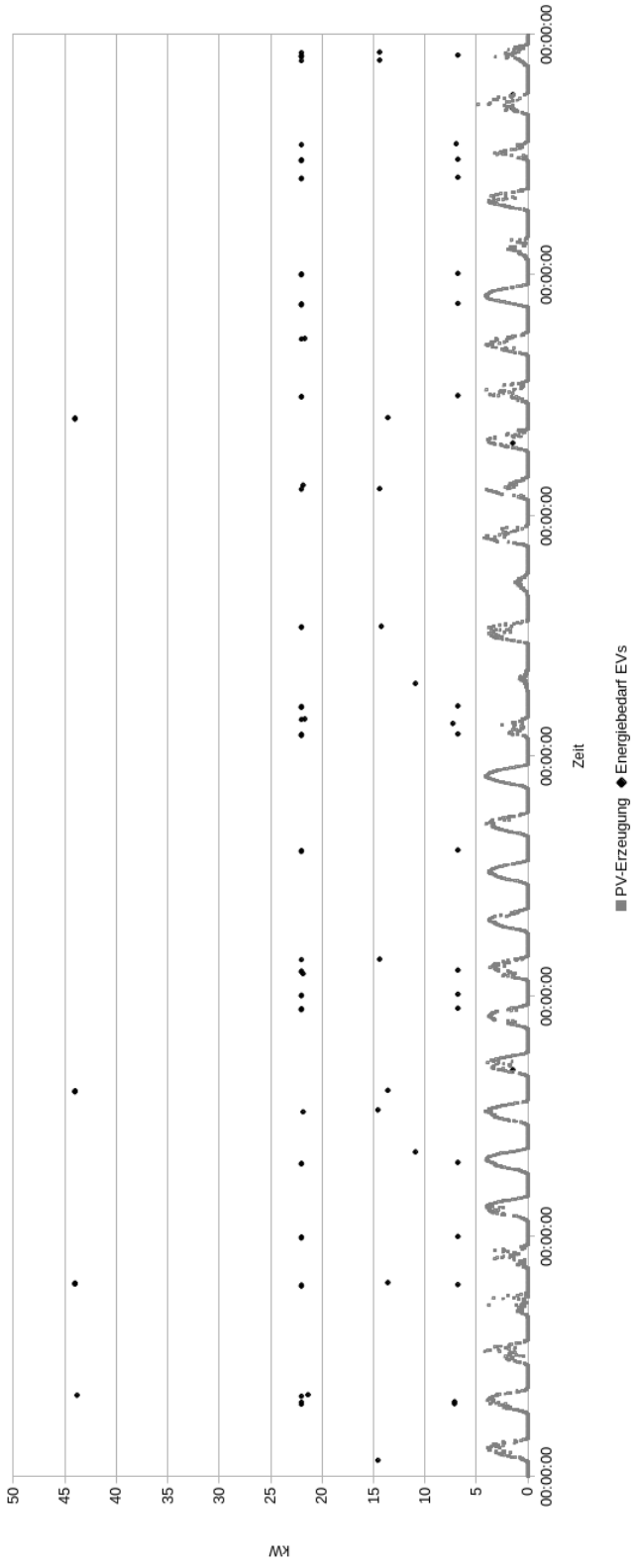


Abbildung 4.6.: Stromertrag und -nachfrage im Monat September bei angenommener 22 kW-Ladung

mit 541,99 kWh sehr nahe beieinander liegen. Rein bilanziell wäre die Anlage in der Lage, den Strombedarf der Fahrzeuge vollständig zu befriedigen und nur einen geringen Stromüberschuss zu produzieren. Damit wäre die Anlagengröße für die Nachfragesituation absolut geeignet. In der Realität könnte mit dieser Konfiguration jedoch nur eine Deckungsquote von 4,99% des EV-Strombedarfs erzielt werden. Es können nur 4,16% der PV-Stromproduktion selbst verbraucht werden. Grund ist die Konzentration der Nachfrage in Lastspitzen, die die Produktion der Anlage zum jeweiligen Zeitpunkt oft um ein Vielfaches übersteigen.

Es zeigt sich somit, dass das pauschale Laden mit 22 kW, welches bisher als Variante mit dem vorteilhaftesten Preis-/Leistungsverhältnis identifiziert wurde, nicht ohne weiteres mit der Nutzung von PV-Strom kombiniert werden kann.

Im Folgenden werden deshalb unterschiedliche Maßnahmen diskutiert, welche eine Annäherung der Nachfrage an die Erzeugungskurve fördern sollen. Dazu zählen eine pauschale Anpassung der Nachfrage, sowie die Erweiterung der Infrastruktur um einen Energiespeicher (Kapitel 4.2) oder eine adaptive Steuerung der Nachfrage (Kapitel 4.3).

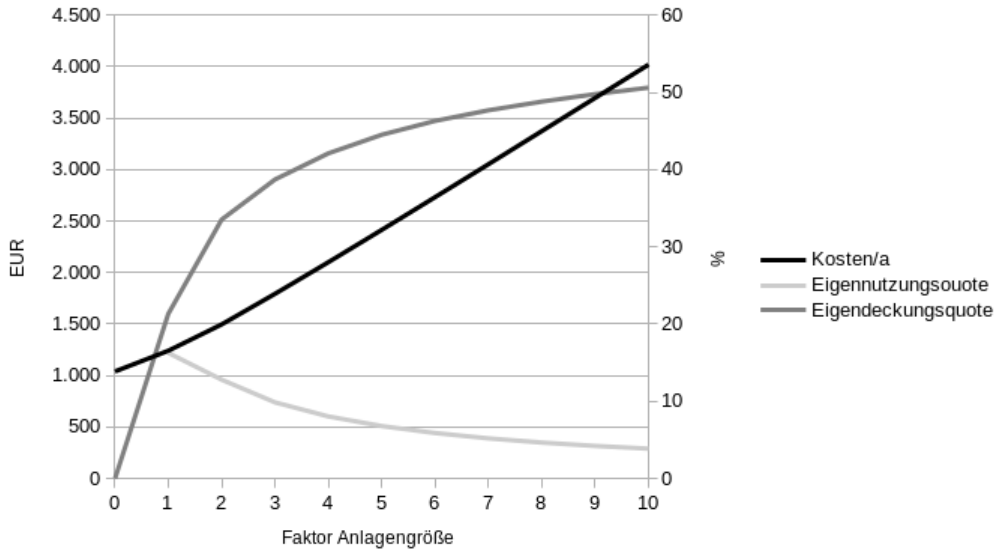


Abbildung 4.7.: Kosten und Eigendeckungsquote für unterschiedliche Anlagengrößen bei angenommener 3,6 kW-Ladung

Eine Maßnahme zur Erhöhung der Eigennutzungsquote, welche ohne Anpassung der Infrastruktur umsetzbar ist, stellt die pauschale Absenkung der Ladeleistung dar. Hierdurch werden die Lastspitzen abgesenkt und die Nachfrage auf einen größeren Zeitraum verteilt. Exemplarisch wird dies im Folgenden an einer Reduktion der Ladeleistung auf 3,6 kW demonstriert. Dies würde in der Praxis einhergehen mit der in Kapitel 3.1.3 bestimmten Reduktion des EV-Nutzungspotentials und dem gesteigerten Fremdbezug von Mobilitätsleistungen.

Das Ergebnis dieser Untersuchung wird in Abbildung 4.7 dargestellt. In der einfachen Größe ist die untersuchte Anlage in dieser Konstellation in der Lage, eine Eigendeckungsquote von 21,33% zu erreichen. Dies sind jedoch immer noch nur 16,26% Eigennutzung. Daher liegen die Kosten für den Fremdbezug auch in dieser Ausführung unter den Kosten für die PV-Stromnutzung.

Abbildung 4.8, analog zu Abbildung 4.6 erstellt, verdeutlicht wie die verringerte Ladeleistung das Nachfrageniveau deutlich häufiger innerhalb der Ertragskurve bleibt als mit einer Ladeleistung von 22 kW. Trotzdem finden die Ladungen noch immer häufig in Zeiten statt, in denen keine ausreichende PV-Stromproduktion zur Deckung dieser Nachfrage vorliegt.

Auch eine pauschale Reduktion der Ladeleistung ist somit nicht in der Lage, das Kostensenkungspotential der PV-Stromnutzung nutzbar zu machen. In den nachfolgenden Kapiteln werden daher weitere Ansätze zur Annäherung von Stromertrag und -verbrauch behandelt.

Eine Senkung der Fuhrparkkosten mit den in diesem Kapitel aufgeführten Maßnahmen ist somit nicht erreichbar, obwohl eine PV-Anlage in der Lage ist, die Kosten des Fremdbezugs von Strom zu unterbieten.

4.1.4. Ökologische Auswirkungen

Neben der Kostenreduktion ist die Emissionsreduktion eine wichtige Motivation für den Betrieb einer PV-Anlage. Zwar verursacht eine PV-Anlage im eigentlichen Betrieb keine Emissionen, jedoch fallen über ihren Lebenszyklus hinweg durch Fertigung und Recycling Emissionen an, die der von ihr generierten Strommenge zugeschrieben werden müssen.

Die Fertigung eines Solarpanels mit 1 kWp Leistung verschlingt etwa 450 kWh Energie. In Deutschland dauert es im Schnitt drei Jahre, bis die Anlage diese Energiemenge generiert hat (sog. „Energy Payback“) [91, S.97]. In einer Lebenszyklusbetrachtung können für eine PV-Anlage in Deutschland ca. 100 g CO_2e je produzierte kWh als Emissionswert angesetzt werden [86, S.91f]. Damit liegen die Emissionen bei etwa einem Sechstel der Emissionen, die eine kWh des deutschen Normstrommixes verursachen (583 g CO_2e [25, S.231]).

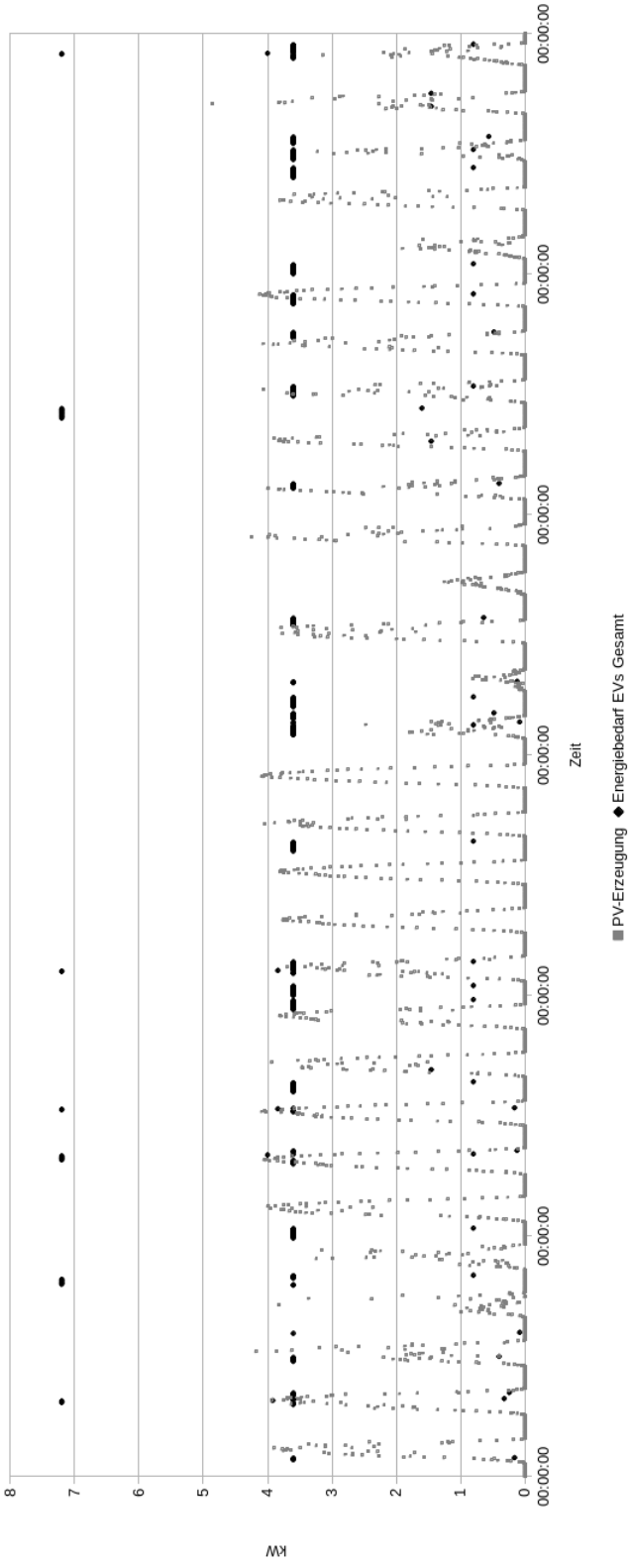


Abbildung 4.8.: Stromertrag und -nachfrage im Monat September bei angenommener 3,6 kW-Ladung

Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss die erzielbaren PV-Strom-Nutzungsquoten auf die Fuhrparkemissionen haben. Berücksichtigt werden dabei nur die tatsächlich von den Fahrzeugen verbrauchten Energiemengen. Überschüssiger PV-Strom, welcher in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird, verschafft dem Fuhrpark in dieser Berechnung keinen Emissionsvorteil.

Die Emissionen werden analog zum Vorgehen in Kapitel 3.1.2.3 bestimmt und mit den in Kapitel 3.1.1.4 kalkulierten Werten verglichen. Da jedoch durch die Hochrechnung der Analysewerte von einer Halbjahresbetrachtung auf Ganzjahreswerte die EV-Fahrleistung leicht von der bisher analysierten Fuhrparkjahresfahrleistung abweicht (ein Plus von 3,5% bzw. 132,25 km liegt vor), werden im Folgenden die Vergleichswerte auf dieses Niveau angehoben.

Der Vergleichswert für eine reine ICE-Fahrzeugflotte, welcher in Kapitel 3.1.1.4 bestimmt wurde, liegt bei 23.047,17 kg CO_2e Emission pro Jahr. Um die Mehrfahrleistung erweitert, steigt er auf 23.064,63 CO_2e.

Für den gemischten Fuhrpark (vgl. Kapitel 3.1.2.3) setzen sich die Emissionen zusammen aus den Emissionen der fuhrparkeigenen ICEs, den Emissionen, die aus dem Fremdbezug von Mobilitätsleistungen (ICE) entstehen und welche je nach Ladevariante variieren (vgl. Tabelle 3.7) und den von den EVs indirekt durch den Stromkonsum verursachten Emissionen. Diese bestehen aus den Emissionen, die für die Eigenversorgung aus dem Betrieb der PV-Anlage entstehen und den Emissionen, die der Bereitstellung des Netzstroms zur Deckung des restlichen Strombedarfs zuzurechnen sind.

Tabelle 4.6.: Fuhrparkemissionen je Nutzungsvariante in kg CO_2e

	ICE	Fremd	EV PV	EV Netz	EV-Fertigung	Summe
Nur ICE	23.064,63					23.064,63
22 kW D	18.605,11	1.256,14	19,732	2.190,21	2.773,11	24.844,30
22 kW Ö	18.605,11	1.256,14	19,732	1.096,98	2.773,11	23.751,07
3,6 kW D	18.605,11	1.448,86	77,211	1.660,72	2.773,11	24.565,01
3,6 kW Ö	18.605,11	1.448,86	77,211	831,79	2.773,11	23.736,08

In Tabelle 4.6 sind die Emissionswerte der unterschiedlichen Fuhrparkausgestaltungen gegenübergestellt. Als Referenz dient in der ersten Zeile der ausschließlich aus ICEs bestehende Fuhrpark. Ihm folgen die gemischten Fuhrparkvarianten mit PV-Stromversorgung, unterteilt in die beiden untersuchten Ladeleistungsvarianten. Diese beiden Varianten wurden wiederum unterteilt in je eine, bei der der Strombedarf, der nicht durch die PV-Anlage gedeckt werden kann, mit regulärem **D**urchschnittsstrom (0,583 kg CO_2e/kWh) oder mit **Ö**kostrom (0,292 kg CO_2e/kWh) gedeckt wird.

Ihre Emissionen setzen sich zusammen aus den Emissionen der fuhrparkeigenen ICEs (18.605,11 kg CO_2e, 0,132 kg/km) den Emissionen aus dem Fremdbezug von Mobilitätsleistungen (1.242,94 kg CO_2e plus die in Kapitel 3.1.3 kalkulierten Strecken, welche

je nach eingesetzter Ladevariante nicht von den EVs absolviert werden können [12]) und den nachfolgenden Energieverbrauchswerten der EVs. Bei der 22 kW Variante liegt der Gesamtbedarf an Energie für die EVs bei 3.954,11 kWh, davon können 197,32 kWh mit PV-Strom gedeckt werden, 3.756,79 kWh werden aus dem Netz bezogen.

Bei einer Ladeleistung von 3,6 kW beträgt der Gesamtstrombedarf der EVs 3.620,69 kWh, davon können 772,11 kWh mit PV-Strom gedeckt werden, 2.848,58 kWh werden aus dem Netz bezogen.

Hinzu kommen die aufs Jahr umgelegten Fertigungsemissionen der EVs (bei den fuhrparkeigenen und fremden ICEs sind diese Aufwendungen bereits in den Emissionswerten enthalten). Die Emissionswerte aus Tabelle 4.6 zeigen, dass die erzielbaren Nutzungsquoten nicht ausreichen, um einen Emissionsvorteil gegenüber dem reinen ICE-Fuhrpark zu erzielen. Für einen solchen Vorteil wäre eine PV-Stromnutzung von nahezu 100% erforderlich.

Wird einem der Fahrzeuge im 22 kW-Szenario[13] noch eine Tandemrolle zugewiesen und angenommen, dass es jeden Morgen eine Fahrt von 27 km zurücklegt, nach der am Unternehmensstandort geladen wird (die zweite Ladung findet nach der Heimfahrt am Wohnsitz des Tandempartners statt), entsteht ein zusätzlicher Strombedarf von 1.287,47 kWh. Durch die geringe PV-Stromerzeugung in den Morgenstunden können von diesem Energiebedarf nur 9,16 kWh (0,85%) durch PV-Strom gedeckt werden. Die überwiegende Nachfrage muss aus dem Netz befriedigt werden. Es ist somit durch den PV-Einsatz keine nennenswerte Emissionsbeeinflussung des Tandemmodells erzielbar.

[12] 22 kW: 100 km, 3,6 kW: 1.560 km

[13] Bei nur 3,6 kW-Ladeleistung ist die morgendliche Ladezeit zu lang und behindert dienstliche Fahrten

4.2. Speichertechnik

Die vorangegangenen Untersuchungen haben ergeben, dass zwar ein Kostensenkungspotential durch Eigenstromnutzung besteht, dieses jedoch kaum ausgeschöpft werden kann, da sich Erzeugungskurve und Verbrauchskurve kaum decken.

Daher wird im Folgenden die Option der Zwischenspeicherung des erzeugten Stroms und somit die Verschiebung seines Konsums in die nachfragestarken Zeiten, zur Erhöhung der Eigenverbrauchsquote, untersucht. Für das ermittelte Potential wird weiterhin geklärt, ob dies wirtschaftlich erschlossen werden kann und wie sich diese Maßnahme auf die Fuhrparkemissionen auswirkt.

4.2.1. Grundlagen und Einsatzfelder

Batteriespeicher sind unverzichtbarer Bestandteil von Inselanlagen, also kleinen Netzverbünden, welche nur aus einer PV-Anlage gespeist werden, da es nur durch sie möglich ist, die Stromversorgung in lichtarmen Zeiten aufrecht zu erhalten.

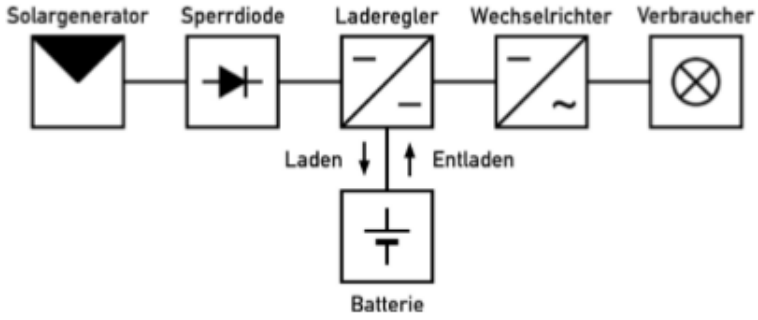


Abbildung 4.9.: Blockschaltbild einer PV-Anlage mit Batteriespeicher [94, S.107]

Abbildung 4.9 stellt schematisch die Anbindung eines Batteriespeichers an eine PV-Anlage dar. Anzumerken ist, dass in der hier diskutierten Auslegung dieses System weiterhin über einen Netzanschluss zwischen Wechselrichter und Verbraucher verfügen würde, über den überschüssiger Strom abgegeben, oder ein Strombedarf, welcher nicht durch die PV-Anlage oder die Batterie gedeckt werden kann, befriedigt werden könnte.

Bleibatterien stellen die derzeit noch am weitesten verbreitete Speichertechnik im Bereich der PV-Zwischenspeicher dar [94, S.107]. Dies liegt vor allem an ihren geringen Kosten und ihrer hohen Verfügbarkeit [115, S.105]. Von Nachteil ist allerdings eine vergleichsweise geringe Energiedichte[14]. Zunehmend werden in diesem Sektor, ebenso wie in der EV-Technik Li-Ion-Zellen eingesetzt, welche sich durch eine hohe Energiedichte, hohe

[14] Siehe hierzu die Ausführungen in Kapitel 2.1.3, insbesondere Abbildung 2.2

Wirkungsgrade und eine geringe Selbstentladung auszeichnen [115, S.112ff]. So verwendeten bereits mehr als 90% der, im letzten Quartal 2015 errichteten, PV-Speichersysteme Li-Ion-Batterien [116, S.52]. Dieser Entwicklung Rechnung tragend, liegt der Fokus der folgenden Untersuchungen auf ihnen.

4.2.2. Wirtschaftlichkeit

Die Kostensituation stellt sich wie folgt dar. Eine kWh kann entweder aus dem Netz zum Preis von 28,72 ct bezogen, oder mit einer PV-Anlage zu Kosten in Höhe von 19,22 ct erzeugt werden. Eine wirtschaftliche Zwischenspeicherung, um einen Eigenverbrauch außerhalb der Produktionszeiten zu ermöglichen, kann somit nur erfolgen, wenn die Kosten für Erzeugung und Speicherung zusammen unter den alternativen Kosten für den jederzeit möglichen Netzzukauf liegen. Die Kosten für die Speicherung einer kWh dürfen daher nicht über 9,50 ct/kWh liegen. In der nachfolgenden Untersuchung werden die Kosten für eine Speicherung anhand der, aus der Literatur entnommenen, Kosten- und Leistungsdaten für gängige Li-Ion-Speicher ermittelt.

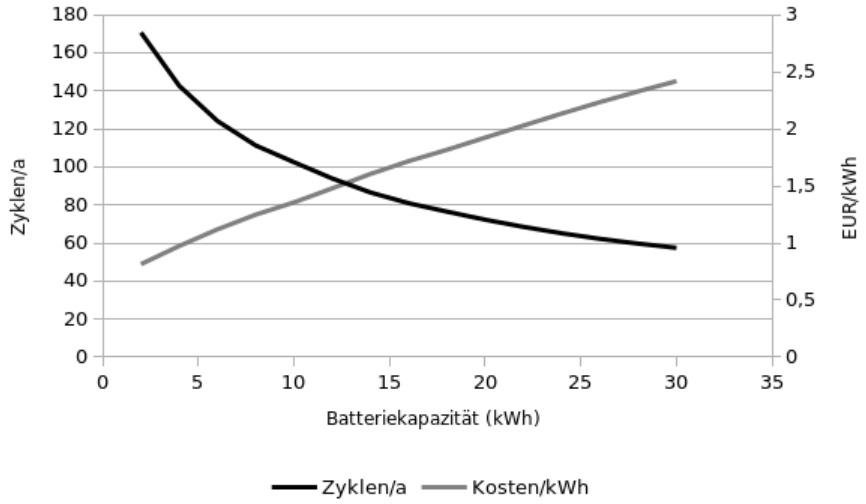


Abbildung 4.10.: Ladezyklen pro Jahr und spezifische Kosten nach Batteriegröße

Die Kosten je kWh Speicherkapazität (Systemkosten) belaufen sich auf 1.000-1.500 EUR [117, S.34]. In den hier angestellten Berechnungen wird der Mittelwert von 1.250 EUR/kWh angesetzt. Die Lebensdauer wird mit etwa 5.000 Zyklen oder fünf bis 20 Jahren, abhängig von Betriebstemperatur und Ladestand, angegeben [118, S.42]. Angenommen werden für die folgende Berechnung 5.000 Zyklen oder 10 Jahre Lebensdauer. Weiterhin ist bis zum Erreichen der 5.000 Zyklen ein Kapazitätsverlust von 20% anzunehmen [64, S.22]. Daher wird im Folgenden ein linearer Kapazitätsverlust unterstellt und pauschal mit der mittleren Batteriekapazität (90%) gerechnet.

Darüber hinaus wird in der Literatur eine Effizienz von Lade- und Entladevorgängen zwischen 90% und 100% angegeben [119, S.13]. Die Selbstentladung liegt bei 5% im Mo-

nat [118, S.42]. Für die folgende Berechnung werden pauschal Ladeverluste von 10% angesetzt. Weiterhin wird für die Berechnungen angenommen, dass der Speicher die auftretende Energienachfrage (Spitze bei drei Fahrzeugen maximal 3*3,6 kW) durch eine entsprechende Entladeleistung decken kann. Ebenso wird angenommen, dass die maximale PV-Outputleistung (7,5 kW) aufgenommen werden kann.

Um das Kosten-/Leistungsverhältnis unterschiedlicher Speicherdimensionen zu bestimmen, wird im Folgenden ein Speicher mit variabler Größe und den oben dargelegten Eigenschaften simuliert. Energiequelle ist die bereits untersuchte Beispiel-PV-Anlage, die Energiesenke ist wie bisher der Beispielfuhrpark, für den eine pauschale Ladung mit 3,6 kW unterstellt wird. Im Simulationsmodell puffert der Speicher bis zu seiner maximalen Kapazität Stromüberschüsse aus der PV-Anlage (Erzeugung übersteigt Fuhrparkbedarf) und wird entladen, sobald eine Energienachfrage besteht, die die PV-Stromerzeugung übersteigt. Kann auch der Speicher die Nachfrage nicht decken, so wird Netzstrom zugekauft. Einen simulierten Lastgang für einen Monat zeigt Abbildung 4.12.

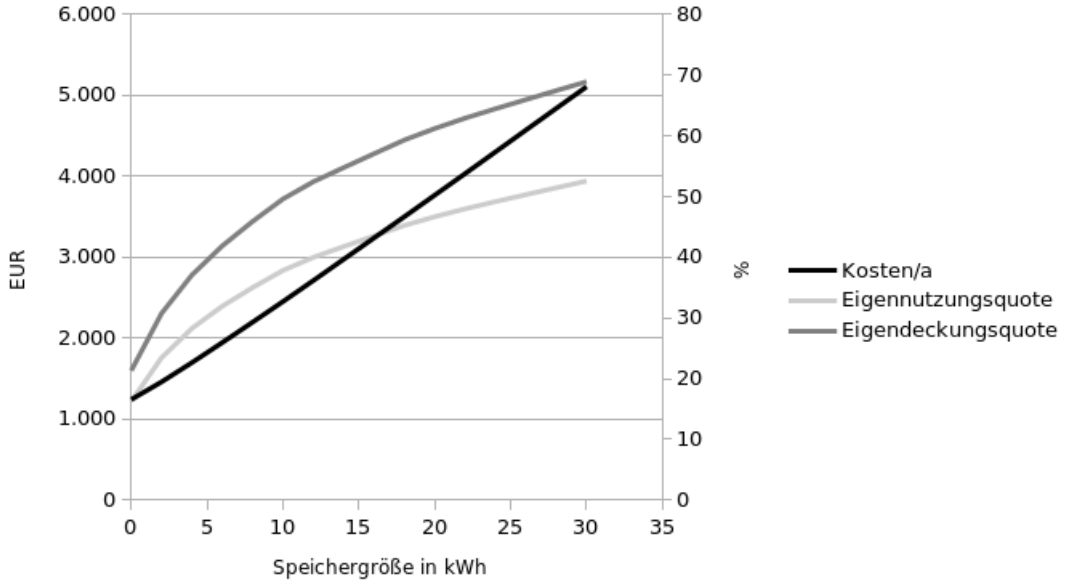


Abbildung 4.11.: Kosten, Eigennutzungsquote und Eigendeckungsquote für unterschiedliche Speichergrößen bei angenommener 3,6 kW-Ladung

Die Simulationsergebnisse zur Bestimmung der Speicherkosten/kWh und der Auslastung verschiedener Speichergrößen im Testsystem sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Es werden jeweils die Kosten des (Speicher-) Gesamtsystems auf die in der Lebensdauer zwischengespeicherte Energiemenge umgelegt. Da die Zahl der Ladezyklen pro Jahr immer unter 500 liegt (die Maximallebensdauer von 10 Jahren wird vor der maximalen Zyklenzahl von 5.000 erreicht), wird eine Lebensdauer von 10 Jahren für den Speicher angenommen.

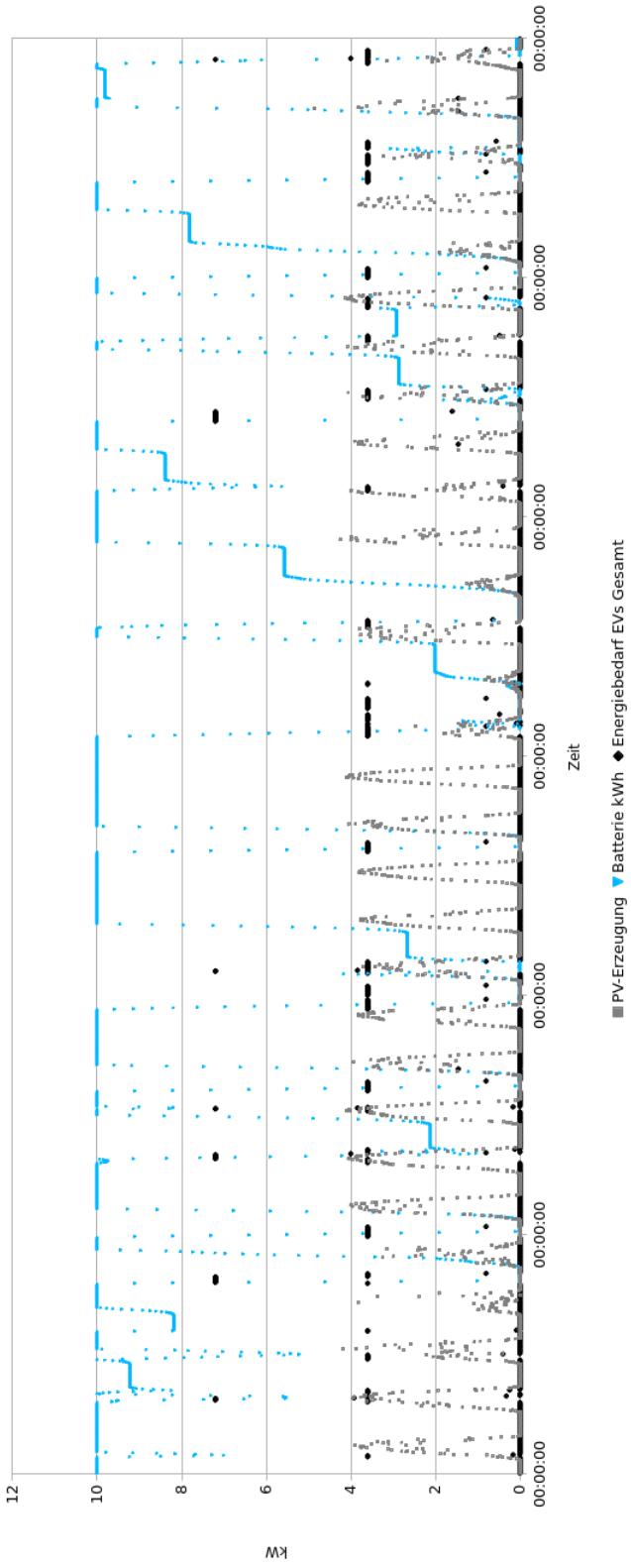


Abbildung 4.12.: Stromertrag und -nachfrage im Monat September bei angenommener 3,6 kW-Ladung und einer 10 kWh Batterie als Pufferspeicher

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass mit steigender Speichergröße die Speicherauslastung sinkt, während die Kosten/kWh steigen. Selbst die kleinste untersuchte Speichergröße von 2 kWh weist jedoch noch Kosten von 81 ct/kWh auf (wohlgemerkt ausschließlich für die Speicherung, die Kosten für die PV-Stromerzeugung kommen hinzu). Damit ist die Speicherung von Strom unter diesen Bedingungen deutlich teurer als der Netzeinkauf und somit unwirtschaftlich. Eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit ist durch einen Speichereinsatz also nicht möglich.

Grundsätzlich ist ein Stromspeicher jedoch in der Lage, sowohl Eigennutzungsquote (Prozentsatz des Stromertrags, der selbst genutzt wird), als auch Eigendeckungsquote (Prozentsatz des Strombedarfs der aus eigener Erzeugung gedeckt werden kann) deutlich anzuheben. Abbildung 4.11 zeigt hierzu die Auswirkung verschiedener Speicherkapazitäten. Ein wirtschaftlicher Betrieb und damit eine Senkung der Kosten des Flottenunterhalts, ist jedoch mit den zugrundegelegten Speicherkosten nicht möglich.

4.2.3. Ökologische Vorteilhaftigkeit

Neben der Fragestellung der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit des Einsatzes eines Zwischenspeichers, ist auch zu klären, ob durch diesen eine Reduktion, der dem Fuhrpark zuzurechnenden Emissionen, ermöglicht werden kann.

Eine Emissionsreduktion kann möglich sein, wenn die Emissionen der PV-Stromerzeugung und die vom Speicher über seinen Lebenszyklus verursachten Emissionen, z.B. durch Produktion, Transport und Recycling, unter denen von der alternativ aus dem Netz bezogenen Strommenge verursachten Emissionen liegen.

In Zahlen ausgedrückt stellt sich dieses Verhältnis wie folgt dar. Die Produktion einer kWh PV-Stroms verursacht, wie in Kapitel 4.1.4 bestimmt, 0,1 kg CO_2e [86, S.91f]. Wird alternativ Ökostrom aus dem Netz bezogen, fallen 0,292 kg CO_2e kWh an und bei deutschem Durchschnittsstrom 0,583 kg CO_2e kWh. Die Lebenszyklusemissionen des Batteriespeichers auf eine kWh umgelegt, müssen jeweils unter der Differenz zwischen den Emissionswerten liegen, um noch einen ökologischen Vorteil erbringen zu können. Der Speicher muss, um einen Emissionsvorteil zu erreichen, die Emissionen von 0,192 kg CO_2e kWh (Ökostrom) oder 0,483 kg CO_2e kWh (Durchschnittsstrom) unterbieten.

Für die folgende Untersuchung werden die durchschnittlichen Lebenszyklusemissionen eines Li-Ion-Speichers aus der Literatur entnommen.

Aktuelle Li-Ion Batterien verfügen über eine Energiedichte von 100 - 200 Wh/kg (siehe Abbildung 2.2). Andere Quellen führen eine Energiedichte von 100 - 160 Wh/kg an [115, S.112ff]. Im Weiteren wird eine Energiedichte von 100 Wh/kg angenommen. Ausgehend von den durch [64, S.24ff] ermittelten Lebenszyklusemissionen (siehe insb. Graph [64, S.27]) würde eine 24 kWh Batterie ca. 2.800 kg CO_2e verursachen. Somit ist von rund 116,67 kg CO_2e /kWh Kapazität auszugehen. Umgelegt auf eine Lebensdauer von 5.000 Zyklen oder 10 Jahre, bei 20% Kapazitätsverlust über diese Lebensdauer (es wird wie im

vorangegangenen Kapitel ein linearer Kapazitätsverlust unterstellt und pauschal mit einer Batteriekapazität von 90% gerechnet), würde eine Batterie je wieder ausgespeicherter kWh 0,025925926 kg CO_2e verursachen.

Zu beachten ist, dass der Speicher, um diese Kennzahl zu erreichen, vollständig ausgelastet sein muss. Durch die Volatilität von Stromerzeugung und Nachfrage im Realbetrieb ist von einer geringeren Auslastung auszugehen, wie sie bereits im vorangegangenen Wirtschaftskapitel bestimmt wurde. Daher erfolgt nun die Verteilung der Speicheremissionen auf die tatsächliche Auslastung. Ermittelt werden diese Werte analog zum Vorgehen in Abbildung 4.10 anhand der Zyklenzahl des Speichers im Einsatz, abhängig von seiner Kapazität.

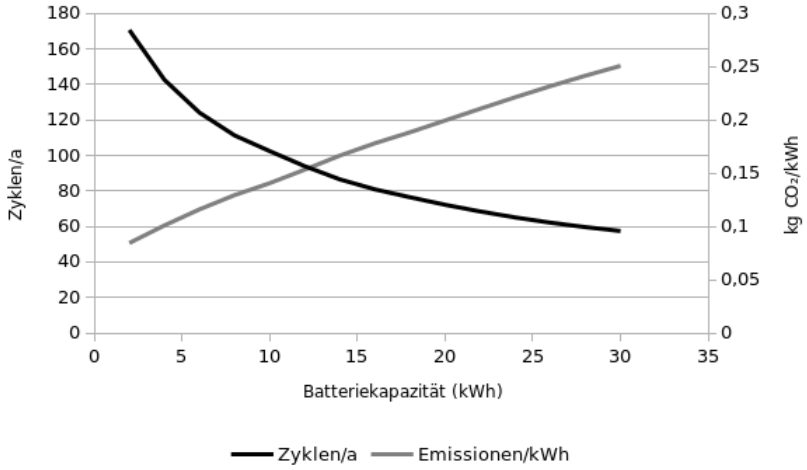


Abbildung 4.13.: Ladezyklen pro Jahr und spezifische Emissionen nach Batteriegröße

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel ermittelt wurde, wird das kalendarische Lebensende des Speichers vor der maximalen Zyklenzahl erreicht. Die o.g. Emissionen je kWh unter Idealbedingungen werden somit nicht erreicht. Stattdessen verteilen sich die Lebenszyklusemissionen auf eine geringere Energiemenge. In Abbildung 4.13 wird diese Abhängigkeit unter Variation der Speichergröße dargestellt.

Die erreichbaren Zyklenzahlen ergeben sich wie bisher aus dem simulierten Zusammenspiel der 7,5 kWp PV-Anlage, der Fuhrpark-Energienachfrage bei 3,6 kW Ladeleistung und einem Pufferspeicher in der jeweiligen Größe. Erkennbar ist, dass mit steigender Speichergröße die Auslastung und somit die erreichbare Zyklenzahl/a sinkt und damit die spezifischen Emissionen steigen. Ab einer Speichergröße von 20 kWh liegen die Emissionen mit 0,299 kg CO_2e /kWh über denen, welche aus dem Netz bezogener Ökostrom verursacht. Alle hier betrachteten Speichergrößen verursachen jedoch deutlich weniger Emissionen, als der durchschnittliche deutsche Netzstrom.

In einer weiteren Betrachtung wird nun die für eine Emissionsminimierung optimale Speichergröße ermittelt und ihr Einfluss auf die Fuhrparkemissionen errechnet.

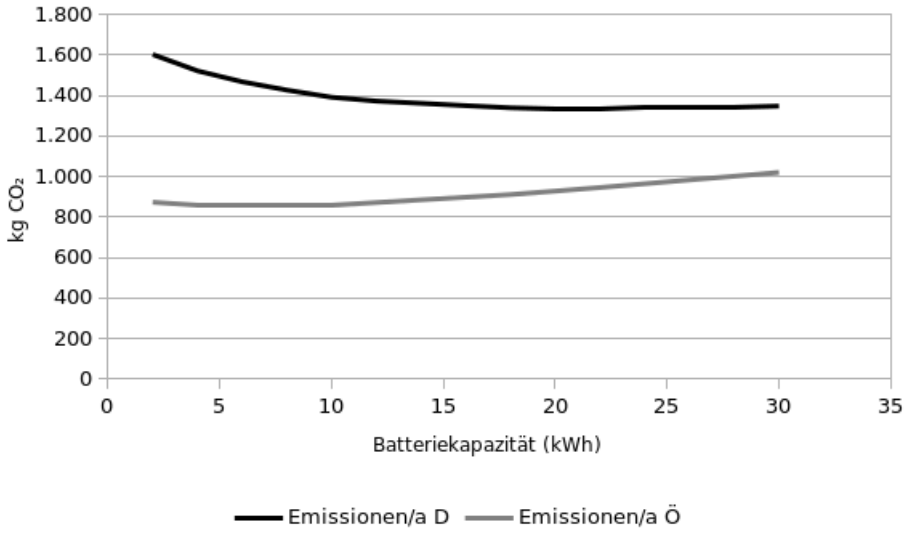


Abbildung 4.14.: Fuhrparkemissionen pro Jahr nach Batteriegröße

In Abbildung 4.14 werden die energiebezogenen Gesamtemissionen des Fuhrparks für verschiedene Speichergrößen und Energiequellen abgetragen.

Die Wertereihen ergeben sich aus der Summe der Emissionen von der jeweils bezogenen Energiemenge an PV-Strom, den Batterieemissionen, umgelegt auf die im Jahr zwischengespeicherte Energiemenge, sowie die aus dem Netz bezogene Energiemenge (getrennte Szenarien für **D**urchschnitts-Netzstrom und **Ö**ko-Netzstrom).

Es ist anzuführen, dass bei dieser Berechnung **keine** „Emissionsgutschrift“ für Strom verrechnet wurde, der emissionsarm von der PV-Anlage generiert, aber aufgrund mangelnder lokaler Nachfrage und Speicherkapazität in das Netz abgegeben werden musste.

Diese Maßnahme soll eine Verzerrung der Ergebnisse dahingehend vermeiden, dass der Bau von PV-Anlagen (gilt analog für andere Erneuerbare-Energien-Anlagen) belohnt würde, für deren Energieertrag z.B. in Spitzenzeiten keine Nachfrage vorliegt. Eine solche Praxis könnte bei breiter Anwendung dazu führen, dass ein Stromüberschuss im Netz vorliegt und Regulationsmaßnahmen, z.B. eine Drosselung anderer PV-Anlagen oder die Speicherung des Überschusses an anderer Stelle, nötig würden.

Die Minimalwerte, welche sich in den hier durchgeführten Simulationen in 2 kWh-Schritten für die Variation der Speichergröße ermitteln ließen, belaufen sich auf jährliche, energiebezogene Emissionen von 1.342,64 kg CO_2e bei 22 kWh Speicherkapazität für die Variante der Deckung des Netzstrombedarfs aus durchschnittlichem Netzstrom und 852,5 kg CO_2e bei 6 kWh Speicherkapazität und Deckung des Netzstrombedarfs aus Ökostrom.

Hinzu kommen die anteiligen Emissionen für die EV-Fertigung in Höhe von 2.773,11 kg CO_2e, sowie die ICE-Emissionen, welche von der Variation der Stromerzeugung unberührt

bei 18.605,11 kg CO_2e liegen. Somit ergeben sich jährliche Gesamtemissionen von 22.720,86 kg CO_2e für die Durchschnitts-Netzstrom-Variante und 22.230,72 kg CO_2e für die Öko-Netzstrom-Variante. Verglichen hiermit liegen die jährlichen Emissionen eines reinen ICE-Fuhrparks bei 23.064,63 kg CO_2e.

Es ist somit belegt, dass durch den Einsatz von EVs in Verbindung mit PV-Stromerzeugung und dem Einsatz eines Zwischenspeichers, eine Emissionssenkung gegenüber einem vergleichbaren, nur aus ICEs bestehenden Unternehmensfuhrpark, erzielbar ist. Diese beläuft sich auf 1,49% im Falle des Bezuges von durschschnittlichem Netzstrom und auf 3,62%, wenn der Netzstrombedarf aus Ökostrom gedeckt wird.

Wird eines der drei EVs zusätzlich als Tandemfahrzeug genutzt, verursacht es über das Jahr hinweg morgens eine Energienachfrage von insgesamt 1.287,47 kWh. Diese kommen dann zu 40,9% aus der Batterie, zu 49,53% aus dem Netz und zu 9,87% direkt aus der PV-Anlage. Damit sinken die, der Privatnutzung zuzuordnenden Emissionen, im Vergleich zum in Kapitel 3.3.4 angenommenen reinen Netzbezug von 1895,51 kg CO_2e/a auf 1528,54 kg CO_2e/a (beide Angaben für Durchschnittsstrom im Falle eines Netzbezugs). Dies entspricht einer Emissionsreduktion von 19,36%.

4.3. Energiemanagement

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Fahrzeugladungen als Ereignis angesehen, das zeitlich, wie von seiner Intensität her, fest determiniert ist. Es stellt sich jedoch die Frage, ob es möglich ist, diese Faktoren zu steuern, um die Stromnachfrage an die Ertragskurve der PV-Anlage, die Leistungsfähigkeit eines Batteriespeichers oder der Auslastung des Stromnetzes, anzupassen. In den folgenden Unterkapiteln werden Methoden und mögliche Potentiale, sowie Umsetzungsmöglichkeiten für die Praxis erläutert. Praktische Ergebnisse konnten zu diesem Bereich jedoch, auf Grund der Komplexität einer solchen Umsetzung, nicht im Rahmen des dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsprojektes gewonnen werden.

4.3.1. Grundlagen

In aus erneuerbaren Energien gespeisten Netzen liegt die Bestrebung vor, den aus regenerativen Quellen erzeugten Strom so effizient wie möglich zu nutzen, da nur so ein finanzieller Vorteil gegenüber dem Netzbezug von Strom entsteht (s.o.). Da die Ertragskurve durch Umweltfaktoren bestimmt wird und nicht direkt beeinflussbar ist, ist der Fokus der Optimierungsmaßnahmen auf die Verbrauchsseite zu richten.

Die hier diskutierten Maßnahmen fallen unter das sogenannte Demand Side Management (DSM). Gegenstand des DSM ist es, den Energieverbrauch und somit die Stromnachfrage aktiv zu steuern (Anm.: im Gegensatz zur konventionell betriebenen Steuerung der Produktionsseite, also etwa dem Hochfahren eines Kraftwerks). Voraussetzung ist, dass ein gewisser Grad an Flexibilität des Verbrauchers hinsichtlich des Zeitpunktes und der Intensität seiner Energienachfrage vorliegt. Ziele des DSM sind das Vermeiden von Spitzenlasten, die das Energieangebot zu übersteigen drohen, das Verschieben der Nachfrage aus Zeiten geringer Energieerzeugung in Zeiten mit höherer Energieerzeugung (Beispiel PV: Verschiebung der Nachfrage in die Mittagszeit), und die Verschiebung der Energienachfrage in Zeiten mit geringer Nachfrage, um Erzeugungsanlagen effizienter auszunutzen [120, S.13f].

Der Vollständigkeit halber ist in diesem Zusammenhang auch das VtG-Konzept zu erwähnen, welches vorsieht, dass die Fahrzeugbatterie selbst als Stromspeicher im lokalen Netzverbund fungiert und nicht nur geladen wird, sondern auch entladen werden kann, um andere Verbraucher zu versorgen [121, S.116]. Da in der hier behandelten Ausgestaltung das EV der einzige Verbraucher im lokalen Netz ist, findet es in dieser Abhandlung keine Anwendung.

Die Möglichkeit der Verschiebung von Ladungen ist im betrachteten Szenario als gegeben anzusehen, da die durchschnittliche Ladung 9,61 kWh umfasst und zwischen zwei Dienstfahrten auf einem EV im Mittel 67,3 Stunden liegen (hier wurde das Potential aus Kapitel 3.1.2 zugrunde gelegt, nicht der in der Praxis gewonnene Wert). Bei einer Ladeleistung von 22 kW ist die Ladezeit im Schnitt also deutlich kürzer als die Standzeit. Somit kann

die Ladung an einen anderen Zeitpunkt verschoben werden, die Ladeleistung reduziert werden oder diese beiden Maßnahmen in Kombination angewandt werden. Voraussetzung ist, dass die Einsatzzeiten des Fahrzeuges bekannt sind. Da zwischen Buchung und Fahrtantritt durchschnittlich 13,22 Tage liegen, ist auch dies für die meisten Situationen als gegeben anzunehmen. Weiterhin müssen die Zeiten, zu denen ein Energieangebot besteht, bekannt sein. Im Falle der PV-Stromerzeugung sind hierzu Wetterprognosen erforderlich.

Um die bekannten, sich jedoch stetig ändernden Nachfragen und das Angebot an Energie aus PV-Anlage und möglicherweise einem Batteriespeicher anzupassen, existieren verschiedene methodische Ansätze. Im Folgenden werden beispielhaft zwei Methoden zur Steuerung der Stromnachfrage vorgestellt. Diese Aufstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und soll lediglich verdeutlichen, wie eine methodische Lösung aussehen könnte.

4.3.2. Beispielhafte Methodiken der Optimierung

4.3.2.1. Simplex Algorithmus

Eine beispielhafte Umsetzung einer Energiesteuerung demonstriert das durch Link [122] dargestellte Modell einer lokalen Betriebsführungsoptimierung von Energieerzeugungs- und Speicherungsanlagen mit Berücksichtigung der Ladeanforderungen eines Elektrofahrzeuges.

Seine Umsetzung verwendet den *Simplex-Algorithmus* in Kombination mit dem *Branch and Bound* Verfahren.

Der *Simplex-Algorithmus* ist ein Algorithmus aus der linearen Programmierung, der dazu eingesetzt wird, eine Zielfunktion unter gegebenen beschränkten Ressourcen und konkurrierenden Nebenbedingungen zu minimieren oder zu maximieren. Er stellt einen effizienten und in der Praxis weit verbreiteten Algorithmus dar [123, S.783].

Das *Branch and Bound* Verfahren, dient der Aufstellung eines Lösungsbaumes (*Branch*), in welchem durch Abtrennen unbrauchbarer Lösungsräume (*Bound*) auf effizientem Weg, die optimale Lösung ermittelt wird [124, S.86].

Für seine Umsetzung überführt Link die verschiedenen Systemparameter in eine Kostenfunktion, die minimiert werden soll, oder eine Ertragsfunktion, die maximiert werden soll. Diese enthält die Kosten für Strombezug und Erzeugung, sowie die Kosten für die Speichernutzung. Auch die Erträge durch eine mögliche Stromeinspeisung werden mit einbezogen.

Es werden zusätzlich mehrere Nebenbedingungen aufgestellt, die bei der Optimierung nicht verletzt werden dürfen. Zum einen ist etwa zu jedem Zeitpunkt die nachgefragte Energie der Verbraucher zu decken (eine Unterversorgung mit Strom ist nicht zulässig), zum anderen muss die elektrische Last im System der Summe aus PV-Stromverbrauch plus Batterieverbrauch und Netzbezug entsprechen (keine Energieflüsse hin zu anderen Quellen oder Verbrauchern). Aus der Summe der möglichen Lösungen für jeden Zeitschritt

wählt der Algorithmus diejenige mit den minimalen Kosten (bzw. maximaler Ertrag) zur Umsetzung aus [122, S.54ff].

4.3.2.2. Agentensysteme

Eine weitere Herangehensweise an die Energiesteuerung stellt die Nutzung von Multi-Agentensystemen dar. Ein Agent ist in diesem Zusammenhang ein Computersystem, welches in der Lage ist, autonom zu handeln und so selbst einen Weg zu bestimmen, um seine Zielsetzung zu erreichen. Zudem können Agenten mit anderen Agenten interagieren und mit diesen kooperieren, verhandeln oder Handlungen koordinieren [125, S.XI].

Als Beispiel für eine solche Umsetzung lässt sich etwa das *PowerMatcher*-System anführen [126]. Mit dem Fokus auf die Steuerung von häuslichen Blockheizkraftwerken entwickelt, ist es auch in der Lage, andere lokale Produzenten und Konsumenten von Energie, wie etwa PV- oder Windkraftanlagen, Wärmepumpen oder auch EVs zu verwalten. Ziele dieser Anwendung können die Reduktion von Spitzenlasten, die optimale Ausnutzung lokal erzeugter Energie, oder Ausgleichsleistungen in semi-autonomen Netzen sein.

In diesem Konzept wird jedes Gerät im Netz, sowohl Energieproduzenten als auch -konsumenten, von einem Agenten repräsentiert. Dieser ist bestrebt, die Aufgabe des Gerätes auf möglichst ökonomische Weise zu verrichten. Energie wird hierzu auf einem elektronischen Markt gehandelt. Dieser wird vom PowerMatcher bereitgestellt. In vorgegebenen Zeitabständen fragt dieser von den Agenten Gebote für die Produktion oder den Bezug von Energie ab und bestimmt daraus einen für jeden Agenten individuellen Gleichgewichtspreis, den er an diese zurück kommuniziert. Die Agenten leiten hieraus ihr Verhalten, also die Produktion oder den Konsum von Energie, in einem bestimmten Umfang, für die nächste Zeitperiode ab.

4.3.3. Technische Umsetzung

Die Anbindung eines EVs an ein Energiemanagementsystem (EMS) wird im Folgenden am Beispiel des Konzeptes zur Smart-Home-Integration eines EVs von Mültin [14] erläutert. Die Kommunikation findet in dieser Ausgestaltung nach dem in der ISO/IEC 15118 festgelegten Client/Server-Prinzip statt. Das EMS stellt in diesem System den Server dar, auf dem Ertragsprognose und Verbrauchsplanung (z.B. nach dem in Kapitel 4.3.2.1 vorgestellten Prinzip) durchgeführt werden. Das EV bzw. dessen Ladecontroller (Electric-Vehicle-Charge-Controller (EVCC)) übernimmt die Rolle des Clients, der Anfragen an den Server stellt.

Für die Kommunikation wird das TCP/IP-Protokoll verwendet. Das EV stellt, sobald es mit der Ladestation verbunden wird, über die Steuerpins des Ladekabels per Power Line Communication (PLC)[15] eine Datenverbindung mit dieser her. Diese wiederum ist per Ethernet-Kabel oder z.B. UMTS mit dem EMS verbunden. Abbildung 4.15 stellt diese Verbindungsarchitektur schematisch dar.

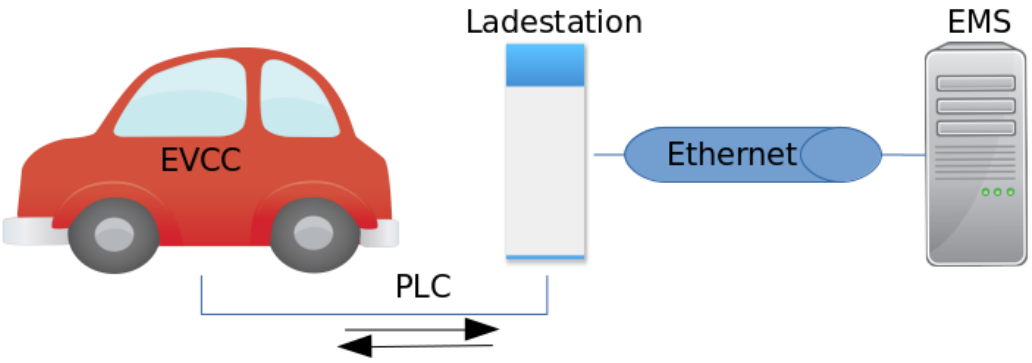


Abbildung 4.15.: Kommunikation zwischen den Akteuren des DSM, eigene Darstellung in Anlehnung an [14]

Über diese Verbindung überträgt das EV den Verriegelungsstatus des Ladekabels, die aktuelle Ladeleistung, den minimalen Batterieladezustand, die geplante Abfahrtzeit (Anm.: In der in dieser Arbeit diskutierten Ausführung würde dieser Wert dem Buchungssystem entnommen werden.), die benötigte Energiemenge, sowie die minimal wie maximal zulässige Ladeleistung.

Der Server kann den EVCC über diese Verbindung anweisen, die Ladung für einen bestimmten Zeitraum zu unterbrechen, oder die Ladeleistung anzupassen.

Die konkrete Umsetzung der Ladesteuerung erfolgt auf die folgende Weise: Sobald das EV mit der Ladestation verbunden wurde und seine Ladeparameter übermittelt hat, bestimmt das EMS aus diesen Daten und den vorliegenden Ertragsprognosen den optimalen Ladeverlauf. Dieser wird zurück an den EVCC kommuniziert und von diesem umgesetzt. Dabei wird die gemeldete Minimalladung sofort und ohne Optimierung umgesetzt, um einen kurzfristigen Einsatz des Fahrzeuges zu ermöglichen (Anm.: Dies könnte etwa die benötigte Ladung für eine ungeplante Heimfahrt des Tandempartners sein). Es folgt über den gesamten Zeitraum, über den eine Verbindung besteht, ein stetiger Informationsaustausch über den Fortschritt der Ladung und evtl. auftretende Situationsänderungen, wie etwa ein ungeplantes Trennen des EVs von der Ladestation.

Kommerziell erhältlich ist derzeit etwa das openWB-System, ein Paket aus Software und Ladetechnik, das eine Ladesteuerung von bis zu drei EVs abhängig von PV-Stromerzeu-

[15] Übertragung von Datensignalen über ein Stromkabel

gung, Netzlast, verfügbarer Anschlussleistung, Ladestand oder Uhrzeit vornehmen kann [127]. Ein für den Hausgebrauch ausgerichteter Systembausatz für eine openWB-Wallbox mit einer Ladeleistung von bis zu 22 kW für ein Fahrzeug wird für ca. 500 EUR vertrieben [128]. Hinzu kämen Kosten für Montage und Anschluss. Für den Betriebseinsatz wäre zudem ggf. ein Austausch von Komponenten zur Erhöhung der Verlässlichkeit erforderlich. Die Größenordnung der anfallenden Kosten für den Einsatz von Ladeinfrastruktur mit Optimierungssteuerung liegt zwar über der einer herkömmlichen Ladetechnik, sie kann jedoch deutlich kostengünstiger gestaltet werden, als der Einsatz von Zwischenspeichern im lokalen Stromnetz.

4.4. Zusammenfassung

Es ließ sich ermitteln, dass der Preis einer lokal gewonnenen PV kWh unter dem Einkaufspreis einer kWh Netzstrom liegt. Die Volatilität der Erzeugung in Kombination mit einer starken Konzentration der Energienachfrage auf wenige Peaks führt jedoch dazu, dass durch den Einsatz einer Energieerzeugungsanlage allein keine Kostenreduktion für den Fuhrparkbetrieb erzielt werden kann.

Die darauf hin untersuchten Ansätze zur Synchronisierung von Energieerzeugung und -nachfrage sind in der Lage, sowohl einzeln, als auch in Kombination eingesetzt, Reduktionen von Emissionen und teilweise von Betriebskosten zu erzielen.

Die simpelste Maßnahme zur Erhöhung der Eigenenergienutzung und damit der Kosten- und Emissionssenkung des Fuhrparkbetriebs, stellt die pauschale Reduktion der Ladeleistung dar. Diese ist in der Lage, die Nutzungsquote der lokal gewonnenen Energie auszubauen. Als einzelne Maßnahme ermöglicht sie jedoch keine ausreichende Erhöhung der Nutzungsquote, um den Betrieb einer PV-Anlage für die Energieversorgung des betrachteten Fuhrparks wirtschaftlich zu machen. Ebenso erlaubt es die weiterhin geringe Nutzungsquote sowohl bei normaler, als auch bei reduzierter Ladeleistung nicht, eine nennenswerte Emissionsreduktion des Fuhrparkbetriebs zu erreichen.

Ein Batteriespeicher hingegen ist in der Lage, die Ertragskurve und die Verbrauchskurve deutlich stärker aneinander anzugleichen und ermöglicht damit erstmals nennenswerte Eigennutzungsquoten. Ein auf diese Weise mit Energie versorgter, gemischter EV/ICE-Fuhrpark ist so in der Lage, seine Emissionen unter die, eines vergleichbaren reinen ICE-Fuhrparks zu senken.

Dieses Ergebnis bleibt auch bei Kombination mit dem Tandemmodell bestehen und kann sogar positive Effekte auf die Emissionen im Rahmen der Privatnutzung erzielen.

Allerdings sind die momentanen Batteriekosten zu hoch, als dass diese Maßnahme zeitgleich eine Senkung der Betriebskosten erzielen könnte.

Letztlich bietet DSM die Möglichkeit, Ertrag und Verbrauch aneinander anzugleichen, ohne zwingend einen Zwischenspeicher zu erfordern. In Kombination mit einem solchen könnte dessen Auslastung allerdings zusätzlich gesteigert werden. Auf Grund der Komplexität dieses Ansatzes, ist an dieser Stelle jedoch keine quantitative Aussage über die Auswirkungen dieser Maßnahme auf Wirtschaftlichkeit und Emissionseinsparpotential möglich.

5. Herausarbeitung der kritischen Erfolgsfaktoren

Mit dem Abschluss der in den vorangegangenen Kapiteln durchgeführten Datenerhebung und -auswertung kann im aktuellen Kapitel eine globale Analyse der erzielten Ergebnisse vorgenommen werden.

Erster Schritt zur Bewertung der erzielten Ergebnisse ist der Abgleich der Forschungsfragen mit den erzielten Ergebnissen und wo angebracht, die Einordnung dieser in den aktuellen Forschungsstand in der Literatur, um aufzuzeigen, in welchem Rahmen sie auf andere Situationen übertragbar sind.

Da sich im Laufe der durchgeführten Untersuchungen herausgestellt hat, dass die angewandten Methoden zur Eignungsprüfung und Potentialermittlung nicht in der Lage waren, die gestellten Fragen vollumfänglich zu beantworten, wird darauf eingegangen, wo die Grenzen der eingesetzten Methodiken liegen und welche Untersuchungen somit in Zukunft noch durchgeführt werden sollten.

Die in dieser Arbeit durchgeführten empirischen Untersuchungen des zusammengestellten Maßnahmenpaketes sind nur in der Lage, seine Performanz in einem beschränkten Zeitraum zu erfassen. Da sein Erfolg in der Zukunft durch Wechselwirkungen mit der Umwelt beeinflusst wird, erfolgt eine Analyse, welche Stärken und Schwächen es aufweist und welche Chancen und Bedrohungen sich daraus im Falle wechselnder Einsatzbedingungen ergeben. Abgeleitet werden hieraus mögliche Strategien für seinen optimalen Einsatz.

Die Wichtigkeit dieser Einflussanalyse verdeutlicht die Betrachtung der rasanten Entwicklung im Bereich der Elektromobilität. Da sich bereits im Erstellungszeitraum dieser Arbeit gravierende Fortschritte in Technik, Preisgestaltung und Politik ergeben haben, welche die erzielten Ergebnisse deutlich beeinflussen, werden die wichtigsten Entwicklungen und ihre Bedeutung für die untersuchten Maßnahmen in einem Überblick dargelegt.

Eine abschließende Zusammenfassung der in den einzelnen Unterkapiteln gewonnenen Erkenntnisse ermöglicht eine globale Beurteilung der Einzelergebnisse und ihrer Wechselwirkungen untereinander.

5.1. Diskussion und Einordnung der erzielten Ergebnisse

Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen ist eine Erfassung der grundsätzlichen Eignung von EVs für die Deckung des betrieblichen Mobilitätsbedarfs, sowie die Fähigkeit der Maßnahmen der Eigenstromproduktion, sowie der Nutzung eines Carsharingkonzeptes, diese Eignung zu steigern.

Im Weiteren werden die einzelnen Teilergebnisse dargelegt und ihre Ausprägung in den aktuellen Forschungsstand eingeordnet.

Ein signifikantes **Elektrifizierungspotential** konnte im betrachteten Fuhrpark mit der eingesetzten Fahrzeugtechnik festgestellt werden (ca. 52% aller Fahrten, vgl. Kapitel 3.1.2). Weder Reichweitenbeschränkungen, noch Ladezeiten stellen ein generelles Hindernis für die dienstliche Nutzung von EVs dar. Durch das großflächige Einsatzgebiet der Fahrzeuge wäre ein vollständiger Verzicht auf ICEs im betrachteten Fuhrpark mit der untersuchten EV-Technik jedoch nicht praktisch umsetzbar.

Der Abgleich der erhobenen Fahrzeugnutzung mit der Literatur zeigt, dass das Nutzungsprofil der Fahrzeuge im untersuchten Fuhrpark deutlich vom deutschen Unternehmensdurchschnitt abweicht. Dort liegen 20% der Fahrten bei maximal 3 km, 33% bei maximal 6 km. Nur ca. 10% der Fahrten erstrecken sich über Entfernungen von mehr als 70 km, nur ca. 6% überschreiten 100 km. Diese Streckenangaben umfassen jeweils die Entfernung (gefahren) zwischen zwei nacheinander aufgesuchten Orten [62, S.392]. Die in dieser Erhebung erfasste Fahrzeugnutzung war hingegen deutlich intensiver und wies bei ca. 50% der Fahrten eine Strecke (bis zum Ziel und zurück zum Unternehmensstandort) von über 100 km auf (vgl. Abbildung 3.2). Dies deutet auf ein höheres EV-Einsatzpotential in anderen Fuhrparks hin.

Anzuführen ist etwa eine Befragung von 3.111 privaten und gewerblichen EV-Nutzern, in der 34% der befragten Unternehmensnutzer aussagten, dass sie sämtliche ihrer Dienstfahrten mit einem EV absolvieren können. Die häufigste Ursache für die Nichtnutzung eines EVs stellt im Betriebsumfeld die mangelnde Eignung zum Gütertransport dar [129, S.43f].

Emissionen können durch Integration von EVs in die betrachtete Fahrzeugflotte gesenkt werden, sofern die Nutzung von lokal gewonnener und gespeicherter, erneuerbarer Energie umgesetzt wird. Ein bloßer Austausch von ICEs durch EVs reicht im betrachteten Szenario zur Emissionssenkung nicht aus. Anzumerken ist, dass durch die o.g. Gründe immer noch eine Vielzahl von ICEs im (hypothetischen) Fuhrpark gehalten werden, die die längeren Strecken bedienen. Daher werden noch immer hohe Gesamtemissionen durch den Fuhrpark verursacht.

Für die Wirksamkeit der lokalen Stromerzeugung aus Sonnenenergie ist die Strahlungsintensität am Standort entscheidend. Daher sind an dieser Stelle die Bedingungen am Teststandort in Kontext zu setzen. Mit einer mittleren jährlichen Globalstrahlung von

zwischen 981 und 1.000 kWh/m^2 liegt der Strahlungswert am gewählten Standort im unteren Drittel der in Deutschland auftretenden Strahlungsbedingungen. Damit ist der Energieertrag z.B. deutlich geringer, als an anderen Standorten, etwa in Süddeutschland, an denen Strahlungswerte von ca. 1.200 kWh/m^2 erreicht werden können. Der nationale Mittelwert liegt bei 1.054 kWh/m^2 (siehe Globalstrahlungsmittelwerte für Deutschland im Anhang, aus [130]). Somit ist festzuhalten, dass die erzielten spezifischen Anlagenerträge leicht unter dem Ergebnis liegen, welches an einem durchschnittlichen deutschen Unternehmensstandort zu erwarten wären.

Die **Kosten** für einen gemischten EV/ICE-Fuhrpark übersteigen die Kosten eines vergleichbaren, reinen ICE-Fuhrparks. Soll zusätzlich eine Emissionssenkung gegenüber dem reinen ICE-Fuhrpark angestrebt werden, ist dies zwar durch eine **lokale Stromerzeugung** aus regenerativen Quellen möglich, die lokale Zwischenspeicherung von Energie verursacht jedoch deutliche Mehrkosten und verschlechtert die Kostensituation gegenüber einem reinen ICE-Fuhrpark weiter.

Dieses Ergebnis ist mit drei Faktoren zu erklären, welche einen maßgeblichen Einfluss auf die anfallenden Fuhrparkkosten haben. Zunächst bedingt die Streckenverteilung im Fuhrpark eine weiterhin hohe ICE-Quote, weshalb die geringeren Betriebskosten der EVs kaum ins Gewicht fallen. Daneben sorgt die Verteilung der Fahrzeiten im Fuhrpark dafür, dass die lokale Stromerzeugung und die Ladezeiten nur eine geringe zeitliche Deckung aufweisen und somit eine teure Zwischenspeicherung nötig wird, um Emissionsvorteile zu erschließen. Zuletzt verursachen hohe Systemkosten sowohl für EVs, als auch für Speichersysteme hohe Gesamtkosten. Erst eine hohe Marktdurchdringung dieser Güter und die damit verbundenen Skaleneffekte stellen für die Zukunft eine Verbesserung dieser Situation in Aussicht (siehe Abschnitt 5.4).

Neben Fahrzeugen und Speichersystemen stellt die **Ladeinfrastruktur** einen weiteren Systembestandteil dar, dessen Leistungsfähigkeit die Verfügbarkeit des Fuhrparks entscheidend beeinflusst, der jedoch auch immense Kosten verursachen kann.

Die Untersuchung der aufgezeichneten Fahrten zeigt, dass keine aufwändige und kostenintensive Gleichstromladeinfrastruktur erforderlich ist, um den dienstlichen Einsatz (ggf. in Kombination mit dem Tandemmodell) von EVs zu ermöglichen.

Die durchgeführten Ertrags- und Verbrauchsuntersuchungen zeigen jedoch, dass der ungespeicherte Output einer in der Ertragssumme auf den Fuhrpark ausgelegten PV-Anlage deutlich unter dem Strombedarf einer solchen Ladeeinrichtung liegt. Da die Kosten einer Zwischenspeicherung prohibitiv hoch liegen, stellt eine intelligente Ladesteuerung, welche die Energieabgabe der Ladeinfrastruktur nach Ertrag und Verfügbarkeitsbedarf optimiert, eine zu erwägende Option dar.

Die Anwendung des **Tandemmodells** ist in der Lage, die Emissionsreduktion im Fuhrpark in signifikantem Maß auszuweiten. Im betrachteten Fuhrpark hätte bereits der Einsatz eines gemischten Fuhrparks mit einem Tandemfahrzeug (Höchstzahl im gegebenen

Fuhrpark, determiniert durch dienstliche Fahrzeugnutzung) dafür gesorgt, dass eine Senkung der Gesamtemissionen (unter Einbeziehung des Wegfalls eines privaten PKW) bei Nutzung von Ökostrom (auch aus dem Stromnetz, nicht zwingend lokal erzeugt) vorliegt. Ebenso kann die Anwendung des Tandemmodells die Kostendifferenz zwischen einem konventionellen und einem gemischten Fuhrpark in erheblichem Maß reduzieren, ist jedoch im betrachteten Versuch durch eine geringe Durchdringungsquote nicht in der Lage gewesen, diese voll aufzuwiegen. Auf Seiten des Tandempartners hingegen zeigt sich ein deutlicher finanzieller Vorteil durch Nutzung des Tandemmodells im Vergleich zum Unterhalt eines eigenen PKWs. Ein entsprechender Anreiz für eine Umsetzung des Modells ist damit sowohl für das Unternehmen, als auch den Mitarbeiter gegeben.

Auch konnte die organisatorische Anwendbarkeit des Nutzungskonzeptes demonstriert werden.

Eine wichtige Feststellung, die im Laufe der empirischen Erhebung getroffen werden konnte ist, dass die tatsächliche **EV-Nutzung** weit hinter dem theoretischem Potential zurück blieb. Erstaunlich ist, das diese Beobachtung sogar im Falle eines REEV gemacht werden konnte, welches hinsichtlich seiner Reichweite einem regulären ICE in nichts nach stand.

Eine Untersuchung zur Akzeptanz von EVs aus dem Jahr 2012 teilt die betriebliche Nutzer in drei Gruppen ein: 37% Begeisterte, 33% Kritische („Ist Zukunftstechnologie, braucht aber noch Zeit“), 30% Ablehner (Nicht bereit, irgendwelche Einschränkungen gegenüber ihrem aktuellen Status Quo in der Individualmobilität hinzunehmen) [8, S.71f].

Es ist anzunehmen, dass der hier dargestellten Erprobungssituation, in der ein Fahrzeugüberangebot vorlag, keine Gründe für Skeptiker und Kritiker existierten, auf ein EV zurückzugreifen, solange alternativ ein ICE aus dem Fuhrpark zur Verfügung stand. In der Folge fiel die EV-Nutzung geringer aus als erwartet.

5.2. Grenzen der angewandten Methodik

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Prüfung, ob EVs im Betriebseinsatz Verbrenner in signifikantem Maß ersetzen können, ohne einen finanziellen oder ökologischen Nachteil zu verursachen, wenn sie mit einem Carsharing-Konzept und einer Versorgung aus erneuerbaren Energien kombiniert werden.

Die in der empirischen Untersuchung erzielten Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass die geprüften Faktoren nicht das gesamte Spektrum der Einflussfaktoren darstellen, die eine Nutzbarkeit von EVs im Betriebsumfeld determinieren. So hat sich gezeigt, dass die Entscheidung für die Nutzung eines Fahrzeuges nicht rein rational getroffen wird, sondern eine emotionale Komponente diese beeinflusst. Mit den in dieser Arbeit angestellten Reichweitenvergleichen, Kostenberechnungen und Emissionsanalysen kann zwar eine rationale Entscheidungsgrundlage dargelegt werden, die Nutzungsquoten der EVs in der empirischen Erhebung zeigen jedoch, dass es über die technische Eignung hinaus gehende Faktoren gibt, die die praktische Anwendung von EVs hemmen können.

Weiterhin wurden die in dieser Arbeit verwendeten Daten in einem einzigen Betrieb erhoben. Damit ist etwa der ermittelte Prozentsatz der dienstlichen Fahrten, die von EVs durchgeführt werden können, keine repräsentative Kennzahl, die auf andere Unternehmen übertragen werden kann. Dies ist in der Tatsache begründet, dass das Nutzungsprofil der zur Datenerhebung genutzten Fahrzeugflotte nennenswerte Abweichungen von der, in der Literaturrecherche ermittelten, durchschnittlichen betrieblichen Fahrzeugnutzung deutscher Unternehmen aufweist. Um eine volkswirtschaftlich repräsentative Aussage zu diesem Austauschverhältnis zu erhalten, wäre eine breiter angelegte Studie, welche die Fahrprofile einer repräsentativen Stichprobe von Unternehmen erhebt, erforderlich. Gleiches gilt für die erzielbaren Erträge durch PV-Anlagen, welche stark vom Standort abhängen. Deshalb sollten in Zukunft Erhebungen zur Eignungsprüfung des Tandemmodells in einer repräsentativen Anzahl von Unternehmen durchgeführt werden. Im Rahmen soziologischer Untersuchungen könnten die Entscheidungsfaktoren bei der Fahrzeugwahl und den hieraus entstehenden Ansprüchen der Nutzer an EVs festgestellt werden.

5.3. Kritische Betrachtung der Belastbarkeit der erzielten Ergebnisse

5.3.1. SWOT-Analyse

Ausgehend von den in Kapitel 5.1 erfassten, erschließbaren Vorteilen und ihrer Abhängigkeiten, wird nun eine Bewertung des Konzeptes des EV-Einsatzes in einem betrieblichen Fuhrpark mit Carsharingnutzung und erneuerbarer, lokaler Energieversorgung, durchgeführt.

Dazu wird die Strengths Weaknesses Opportunities Threats (SWOT)-Analyse eingesetzt, ein aus der Marketinganalyse stammendes Werkzeug, welches die Betrachtungen von Umwelt, Wettbewerbssituation, Ressourcen und Kompetenzen zusammenführt, um daraus Chancen und Risiken, sowie Stärken und Schwächen eines Unternehmens abzuleiten [131, S.66f]. In diesem Fall wird die Auswertung bezogen auf das in dieser Arbeit herausgearbeitete Nutzungskonzept angewandt, welches mit dem herkömmlichen Fahrzeugnutzungskonzept konkurriert, das derzeit in Unternehmen vorherrscht.

Ausgehend von den in der Analyse identifizierten Gegebenheiten, können anschließend Strategien formuliert werden, mit denen den Schwächen und Bedrohungen zu begegnen ist und die es erlauben, Stärken und Chancen optimal auszunutzen. Unterteilt werden diese Strategien vornehmlich in zwei Kategorien. *Matching-Strategien*, haben das Ziel, Stärken so mit identifizierten Chancen zu kombinieren, dass diese bestmöglich entfaltet werden können. Auf der anderen Seite stehen Umwandlungs-und Neutralisierungsstrategien, deren Aufgabe es ist, Schwächen in Stärken umzuwandeln oder zumindest zu neutralisieren. Analog wird auch mit Risiken verfahren, welche neutralisiert oder bestenfalls in eine Chance verwandelt werden sollen [132, S.134f].

5.3.1.1. Strengths

- Geringere Fuhrparkemissionen durch kombinierten Einsatz von EVs und erneuerbar erzeugten Energien möglich
- Tandemmodell kann Emissions- und Kostensenkungen herbeiführen
- EVs weisen geringere Betriebskosten als ICEs auf
- Mit Hilfe von Stromspeichern kann durch lokal gewonnene, erneuerbare Energien ein deutlicher Emissionsvorteil gegenüber konventionellem Netzstrom erzielt werden
- Eigene Ladeinfrastruktur sorgt für Unabhängigkeit von externen Anbietern
- Finanzielle Anreize könne für Mitarbeiter geboten werden, die durch Teilnahme am Tandemmodell ihre Mobilitätskosten senken können

5.3.1.2. Weaknesses

- Hohe Investitionskosten für Technik
- Erklärungsbedürftige Technik
- Derzeitige EVs sind nicht in der Lage, alle Nutzungsszenarien eines KFZ im Betriebseinsatz abzudecken
- Die Verwaltung von EVs ist aufwändiger, als die von ICEs
- Eine hohe Fahrzeugauslastung kann im Falle einer unvorhergesehenen Planabweichung potentiell in Form eines „Dominoeffekts“ eine große Einschränkung der Unternehmensmobilität zur Folge haben

5.3.1.3. Opportunities

- Steigende Rohstoffpreise machen EVs attraktiver
- Skaleneffekte in der EV-Fertigung stellen Kosten- und Emissionssenkungen in Aussicht
- Zunehmende Regulation ICEs mit dem Ziel der Emissionssenkung (z.B. in Form von Fahrverboten) begünstigen EVs
- Fortschritte in der Batterietechnologie, sowohl in der Fertigung, als auch in der Zellchemie, stellen höhere Reichweiten bei gleichbleibenden oder sogar sinkenden Kosten in Aussicht
- Eine stärkere Durchdringung des Marktes mit EVs führt zu stärkerer Vertrautheit von Mitarbeitern mit der Technologie und hilft, „Berührungsängste“ und Widerstände abzubauen
- Zunehmende Digitalisierung ermöglicht genaueres und automatisiertes Fuhrparkmanagement (Abweichungen vom Ist-Zustand wie Verspätungen, aber auch frühere Rückkehr von Fahrzeugen und eine Echtzeiterfassung des Ladestandes unterstützen die Auslastungsplanung)

5.3.1.4. Threats

- Akzeptanzprobleme unter den Fahrzeugnutzern können Konzepterfolg schädigen
- Materialengpässe könnten EV-Kosten in die Höhe treiben
- Schleppender Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur kann Nutzbarkeit von EVs auf Langstrecken einschränken
- Sinkende Rohölpreise könnten einen möglichen Preisvorteil gegenüber ICEs reduzieren bzw. zunichte machen

5.3.2. Strategien zum Umgang mit den ermittelten Schwächen und Bedrohungen

5.3.2.1. Matching-Strategien

Im Folgenden werden einige Strategien angeführt, welche durch Kombination von Stärken und Chancen eine bestmögliche Ausnutzung der EV-Technik in Einheit mit Tandemmodell und Eigenstromerzeugung ermöglichen sollen.

Eine große Stärke der EVs liegt in ihrer lokalen Emissionsfreiheit. Diese ermöglicht es, einen mit ihnen ausgestatteten Fuhrpark uneingeschränkt mobil zu halten, während in Zukunft bereits vergleichsweise neue Dieselfahrzeuge von Fahrverboten betroffen sein werden. Als Beispiel ist etwa das ab dem 1.1.2020 geltende Verkehrsverbot in der Stuttgarter Umweltzone für alle Fahrzeuge mit Ottomotoren unterhalb der Abgasnorm Euro 3 und mit Dieselmotoren unterhalb der Abgasnorm Euro 6 zu nennen[133].

In Anbetracht steigender Rohstoffpreise für fossile Energieträger (vgl. z.B. [5, S.14,17]) stellt eine Strategie zur Minimierung der Fuhrparkkosten die Kombination von EVs mit kostengünstiger, lokaler Stromerzeugung dar.

Ausgebaut werden kann dieser Vorteil weiterhin durch die gezielte Automatisierung und Digitalisierung der Fahrzeugdisposition, um in Kombination mit einem intelligenten Lademanagement die Erschließung von weiteren Kosten- und Emissionsvorteilen durch eine verfügbarkeitsangepasste Ladung mit geringem Speicherbedarf zu realisieren.

Steigende Reichweiten der EVs (vgl. auch Abschnitt 5.4) bieten die Möglichkeit, deren Betriebskostenvorteile zunehmend in einem größeren Teil von Fuhrparks erschließen zu können (es wird mehr und mehr auf wegen der Reichweite gehaltene ICEs verzichtet werden können). Ein Ausbau der öffentlichen Schnellladeinfrastruktur, welche zudem deutlich an Leistung gewinnt, unterstützt diese Entwicklung zusätzlich. In Zukunft wird es damit auch mit (günstigen) Fahrzeugen mit geringerer Batteriekapazität möglich sein, weite Strecken ohne prohibitiv lange Ladepausen zurückzulegen.

Nicht zuletzt ist darauf hinzuweisen, dass sich durch eine lokale Zwischenspeicherung von erneuerbar erzeugtem Strom ein absoluter Emissionsvorteil bereits mit den untersuchten EVs erwirken lässt. Während dieser Vorteil zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht wirtschaftlich erschließbar ist, lassen Kostensenkungen und Leistungssteigerungen in der Batterieproduktion in Kombination mit einer Leistungssteigerung der EVs (würde zu einer Senkung der totalen Fahrzeugzahl im Fuhrpark und damit einer weiteren Kostenersparnis führen) darauf hoffen, diesen ökologischen Vorteil in Zukunft auch unter ökonomischen Gesichtspunkten erschließen zu können.

5.3.2.2. Neutralisierungs- und Umwandlungsstrategien

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die bestmögliche Ausnutzung der Stärken des Konzeptes diskutiert wurde, wird nun der Fokus auf die enthaltenen Schwächen und Risiken gelegt und darauf eingegangen, wie diese durch ein gezieltes Ausspielen der Stärken und Chancen abgemildert oder sogar umgekehrt werden können.

Eine klare Schwäche der Elektrifizierung eines Unternehmensfuhrparks ist die hohe erforderliche Investition in Fahrzeuge, Ladeinfrastruktur und ggf. Anlagen zur Energieerzeugung und -speicherung. Ein Weg diese zu mindern und frühzeitig für Kapitalrückflüsse zu sorgen, ist die Erstellung eines vorab durchgeplanten Fuhrparkkonzepts mit Carsharing und abgestimmter Fahrtverteilung. Die in dieser Arbeit angewandte Methode der Bedarfsbestimmung für einen Betriebsfuhrpark ermöglicht es, den Fahrzeugbedarf und das Tandempotential eines Fuhrparks zu bestimmen und somit kostspielige Fehlplanungen zu vermeiden.

Ein Risiko, welches die Nutzbarkeit von EVs einzuschränken droht, sind Mängel in der öffentlichen Ladeinfrastruktur. Ein möglicher Umgang mit regionalen Einschränkungen kann durch eine unternehmenseigene Infrastruktur ausgleichen werden. Daneben sorgt eine Steigerung der EV-Reichweite in neueren Fahrzeugmodellen (vgl. auch Abschnitt 5.4) für eine zunehmende Unabhängigkeit von öffentlicher Ladetechnik für Zwischenladungen auch auf längeren Strecken.

Eine Schwäche des EV-Einsatzes, die sich in der empirischen Erhebung deutlich gezeigt hat, ist die Voraussetzung der Nutzerakzeptanz, ohne die eine wirtschaftliche Nutzung von EVs in einer Fahrzeugflotte schlimmstenfalls zum Scheitern verdammt ist. Um diese Akzeptanz zu sichern, existieren sowohl aktive, als auch passive Herangehensweisen für das Unternehmen. In einer aktiven Strategie könnte das Unternehmen die EVs im Rahmen eines Tandemprogramms seinen Mitarbeitern günstig zur Verfügung stellen. Auf diese Weise bietet sich den Mitarbeitern die Möglichkeit, kostengünstige Mobilität in Anspruch zu nehmen. Hierdurch wird der Mitarbeiter durch finanzielle Anreize motiviert, sich mit der Technik auseinander zu setzen und lernt den Umgang mit dieser. Aber auch eine passive Haltung des Unternehmens verspricht Erfolgsaussichten. Eine zunehmende Marktdurchdringung von EVs und damit ihr Wandel vom Early Adaptor Produkt hin zum Massenprodukt wird helfen, Anwender mit dieser neuen Technologie vertraut zu machen (vgl. Abbildung 6.1).

Es ist zu beachten, dass eine Auslastungssteigerung, wie etwa durch das Tandemmodell, die spezifischen Kosten je km eines EVs senkt, eine hohe Fahrzeugauslastung jedoch im gleichen Zug bedeutet, dass sich ungeplante Verzögerungen und Ausfälle auf nachfolgende Fahrzeugbuchungen auswirken. Dem kann vorgebeugt werden, indem die für die zur Umsetzung des Tandemmodells eingesetzte Dispositionssoftware dazu eingesetzt wird, Planabweichungen in der Fahrzeugdisposition durch Echtzeitdaten frühzeitig zu erkennen und durch dynamische Umbelegungen abzufangen.

5.4. Auswirkungen aktueller Entwicklungen

Bei der Betrachtung der Ergebnisse dieser Arbeit ist zu beachten, dass es sich bei der Elektromobilität um ein Themenfeld handelt, in welchem derzeit Entwicklungen, sowohl im Bezug auf Technik, als auch auf Infrastruktur, rechtliche Regelungen oder Preisstrukturen mit immenser Geschwindigkeit erfolgen, die in den letzten Jahren in keinem anderen Bereich der Mobilitätstechnik zu beobachten waren.

Ein Beispiel für das rasche Voranschreiten der technischen Entwicklung, ist die Reichweitensteigerung bei Serienfahrzeugen. Anzuführen ist etwa der BMW i3, welcher im Modell von 2013 über eine Akkukapazität von 18,8 kWh und damit über eine Reichweite von 145 km (Herstellerangabe) verfügte [29]. Mittlerweile, im Modell von 2016, verfügt er über 33,2 kWh Akkukapazität und damit über eine Reichweite von 185 km (ADAC-Test) bzw. ca. 260 km (Herstellerverbrauchswert) [134]. Der Fahrzeugpreis ist dabei nur minimal gestiegen, von 34.950 EUR auf 36.150 EUR. Ähnliche Entwicklungen zeigen sich etwa beim Renault ZOE mit einer Steigerung von 22 kWh in 2013 auf 41 kWh in 2017 [68][135] und auch in Neuerscheinungen, wie dem Opel Ampera-E mit 60 kWh Akkukapazität und damit 340 km Reichweite bei einem Anschaffungspreis von 44.060 EUR [136].

Die mittlerweile am Markt erhältlichen Fahrzeuge sind damit in der Lage, einen deutlich größeren Anteil an Fuhrparkfahrten zu übernehmen, als es die in der Untersuchung verwendeten Typen konnten. Außerdem ist mit einer höheren Reichweite von einer Steigerung des Sicherheitsgefühls der Anwender auszugehen.

Weiterhin werden im Bestreben, den Anteil an EVs am nationalen Fahrzeugbestand anzuheben, Förderprogramme in Kraft gesetzt. Im April 2016 wurden von der Bundesregierung Kaufprämien in Höhe von 4.000 EUR für BEV und 3.000 EUR für PHEV beschlossen. Zusätzlich sollen reguläre Ladepunkte, sowie Schnellladeinfrastruktur ausgebaut werden. Von der Bundesregierung werden Ausgaben von 200 Mio. EUR für 5.000 Schnellladesäulen und 100 Mio. EUR für 15.000 normale Ladesäulen geplant [137].

Im Vergleich zu den in dieser Arbeit veranschlagten Kaufpreisen für EVs liegen die derzeitigen und zukünftigen Anschaffungskosten für ein EV somit mittlerweile niedriger. Dies senkt die Mehrkosten in der Anschaffung gegenüber den ICEs. Ein Ausbau der Ladeinfrastruktur, insbesondere der Schnellladem̈oglichkeiten erweitert darüber hinaus den Einsatzradius der EVs.

Für EVs und HEVs, die zwischen dem 01. Januar 2019 und dem 31. Dezember 2021 angeschafft werden, soll außerdem der zu versteuernde geldwerte Vorteil (Privatnutzung eines Dienstfahrzeuges) von 1% des Listenpreises auf 0,5% gesenkt werden [138].

Der gesenkte geldwerte Vorteil des Tandempartners ermöglicht es dem Unternehmen, ihm dadurch günstigere Konditionen für die Fahrzeugnutzung anbieten, ohne dass hieraus eine zusätzliche Steuerschuld für den Tandempartner entstünde. Das Unternehmen erhält somit die Option, durch Bereitstellung eines günstigen Fahrzeuges im Tandemmodell, Anreize für Mitarbeiter zu schaffen, die nie Aussicht auf einen regulären Dienstwagen hätten.

5.5. Zusammenfassung

In den vorgenommenen Untersuchungen konnte ein signifikantes Elektrifizierungspotential im betrachteten Fuhrpark festgestellt werden. Die in der Literatur zu findenden Kennzahlen deuten darauf hin, dass in anderen Fuhrparks, deren Fahrtverteilung näher am deutschen Durchschnitt liegt, als die des untersuchten Fuhrparks, ein höheres Elektrifizierungspotential erschlossen werden könnte.

Emissionen und Kosten des Fuhrparks verschlechterten sich durch EV-Integration im betrachteten Fuhrpark. Die Maßnahmen der Eigenstromversorgung und der Nutzung des Tandemmodells sind in der Lage, diese Situation zu verbessern. Zu betonen ist, dass es sich bei diesen Maßnahmen um Werkzeuge handelt, die in ihrer genauen Ausgestaltung immer an den jeweiligen Fuhrpark anzupassen sind.

Die Untersuchungen haben weiterhin ergeben, dass das Einsatzpotential nicht nur von technischen Faktoren abhängt, sondern auch Nutzervorbehalte einen gravierenden Einfluss auf die EV-Nutzungsquote haben. Eine genaue Erklärung und Strategie zum Umgang mit diesen konnte mit den in der Erhebung eingesetzten Methodiken nicht erzielt werden. Dieser Punkt ist somit in zukünftigen Forschungsvorhaben weiter zu untersuchen.

Durch Anwendung der SWOT-Analyse konnte identifiziert werden, dass die Stärken und Chancen der betrieblichen EV-Nutzung in ihrem Potential liegen, Emissionen und Kosten des Fuhrparks zu senken. Weiterhin profitieren sie von der zunehmenden Einschränkung von ICEs z.B. im Innenstadtbereich.

Schwächen und Bedrohungen liegen hingegen in hohen initialen Kosten für den Umstieg, der Abhängigkeit vom öffentlichen Infrastrukturausbau und möglichen Rohstoffengpässen.

Ein Blick auf die aktuelle Entwicklungen im EV-Sektor lässt bereits über einen kurzen Beobachtungszeitraum einen gravierenden Leistungszuwachs der Fahrzeuge bei nahezu gleichbleibender Kostensituation erkennen. Weiterhin senken Förderprogramme die Fahrzeugkosten für den Kunden und begünstigen den Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur. Ein Fuhrpark der zum aktuellen Zeitpunkt auf EVs wechselt, könnte von höheren Fahrzeugleistungen und niedrigeren Kosten, als den in dieser Arbeit zugrunde gelegten, profitieren.

6. Fazit und Ausblick

6.1. Fazit und weiterer Forschungsbedarf

Aus der durchgeführten Evaluation der erzielten Ergebnisse können die folgenden Resultate als Kernschlüsse angesehen werden.

Zum grundlegenden Elektrifizierungspotential von Betriebsfuhrparks lässt sich festhalten, dass ein signifikantes Potential für den durchschnittlichen Fuhrpark anzunehmen ist. Aufgrund individueller Besonderheiten in der Nutzungsverteilung ist jedoch jeder Fuhrpark vor einer Umstrukturierung genau zu analysieren, bevor eine Aussage über die Zweckmäßigkeit einer solchen Maßnahme getroffen werden kann. Wie im untersuchten Fuhrpark ist es wahrscheinlich, das nicht alle ICEs gegen EVs getauscht werden können. Eine gleichbleibende oder sogar positive Veränderung der Emissions- und Kostensituation des Fuhrparks durch den bloßen Fahrzeugtausch ist tendenziell nicht zu erreichen.

Das in dieser Arbeit erstmals in der Empirie getestete Tandemmodell hat sich als ein sehr potentes Mittel zur Emissionsreduktion herausgestellt. Der Wegfall eines Fahrzeuges halbiert die Fertigungsemissionen, welche auf die Nutzerparteien entfallen. Da diese bei EVs besonders stark ins Gewicht fallen, stellt es ein Mittel zur Fuhrparkemissionsreduktion dar, welches bei sehr geringem (überwiegend organisatorschem und kaum stofflichem) Einsatz in der Lage ist, beachtliche Ergebnisse zu erzielen.

Die Eigenstromgewinnung bietet prinzipiell die Chance, sowohl Emissions- als auch Kostenvorteile zu erschließen. Durch die hohe Volatilität der Stromerzeugung und die je nach Nutzung schwankende Anwesenheit der Fahrzeuge am Unternehmensstandort bieten sich jedoch oft nur geringe Überschneidungen zwischen Energieverfügbarkeit und -bedarf. Da die hohen Kosten eine Zwischenspeicherung (die prinzipiell eine Emissionsreduktion erzielen könnte) wirtschaftlich nicht tragbar machen, bietet nur ein ertragsorientiertes Lademanagement die Chance, zumindest eine lohnende anteilige Eigenversorgung zu ermöglichen. Die Umsetzbarkeit dieser Option ist jedoch stark von der jeweiligen Bedarfsverteilung im Fuhrpark und der Art der Energieerzeugung abhängig, so dass eine individuelle Prüfung für jeden Fuhrpark unabdingbar ist.

Eigenstromversorgung und Tandemmodell sind grundsätzlich miteinander kombinierbar. Da die zusätzliche Energienachfrage für das Tandemmodell am Unternehmensstandort generell eher zu den Tagesrandzeiten anfällt, ist eine ungespeicherte Solarstromversorgung kaum in der Lage, die zusätzliche Energienachfrage zu decken. Der benötigte Strom muss daher überwiegend aus dem Netz bezogen werden. Zukünftige Untersuchungen könnten etwa die Nutzung von Kleinwindkraftanlagen zur lokalen Energieversorgung

prüfen oder auch die Kombination mehrerer Arten der lokalen Energieerzeugung, um eine bessere Deckung von Erzeugungs- und Verbrauchskurve zu erzielen.

Als wichtige Erkenntnis, welche dieser Untersuchung entstammt, ist die Nutzerakzeptanz als kritischer Erfolgsfaktor zu sehen. Eine Akzeptanz der eingesetzten Fahrzeugtechnik ist unabdingbar für einen hindernis- und konfliktfreien Übergang zu einer neuen Fuhrparktechnik. Die Nutzereinstellung ist vorab zu erfassen und Sorgen und Nöte der Nutzer sind aufzunehmen und rechtzeitig auszuräumen.

Die Ergebnisse der SWOT-Analyse weisen darauf hin, dass Probleme, die heute noch einen breiten Einsatz von EVs in Betriebsfuhrparks verhindern, in den kommenden Jahren durch technische Weiterentwicklungen und Effizienzsteigerungen in der Fertigung größtenteils wegfallen werden. Demgegenüber stehen dem Einsatz von ICEs zunehmend ökonomische wie politische Ansprüche (an ökologische Verträglichkeit) im Weg, was einen EV-Einsatz weiter begünstigt. Darüber hinaus verspricht eine zunehmende Verbreitung von EVs rückläufige „Berührungsängste“ der Nutzer mit der Technik.

Auch die aktuellen Entwicklungen im EV-Sektor wirken sich insbesondere finanziell begünstigend auf den EV-Einsatz aus. Daneben fördert der Ladenetzausbau sowohl die Nutzung von EVs auf Langstrecken und schafft Lademöglichkeiten für Personen, welche etwa nicht über eine Möglichkeit zur Ladung auf einem eigenen Grundstück verfügen. Fraglich ist jedoch, ob der Umfang der Ausbauunternehmungen ausreicht, um den EV-Zuwachs der kommenden Jahre zu versorgen.

Abzusehen bleibt weiterhin die Preisentwicklung von EVs. Zwar steigen die Fahrzeugleistungswerte kontinuierlich weiter, die EV-Preise liegen jedoch weiterhin auf einem vergleichbaren Level und somit sehr hoch im Vergleich zu ICEs gleicher Ausstattung.

Als Resüme kann daher festgehalten werden, dass sich die Entwicklung der EV-Technik auf einem vielversprechenden Weg befindet, sowohl ökologisch, als auch ökonomisch eine ernsthafte Konkurrenz zu herkömmlichen ICEs im betrieblichen Fuhrparkumfeld zu werden. Zum aktuellen Stand ist die Technik jedoch keinesfalls für jeden Einsatzfall geeignet. Die in dieser Arbeit untersuchten Methoden können unterstützen, jedoch ist insbesondere der hohe Preis der Technik eine Hürde, die in vielen Fällen nicht allein durch die unterstützenden Maßnahmen der dualen Fahrzeugnutzung und der Stromversorgung aus erneuerbaren Quellen überwunden werden kann.

Die breite Anwendung der EV-Technik und ihre Einbindung in die umgebende Infrastruktur wirft weiterhin in vielen Bereichen Fragestellungen auf, die es zu klären gilt. Beispielsweise die ökologisch und humanitär vertretbare Gewinnung der Rohstoffe, die Abwägung der Vernetzung und Erfassung der Fahrzeugnutzung im Smart-Grid-Kontext mit dem Recht der Nutzer auf Privatsphäre oder die Umbrüche ganzer Industrien, die eine zunehmende Elektrifizierung des Individualverkehrs mit sich bringt, etwa in der Motorenfertigung und der Mineralölindustrie. Auch konkurrierende Ladestandards, und heterogene Bezahlsysteme an öffentlichen Ladepunkten gilt es zu überwinden.

6.2. Ausblick

Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über abzusehende Entwicklungen in verschiedenen, in dieser Abhandlung thematisierten Bereichen, gegeben. Weiterhin wird die zukünftige Verwendung der in dieser Arbeit erzielten Resultate dargelegt.

Im Hinblick auf die Fahrzeugtechnik lässt sich eine rasante Entwicklung der Leistungswerte verzeichnen. Durch eine deutliche Kostenreduktion in der Fahrzeugtechnik, insbesondere in der Batterietechnik, ist eine deutliche Leistungssteigerung der Fahrzeuge bei gleichbleibenden Kosten bzw. eine Kostensenkung bei gleichbleibenden Leistungswerten der Fahrzeuge zu verzeichnen (vgl. Kapitel 5.4). Ursächlich hierfür ist z.B., dass Fahrzeugbatterien bisher überwiegend in Kleinserien gefertigt wurden. So lagen ihre Herstellungskosten bei ca. 1.000 EUR/kWh. Bedingt durch steigende Fertigungszahlen und eine stetige Weiterentwicklung der Fertigungstechnik, ist eine Kostenreduktion in der Batteriefertigung abzusehen, wie sie in den vergangenen Jahren in der Fertigung von Li-Ion-Batterien für Heimanwendungen erfolgte. Bis zum Jahr 2020 wird durch diese Entwicklung eine Senkung der reinen Zellkosten auf ca. 200 EUR/kWh prognostiziert. Ebenso werden durch Produktionsausbau und Lernprozesse die Kosten der übrigen Komponenten des Batteriesystems (z.B. Steuersoftware, Thermomanagement, etc.) sinken. Während diese derzeit je kWh Kapazität etwa genau so viel kostet wie die Zellen selbst, wird hier von einer Halbierung der Kosten ausgegangen [28, S.153f].

Auch die Verbraucherakzeptanz für Elektrofahrzeuge entwickelt sich stark positiv. Im Jahr 2017 sind mit insgesamt 1,2 Mio. Fahrzeugen erstmals mehr als eine Million EVs weltweit zugelassen worden. Etwa 600.000 davon in China. In Deutschland hat sich mit 58.000 Zulassungen in 2017 die Zahl der Zulassungen gegenüber 2016 verdoppelt. Anzumerken ist, dass diese Zahlen sowohl reine EVs, als auch PHEVs umfassen. Diese machen in Deutschland etwa jedes zweite erfasste Fahrzeug aus [139]. Insgesamt lag damit Anfang 2018 der Bestand an EVs weltweit bei 3,2 Mio. Fahrzeugen. Unter der Annahme, dass sich die Wachstumsrate bei Neuzulassungen wie in den vergangenen Jahren (vgl. Abbildung 6.1) weiterentwickelt, ist für das Jahr 2025 von 25 Mio. EV-Zulassungen auszugehen [140].

Mit der Zunahme der Fahrzeugzahlen schreitet auch der Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur voran. Ein besonderer Fokus wird dabei auf die Schaffung von Schnellllademögkichkeiten entlang der Hauptverkehrswege gelegt.

Bis Ende 2017 sind ca. 300 Tank & Rast-Standorte mit Schnellladestationen ausgestattet worden (diese Zahl entspricht 75% aller Standorte). Eine neu geschaffene Vergaberichtlinie schreibt weiterhin für die Zukunft für neue Rastanlagen die Ausstattung mit Schnellladesäulen vor [141].

Auch die erste „Ultra-Schnellladesäule“ mit einer Leistung von 350 kW DC wurde Ende 2017 in Europa errichtet. Zukünftige Fahrzeuggenerationen sollen an diesen Säulen in 5 min. Strom für ca. 100 km Fahrstrecke laden können. Heutige Fahrzeuge können an den abwärtskompatiblen Ladesäulen mit 50 kW laden. Insgesamt sollen 21 dieser Ladesäulen

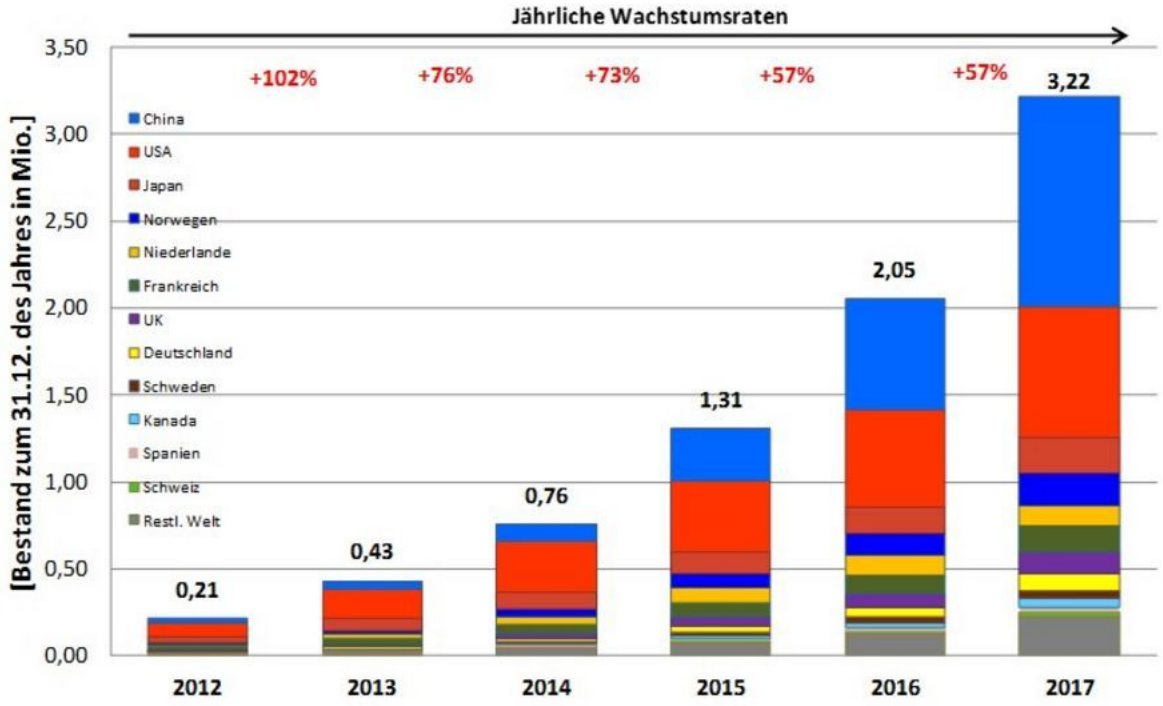


Abbildung 6.1.: Jährliches Wachstum des weltweiten EV-Bestands [140]

entlang des europäischen Autobahnnetzes in Abständen von 150 km bis 200 km errichtet werden, um Langstrecken mit EVs ohne extensive Ladezeiten absolvieren zu können [142].

Zusammengefasst waren bundesweit im Februar 2018 insgesamt 9.377 öffentliche Ladepunkte (8.103 Normal, 1.274 Schnell) an 4.666 Ladeeinrichtungen in Betrieb [141]. Ein Vergleich mit dem Jahr 2014 mit einem Bestand von ca. 5.500 Ladepunkten verdeutlicht das Wachstum [70].

Finanziell unterstützt wird dieser Ausbau vom Bund auf Grundlage der Förderrichtlinie Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland [143].

Ihr Ziel ist der Aufbau eines bedarfsgerechten, flächendeckenden und nutzerfreundlichen Netzes an Ladeinfrastruktur für EVs als eine entscheidende Bedingung für den Erfolg der Elektromobilität.

Als Grund für die Erfordernis eines Förderprogramms wird angeführt, dass im Rahmen des Markthochlaufs ein wirtschaftlicher Betrieb von Ladeinfrastruktur auf Grund geringer Fahrzeugzahlen oft noch nicht möglich ist. Gefördert werden vor allem Schnellladepunkte, aber auch reguläre Ladepunkte an Orten, an denen Fahrzeuge längere Zeit verweilen, z.B. vor Mehrfamilienhäusern, Warenhäusern oder Kinos.

Neben der monodirektionalen Anbindung der EVs an das Stromnetz über die erwähnte Ladeinfrastruktur, finden zunehmend Konzepte Anwendung, welche Synergien zwischen EV-Lebenszyklus und dem Ausbau erneuerbarer Energien vorantreiben sollen.

Im Fall des Second-Life-Use werden Fahrzeugbatterien in Energiespeichersystemen zur Angleichung von Stromnachfrage und -produktion in einem Stromnetz, welches zunehmend aus nicht steuerbaren, regenerativen Energiequellen gespeist wird, eingesetzt. Ein Beispiel ist etwa der zu diesem Zeitpunkt weltgrößte Second-Use-Batteriespeicher mit einer Kapazität von 13 MWh, bestehend aus 1.000 SMART Batterien, errichtet von der Daimler-AG [144]. Zukünftig wird dieser Second-Use-Einsatz einen festen Part im Batterielebenszyklus der Fahrzeugbatterien einnehmen. Sobald ihre Kapazität für den Fahrzeugeinsatz zu weit abgesunken ist, folgt der Einsatz in einem stationärem Energiespeicher. Erst wenn die Performance der Zellen auch für diesen Einsatz zu stark abgesunken ist, folgt das Recycling und damit die Rückführung der Rohstoffe in die Batterieproduktion.

Zusätzlich zu stationären Speichern bietet ein Einsatz von VtG-Technik eine Perspektive, um eine zunehmende Volatilität der Stromerzeugung durch eine wachsende Nutzung erneuerbarer Energien symbiotisch mit zunehmender EV-Nutzung zu verbinden. Eine erste kommerzielles VtG-Implementierung wurde 2016 in Dänemark in Betrieb genommen. Eine Flotte aus 10 Nissan e-NV200, welche in ihren Standzeiten über je eine VtG-Einheit mit dem Stromnetz verbunden sind und insgesamt über eine Lade-/Entladeleistung von ca. 100 kW verfügen. Ein ursprünglich von der University of Delaware entwickeltes Steuersystem kontrolliert die Energieflüsse und stellt sicher, dass die Batteriekapazität der Fahrzeuge stets für die geplanten Fahrten ausreicht [145]. In dieser Konfiguration generiert die Flotte mit den erbrachten Steuerleistungen Erträge von ca. 1.300 EUR/a [146]. Eine weite Verbreitung dieser Technik könnte in Zukunft helfen, das Stromnetz zu stabilisieren und die Kosten der EVs und Ladeinfrastruktur durch zur Verfügung stellen der Batteriekapazität für Netzdienstleistungen partiell zu refinanzieren.

Auch bezüglich der Einsatzszenarien von Kraftfahrzeugen im Privat- und Dienstkontext zeichnen sich deutliche Veränderungen ab. Es ist davon auszugehen, dass die zunehmende Verfügbarkeit (teil-) autonomer Fahrzeuge einen disruptiven Effekt auf Fahrzeugnutzung im allgemeinen und Carsharing im speziellen haben.

Besonders hervorzuheben ist das Konzept „Vehicle-on-Demand“. Ein Fahrzeug dieser Ausgestaltung fährt nicht wie heute teilweise möglich Autobahnstrecken automatisch oder parkt selbstständig ein, sondern ist in der Lage, sämtliche Fahraktionen im Straßenverkehr vollautomatisch, auch ohne Person an Bord durchzuführen. Der Nutzer muss lediglich das Fahrtziel bestimmen [147, S.19f]. Erwartet wird mit zunehmender Verbreitung von Vehicles-on-Demand ein signifikanter Rückgang des Fahrzeugbesitzes in Kombination mit einer starken Zunahme der Bedeutung des Carsharings. Vor allem von einem Austausch von Zweitfahrzeugen gegen eine solche Dienstleistung ist auszugehen. Simulationen deuten darauf hin, dass ein einzelnes Vehicle-on-Demand im Carsharingeinsatz zwischen 8 und 13 private PKW ersetzen kann [148, S.250f].

Die in dieser Abhandlung exemplarisch angewandten Analysemethoden zur Bestimmung des Einsatzpotentials von EVs ermöglichen eine Untersuchung von nahezu jedem Fuhrpark auf das Austauschpotential der Fahrzeuge gegen EVs auf Basis grundlegender Daten, welche oft bereits in Fahrtenbüchern erfasst werden. Damit stellt die demonstrierte Vorgehensweise ein wichtiges Werkzeug für die strategische Unternehmensfuhrparkplanung dar. Durch eine automatisierte Abarbeitung der Ermittlungsschritte in Form einer Software könnte eine Fuhrparkmodellierung mit verschiedensten Eingangsparametern wie z.B. unterschiedlichen EV-Leistungsparametern, unterschiedlichen Ladeoptionen oder einer festgelegten Fahrzeugzahl erfolgen und Betrieben so die Optimierung ihrer Fahrzeugflotte unter individuellen Gesichtspunkten gestatten.

Eine kommerzielle Anwendung des Tandemmodells in Verbindung mit einer Weiterentwicklung des im Forschungsprojet entwickelten Buchungsportals wurde mittlerweile umgesetzt. Ergänzt werden diese Komponenten durch ein fahrzeugunabhängiges Schließmodul, welches vom jeweiligen Fahrzeugnutzer zur Entriegelung des Sharingfahrzeuges mit Hilfe einer Smartphone-Anwendung genutzt werden kann. Eine Schlüsselübergabe zwischen den Fahrzeugnutzern entfällt somit [149].

Literaturverzeichnis

[1] Merkel, Angela: *Rede von Bundeskanzlerin Merkel bei der Internationalen Konferenz „Elektromobilität bewegt weltweit“.* http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Reden/2013/05/2013-05-27-merkel-elektromobilitaet.html?nn=437032. Version: Mai 2013

[2] Deutsches Dialog Institut GmbH: *Schaufenster Elektromobilität.* http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/ueber_das_programm/foerderung_schaufensterprogramm/foerderung_schaufensterprogramm_1.html. Version: 2014

[3] Deutsches Dialog Institut GmbH: *eAutarke Zukunft: Lösungen in Smart Grid-Strukturen.* http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/projekte_im_ueberblick/projektsteckbriefe/projekt_4355.html

[4] Plötz, Patrick ; Gnann, Till ; Kühn, André ; Wietschel, Martin: Markthochlaufszenarien für Elektrofahrzeuge. (2013). http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Fraunhofer-ISI-Markthochlaufszenarien-Elektrofahrzeuge-Langfassung.pdf

[5] Hacker, Florian ; Waldenfels, Rut von ; Mottschall, Moritz: Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen / Öko-Instiut e.V. Version: 2015. http://ikt-em.de/_media/Gesamtbericht_Wirtschaftlichkeit_von_Elektromobilitaet.pdf. 2015. – Forschungsbericht

[6] Gnann, Till ; Plötz, Patrick ; Zischler, Florian ; Wietschel, Martin: Elektromobilität im Personenwirtschaftsverkehr: Eine Potenzialanalyse. Version: 2012. http://hdl.handle.net/10419/62593. Karlsruhe : Fraunhofer ISI, 2012 (S7/2012). – Working Paper Sustainability and Innovation. – urn:nbn:de:0011-n-2141358

[7] Schulz, Alexandra: *Batterieelektrische Fahrzeuge im gewerblichen Flottenbetrieb*, Berlin, Technische Universität Berlin, Diss., 2015. https://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/files/6785/schulz_alexandra.pdf

[8] Deffner, Jutta ; Birzle-Harder, Barbara ; Hefter, Tomas ; Götz, Konrad u. a.: Elektrofahrzeuge in betrieblichen Fahrzeugflotten–Akzeptanz, Attraktivität und Nutzungsverhalten. In: *Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts Future Fleet. Frankfurt am Main. ISOE–Institut für sozial-ökologische Forschung*

(2012). http://www.isoe.de/fileadmin/redaktion/Downloads/Mobilitaet/st-17-isoe-2012.pdf

[9] Fournier, G. ; Lindenlauf, F. ; Baumann, M. ; Seign, R. ; Weil, M. ; Proff, Heike (Hrsg.): *Carsharing with Electric Vehicles and Vehicle-to-Grid: a future business model?* 2014

[10] Kiermasch, Cornelius: *Carsharing mit Elektroautos: Welches Mobilitätskonzept eignet sich für Großstädte?* Disserta Verlag, 2013

[11] Fischer, Nina: eCarsharing für Gewerbekunden in der Metropolregion Hannover Braunschweig Göttingen Wolfsburg - Hintergrund und praktische Erfahrungen. Version: 2015. https://opus4.kobv.de/opus4-bamberg/frontdoor/index/index/docId/26804. In: Sucky, Eric (Hrsg.) ; Werner, Jan (Hrsg.) ; Niels Biethahn, Reinhard K. (Hrsg.): *Mobility in a Globalised World 2014*. University of Bamberg Press, 2015, 204 - 213

[12] Kreyenberg, D. ; Lischke, A. ; Bergk, F. ; Duennebeil, F. ; C. Heidt, W. K. ; Raksha, T. ; Schmidt, P. ; Weindorf, W. ; Naumann, K. ; Majer, S. ; Müller-Langer, F.: Erneuerbare Energien im Verkehr - Potentiale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. (2015)

[13] Pehnt, Martin ; Höpfner, Ulrich ; Merten, Frank: *Elektromobilität und erneuerbare Energien*. Wuppertal Inst. für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2007 https://ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/Pehnt%20%282010%29_%20Erneuerbare%20Energien%20und%20Elektromobilitaet%20final.pdf

[14] Mültin, Marc: *Das Elektrofahrzeug als flexibler Verbraucher und Energiespeicher im Smart Home*, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2014. http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:swb:90-421027

[15] Weidauer, Jens: *Elektrische Antriebstechnik: Grundlagen, Auslegung, Anwendung, Lösungen*. Wiley, 2011

[16] Trueb, Lucien F. ; Rüetschi, Paul: *Batterien und Akkumulatoren: Mobile Energie für heute und morgen*. Springer Berlin Heidelberg, 2013

[17] Thomes, Paul ; Kampker, Achim ; Vallée, Dirk ; Schnettler, Armin ; Kasperk, Garnet: Grundlagen. In: Kampker, Achim (Hrsg.) ; Vallée, Dirk (Hrsg.) ; Schnettler, Armin (Hrsg.): *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Springer, 2013, S. 5 – 58

[18] Schwedes, Oliver: „Objekt der Begierde“ Das Elektroauto im politischen Kräftefeld. In: Keichel, Marcus (Hrsg.) ; Schwedes, Oliver (Hrsg.): *Das Elektroauto: Mobilität im Umbruch*. Springer-Verlag, 2013, S. 45 – 71

[19] Yay, Mehmet: *Elektromobilität: Theoretische Grundlagen, Herausforderungen sowie Chancen und Risiken der Elektromobilität, diskutiert an den Umsetzungsmöglichkeiten in die Praxis*. Peter Lang, 2010

[20] Bozem, K. ; Rennhak, C. ; Rath, V. ; A., Nagl. ; Schnaiter, J. ; Benad, H.: Politische Zielsetzungen und staatliche Förderungen. In: Bozem, K. (Hrsg.) ; Nagl, A. (Hrsg.) ; Rennhak, C. (Hrsg.): *Energie für Nachhaltige Mobilität: Trends und Konzepte*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 5 – 72

[21] Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen: Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. (2015). `http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz13_2015_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3`

[22] Basshuysen, Richard van: *Ottomotor mit Direkteinspritzung: Verfahren, System, Entwicklung, Potential*. 3. Springer-Verlag, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch)

[23] Decker, M. ; Fleischer, T. ; Schippl, J. ; Weinberger, N.: *Zukünftige Themen der Innovations- und Technikanalyse: Methodik und ausgewählte Ergebnisse*. Universität Karlsruhe Universitätsbibliothek, 2012 (KIT scientific reports). – ISBN 9783866448025

[24] Rudolph, M. ; Wagner, U.: *Energieanwendungstechnik: Wege und Techniken zur effizienteren Energientzung*. Springer Berlin Heidelberg, 2008 (VDI-Buch)

[25] Kuppers, M. ; Schramm, D. ; Hesse, B.: Diversität im Antriebsstrang - Chancen und Barrieren heute und morgen. In: Proff, Heike (Hrsg.): *Radikale Innovationen in der Mobilität: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*. Springer, 2014, S. 225 – 241

[26] Hofmann, Peter: *Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft*. Springer-Verlag, 2011

[27] Bertram, Mathias ; Bongard, Stefan: *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr: Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich*. Springer-Verlag, 2013

[28] Wallentowitz, Henning ; Freialdenhoven, Arndt ; Olschewski, Ingo: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges*. 2. Springer, 2011

[29] Brand, Martin: *ADAC Autotest BMW i3*. `https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5053_BMW_i3/BMW_i3.pdf`. Version: November 2013

[30] Röth, Thilo ; Kampker, Achim ; Reisgen, Uwe ; Hameyer, Kay ; Doncker, Rik W. D. ; Stolze, Thilo ; Vetter, Andreas ; Sauer, Jürgen Hagedorn Dirk U. ; Müller, Dirk: Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen. In: Kampker, Achim (Hrsg.) ; Vallée, Dirk (Hrsg.) ; Schnettler, Armin (Hrsg.): *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Springer, 2013, S. 235 – 334

[31] Renault: *Der Renault Twizy Preis und Ausstattungen.* www.renault-preislisten.de/fileadmin/user_upload/preisliste_twizy.pdf. Version: Juni 2015

[32] Silvestro, D.: *ADAC Autotest Tesla Model S Performance.* https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5022_Tesla_Model_S_Performance/Tesla_Model_S_Performance.pdf. Version: September 2013

[33] dpa: Berlin: Erste Elektrobusse im Linienverkehr. In: *Heise.de* (2015), August. http://heise.de/-2795395

[34] Schwarzer, Christoph M.: Braunschweig testet batterie-elektrische Linienbusse mit Induktionsladung. In: *Heise.de* (2014), Dezember. http://heise.de/-2488577

[35] Nissan: *Nissan e-NV200 Kastenwagen und Kombi.* www.nissan.de/content/dam/services/DE/brochure/104776.pdf. Version: Juli 2014

[36] BMW: *100 % elektrisch, sauber und leise durch München. BMW Group und SCHERM Gruppe nehmen Elektro-Lkw offiziell in Betrieb. Auftaktveranstaltung mit Bayerns Wirtschaftsministerin Ilse Aigner.* https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/download.html?textId=269133&textAttachementId=318371. Version: Juli 2015

[37] Wallentowitz, Henning: „Fokus Batterie“ Zur technischen Entwicklung von Elektroautos. In: Keichel, Marcus (Hrsg.) ; Schwedes, Oliver (Hrsg.): *Das Elektroauto: Mobilität im Umbruch.* Springer, 2013, S. 127 – 152

[38] Kampker, Achim: *Elektromobilproduktion.* Springer Berlin Heidelberg, 2014

[39] Lamp, Peter: Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität. In: Korthauer, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien.* Springer, 2013, S. 393 – 416

[40] Bakker, Sjoerd ; Trip, Jan J.: An Analysis of the Standardization Process of Electric Vehicle Recharging Systems. In: Filho, Walter L. (Hrsg.) ; Kotter, Richard (Hrsg.): *E-Mobility in Europe: Trends and good practice.* Springer, 2015, S. 55 – 71

[41] Das europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: *Richtlinie 2014/94/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe.* Amtsblatt der Europäischen Union. http://schaufenster-elektromobilitaet.org/media/media/documents/sonderthema_roaming/EU-RL_2014-94-EU.pdf. Version: Oktober 2014

[42] Müller, Dirk ; Flieger, Björn: Thermomanagement. In: Kampker, Achim (Hrsg.) ; Vallée, Dirk (Hrsg.) ; Schnettler, Armin (Hrsg.): *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie.* Springer, 2013, S. 314 – 334

[43] Schnettler, Armin: Stromnetze. In: Kampker, Achim (Hrsg.) ; Vallée, Dirk (Hrsg.) ; Schnettler, Armin (Hrsg.): *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Springer, 2013, S. 79 – 88

[44] Nationale Plattform Elektromobilität: Fortschrittsbericht 2014 - Bilanz der Marktvorbereitung, 2014

[45] Proff, Heike: Geschäftsmodelle zwischen technischen Herausforderungen und betriebswirtschaftlichen Notwendigkeiten im Übergang in die Elektromobilität. In: Proff, Heike (Hrsg.): *Herausforderungen für das Automotive Engineering & Management: Technische und betriebswirtschaftliche Ansätze*. Springer-Verlag, 2013, S. 1–23

[46] Giuliani, S.: *ADAC Autotest VW e-Golf*. https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5134_VW_e_Golf/VW_e_Golf.pdf. Version: Juni 2014

[47] Lidl, A.: *ADAC Autotest VW Golf*. https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5331_VW_Golf_1_0_TSI_BlueMotion_Comfortline/VW_Golf_1_0_TSI_BlueMotion_Comfortline.pdf. Version: Oktober 2015

[48] Statista: *Durchschnittlicher Preis für Superbenzin in Deutschland in den Jahren 1972 bis 2015*. de.statista.com/statistik/daten/studie/776/umfrage/durchschnittspreis-fuer-superbenzin-seit-dem-jahr-1972. Version: Oktober 2015

[49] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: *Strompreisanalyse August 2015*. http://www.sw-lindau.de/unternehmen/pressearchiv/bdew-strompreisanalyse-2015. Version: August 2015

[50] Karle, A.: *Elektromobilität: Grundlagen und Praxis*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2015. – ISBN 9783446444171

[51] Peters, Anja ; Doll, Claus ; Kley, Fabian ; Plötz, Patrick ; Schade, W ; Thielmann, A ; Wietschel, M ; Zanker, C: Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. In: *Unveröffentlicher Bericht für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Hg. v. Fraunhofer ISI* (2012)

[52] Nationale Plattform Elektromobilität: *Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität*. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_bf.pdf. Version: 2010

[53] Kwade, Arno ; Bärwaldt, Gunnar: *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien*. http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/batterierecycling/lithorec. Version: 2012

[54] Morche, Dirk ; Schmitt, Fabian ; Genuit, Klaus ; Elsen, Olaf ; Kampker, Achim ; Friedrich, Bernd: Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität. In: Kampker, Achim (Hrsg.) ; Schnettler, Dirk Vallée · A. (Hrsg.): *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Springer, 2013, S. 149 – 234

[55] Kerler, Siegfried W.: *Fuhrpark- und Flottenmanagement*. Verlag Heinrich Vogel GmbH, München, 2003

[56] Kraftfahrt-Bundesamt: *Neuzulassungen von PKW im Jahr 2014 nach privaten und gewerblichen Haltern*. www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/2014_n_halter_dusl.html?nn=652344. Version: 2015

[57] Kraftfahrt-Bundesamt: *Neuzulassungen von PKW in den Jahren 2005 bis 2014 nach ausgewählten Haltergruppen*. www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/z_n_halter.html?nn=652344. Version: Januar 2015

[58] Fornahl, Dirk ; Wernern, Noreen: New Electric Mobility in Fleets in the Rural Area of Bremen/Oldenburg. In: Filho, Walter L. (Hrsg.) ; Kotter, Richard (Hrsg.): *E-Mobility in Europe: Trends and good practice*. Springer, 2015, S. 237 – 251

[59] ElBanhawy, Eiman Y.: To Cluster the E-Mobility Recharging Facilities (RFs). In: Filho, Walter L. (Hrsg.) ; Kotter, Richard (Hrsg.): *E-Mobility in Europe: Trends and good practice*. Springer, 2015, S. 255 – 279

[60] Botsford, Charles ; Szczepanek, Adam: Fast charging vs. slow charging: Pros and cons for the new age of electric vehicles. In: *International Battery Hybrid Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, 2009

[61] Selbach, David: Corporate Carsharing: Die neue Alternative zum Leasing. In: *Impulse* (2013), Januar. www.impulse.de/management/teilen-lernen

[62] Wermuth, M: *Mobilitätsstudie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 "(KiD 2010)–Ergebnisse im Überblick*. http://daten.clearingstelle-verkehr.de/240/9/KiD2010-Schlussbericht.pdf. Version: 2012

[63] Ellram, Lisa M. ; Siferd, Sue P.: TOTAL COST OF OWNERSHIP: A. KEY CONCEPT IN STRATEGIC COST MANAGEMENT DECISIONS. In: *Materials Engineering* 288 (1998), Nr. 288, 288. http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/5845579/ellram_siferd_jbl_1998_total_cost_of_ownership.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1480261776&Signature=eb7ABZa2DUXD38pGVnF%2FvCl9qN0%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DTotal_cost_of_ownership_a_key_concept_in.pdf

[64] Helms, H ; Jöhrens, J ; Hanusch, J ; Höpfner, U ; Lambrecht, U ; Pehnt, M: *UMBReLA–Umweltbilanzen Elektromobilität–wissenschaftlicher Grundlagenbericht. ifeu–Institut für Energie und Umweltforschung GmbH.* https://www.ifeu.de/Umbrela/images/pdf/ifeu_(2011)_-_UMBReLA_grundlagenbericht.pdf. Version: 2011

[65] Bundesministerium der Finanzen: *AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle „AV").* http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/2000-12-15-afa-103.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Version: 2000

[66] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: *Bundesreisekostengesetz (BRKG).* https://www.gesetze-im-internet.de/brkg_2005/BJNR141810005.html. Version: 2013

[67] Kley, Fabian: *Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge: Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens.* Fraunhofer, 2011

[68] Brand, Martin: *ADAC Autotest Renault Zoe Z.E. Life.* https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT4997_Renault_Zoe_Z_E_Life/Renault_Zoe_Z_E_Life.pdf. Version: 2013

[69] Busse, Daniel ; Esch, Thomas ; Muntaniol, Roman: Thermal Management in E-Carsharing Vehicles—Preconditioning Concepts of Passenger Compartments. In: Filho, Walter L. (Hrsg.) ; Kotter, Richard (Hrsg.): *E-Mobility in Europe: Trends and good practice.* Springer, 2015, S. 327 – 343

[70] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW): *Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektroautos in deutschland auf gutem Weg.* www.bdew.de/internet.nsf/id/20150410-pi-ausbau-der-ladeinfrastruktur-in-deutschland_auf-gutem-weg-de. Version: April 2015

[71] Statista: *Anzahl der Tankstellen in Deutschland von 1950 bis 2015.* de.statista.com/statistik/daten/studie2621/umfrage/anzahl-der-tankstellen-in-deutschland-zeitreihe. Version: 2015

[72] Gerwig, C. ; Behrens, D. ; Knackstedt, R. ; Lessing, H.: Innovatives eCarSharing-Konzept am Beispiel des Hildesheimer Tandem-Modells. In: *INFORMATIK 2014: GI-Edition-Lecture Notes in Informatics (LNI)* (2014), September, Nr. P-232, 1617-1629. e2work.de/wp-content/uploads/informatik2014_gerwig.pdf

[73] Jameel, Mohsan ; Filevych, Olexander ; Lessing, Helmut: Empirical Study of Using Renewable Energies in Innovative Car-Sharing Business Model "in Tandem"

at the University of Hildesheim. Version: sep 2016. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44711-7_16. In: *Progress in IS*. Springer Nature, sep 2016. – DOI 10.1007/978–3–319–44711–7_16, S. 197–207

[74] Kolek, Erik ; Reinecke, Britta ; Filevych, Olexander: Erfolg innovativer E-Carsharing-Geschäftsmodelle – E-Carsharing-Geschäftsmodell-, Elektromobilitäts- und Carsharing-Akzeptanz im öffentlichen Hochschulsektor. In: *Lecture Notes in Informatics (LNI)* (2016), 1317-1329. https://pdfs.semanticscholar.org/cccf/524d7b1d8f66e5c74557af95093477cb4026.pdf

[75] Ruhdorfer, M.: *ADAC Autotest Opel Ampera E-REV ePionier Edition*. https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT4698_Opel_Ampera_E_REV_ePionier_Edition/Opel_Ampera_E_REV_ePionier_Edition.pdf. Version: 2011

[76] Schmidt, Arne ; Thomas, Dirk ; Höpfner, Jörn: *eAutarke Zukunft Lösungen in Smart-Grid-Strukturen - Bericht der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung*. 2016

[77] Peters, Anja ; Dütschke, Elisabeth: *Zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität: Analyse aus Expertensicht*. Fraunhofer ISI, 2010 http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb11/672256282.pdf

[78] Leonard, Thomas C.: Richard H. Thaler, Cass R. Sunstein, Nudge: Improving decisions about health, wealth, and happiness. In: *Constitutional Political Economy* 19 (2008), Nr. 4, S. 356–360

[79] Bundesverband Carsharing: *CarSharing - Jahresbilanz 2015: Wachstum und Konsolidierung im deutschen CarSharing-Markt*. http://www.carsharing.de/sites/default/files/uploads/pm_carsharing-bilanz_2016_0.pdf. Version: 2016

[80] Bundesverband Carsharing: *Bundesverband CarSharing-Umfrage: Neukunden schaffen eigenes Auto ab*. http://www.car-sharing.info/images/stories/pdf_dateien/pm_neukundenbefragung_2012-11-22.pdf. Version: 2012

[81] forsa: *Mobilität, Kosten und Einsparungen im Alltag*. https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2014/10/forsa-mobilitaetsumfrage.pdf. Version: 2014

[82] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: *Einkommenssteuergesetz (EStG)*. www.gesetze-im-internet.de/estg. Version: 2015

[83] Bundesfinanzhof: *Urteil vom 6. Oktober 2011 · Az. VI R 56/10*. https://openjur.de/u/398520.html. Version: 2011

[84] Bundesministerium der Finanzen: *Lohnsteuerliche Behandlung vom Arbeitnehmer selbst getragener Aufwendungen bei der Überlassung eines betrieblichen Kraftfahrzeugs (§ 8 Absatz 2 Satz 2 ff. EStG); Anwendung von R 8.1 Absatz 9 Nummer 1 Satz 5 LStR 2011 und R 8.1 Absatz 9 Nummer 4 LStR 2011.* https://www.hk24.de/blob/hhihk24/produktmarken/beratung-service/recht_und_steuern/steuerrecht/downloads/1158172/27bf7282dc736d3c9dbe4572fa18b752/BMF_Schreiben_vom_19_April_2013-data.pdf. Version: April 2013

[85] Bundesverband der Energie - und Wasserwirtschaft e.V.: *Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2016).* https://www.bdew.de/internet.nsf/res/7BD63123F7C9A76BC1257F61005AA45F/$file/160218_Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG_2016_final.pdf. Version: 2016

[86] Nitsch, Joachim ; Krewitt, Wolfram ; Nast, Michael ; Viebahn, Peter ; Gärtner, Sven ; Pehnt, Martin ; Reinhardt, Guido ; Schmidt, Regina ; Uihlein, Andreas ; Barthel, Claus u. a.: *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland.* http://elib.dlr.de/2877/1/Oekologisch-opt-Ausbau_Langfassung.pdf. Version: 2004

[87] Manwell, James F. ; McGowan, Jon G. ; Rogers, Anthony L.: *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application.* John Wiley & Sons, 2010

[88] Stankovic, Sinisa ; Campbell, Neil ; Harries, Alan: *Urban wind energy.* Earthscan, 2009

[89] Jäger-Waldau, Arnulf: Photovoltaics, Status of. In: Richter, Christoph (Hrsg.) ; Lincot, Daniel (Hrsg.) ; Gueymard, Christian A. (Hrsg.): *Solar Energy.* Springer, 2012, S. S. 174 – 211

[90] Martinuzzi, Santo ; Slaoui, Abdelillah ; Kleider, Jean-Paul ; Lemiti, Mustapha ; Trassy, Christian ; Levy-Clement, Claude ; Dubois, Sébastien ; Monna, Remi ; Veschetti, Yves ; Périchaud, Isabelle ; Quang, Nam L. ; Kraiem, Jed: Silicon Solar Cells, Crystalline. In: Richter, Christoph (Hrsg.) ; Lincot, Daniel (Hrsg.) ; Gueymard, Christian A. (Hrsg.): *Solar Energy.* Springer, 2012, S. 226 – 269

[91] Wagemann, Hans-Günther ; Eschrich, Heinz: *Photovoltaik: Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben.* Vieweg+Teubner, 2010. – 63 – 89 S. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9376-5_5. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9376-5_5. – ISBN 978–3–8348–9376–5

[92] Kühl, Lars: Solare Stromerzeugung – Photovoltaik. Version: 2010. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-8602-3_25. In: Kramer, Matthias (Hrsg.): *Integratives Umweltmanagement: Systemorientierte Zusammenhänge zwischen Politik, Recht, Management und Technik.* Wiesbaden : Gabler, 2010. – ISBN 978–3–8349–8602–3, 563–585

[93] Deutscher Wetterdienst Abt. Klima und Umweltberatung: *Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland*. http://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html. Version: 2016

[94] Wagner, Andreas: *Photovoltaik Engineering: Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung*. Springer Berlin Heidelberg, 2015. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48640-5_6. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48640-5_6. – ISBN 978–3–662–48640–5

[95] PVGIS: *Photovoltaic Geographical Information System*. re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php

[96] Suri, Manan ; Huld, Thomas ; Dunlop, ED ; Cebecauer, T: Geographic aspects of photovoltaics in Europe: contribution of the PVGIS website. In: *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of* 1 (2008), Nr. 1, S. 34–41

[97] Fthenakis, Vasilis: Solar Cells: Energy Payback Times and Environmental Issues. In: Richter, Christoph (Hrsg.) ; Lincot, Daniel (Hrsg.) ; Gueymard, Christian A. (Hrsg.): *Solar Energy*. 2012, S. 341 – 357

[98] Palz, Wolfgang: PV Policies and Markets. In: Richter, Christoph (Hrsg.) ; Lincot, Daniel (Hrsg.) ; Gueymard, Christian A. (Hrsg.): *Solar energy*. Springer, 2012, S. 212 – 225

[99] Bundestag: *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes*. http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl100s0305.pdf. Version: März 2000

[100] Bundestag: *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014)*. http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/index.html. Version: Juli 2014

[101] Bertram, Klaus: *Haufe-HGB-Kommentar*. Haufe, 2009

[102] Horsch, Jürgen: *Kostenrechnung: Klassische und neue Methoden in der Unternehmensplanung*. 2. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

[103] Baumann, Enrico: *Make-or-Buy-Entscheidungen bei Mehrstufigen Prozessen: Disskussion von Methoden und Ansätzen*. Igel Verlag RWS, 2014

[104] Goede, Gerd W.: *Wirtschaftsenglisch-Lexikon*. Bd. 4. Oldenbourg Verlag, 2003

[105] BSW-Bundesverband Solarwirtschaft e.V.: *Photovoltaik-Preisindex*. https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/130218_EuPD_Preismonitor_q1_13.pdf. Version: 2013

[106] Kost, Christoph ; Mayer, Johannes N. ; Thomsen, Jessica ; Hartmann, Niklas ; Senkpiel, Charlotte ; Philipps, Simon ; Nold, Sebastian ; Lude, Simon ; Schlegl, Thomas: Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. In: *Fraunhofer ISE* (2013). https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2013_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf

[107] Christian Münch GmbH: *Wechselrichter*. http://www.photovoltaik.org/ratgeber/wechselrichter

[108] Schierenbeck, H. ; Wöhle, C.B.: *Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre*. 18. De Gruyter, 2012

[109] Eurostat: *Langfristige Rendite öffentlicher Anleihen*. ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.de?tab=table&language=de&pcode=teimf050. Version: September 2015

[110] Wirth, Harry ; Schneider, Karin: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. (2015), Oktober. https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf

[111] Bundesnetzagentur: *Degressions- und Vergütungssätze April bis Juni 2016*. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/Datenmeldungen/DegressionsVergSaetze_Apr-Jun2016.xls?__blob=publicationFile&v=2. Version: 2017

[112] EWI, EEFA: Studie Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030. In: *Köln and Berlin* (2008). http://www.ewi.uni-koeln.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Studien/Politik_und_Gesellschaft/2008/EW_2008-03-31_Gesamtkonzept-2030.pdf

[113] Kronthaler, F.: *Statistik angewandt: Datenanalyse ist (k)eine Kunst mit dem R Commander*. Springer Berlin Heidelberg, 2015 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 9783662471180

[114] Tukey, John W.: Exploratory data analysis. (1977). https://pdfs.semanticscholar.org/2f40/fd06bc9fd00a27437e14ed171e96e4fd9326.pdf

[115] Doetsch, Christian ; Grevé, Anna ; Rohrig, Kurt: *Abschlussbericht Metastudie „Energiespeicher“*. 2014

[116] Kairies, KaiPhilipp ; Haberschusz, David ; Ouwerkerk, Jonas van ; Strebel, Jan ; Wessels, Oliver ; Magnor, Dirk ; Badeda, Julia ; Sauer, Dirk U.:

Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher, Jahresbericht 2016. http://www.speichermonitoring.de/fileadmin/user_upload/Speichermonitoring_Jahresbericht_2016_Kairies_web.pdf. Version: 2016

[117] Deutsche Bunsen-Gesellschaft für physikalische Chemie: *Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung.* https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/download/dbg_broschuere_2013.pdf. Version: 2013

[118] Fuchs, Georg ; Lunz, Benedikt ; Leuthold, Matthias ; Sauer, Dirk U.: Technology overview on electricity storage. In: *ISEA, Aachen, Juni* (2012). https://www.researchgate.net/profile/Dirk_Sauer/publication/299425278_Technology_Overview_on_Electricity_Storage_-_Overview_on_the_potential_and_on_the_deployment_perspectives_of_electricity_storage_technologies/links/56f5bdca08ae81582bf21724.pdf

[119] Naish, Chris ; McCubbin, Ian ; Edberg, Oliver ; Harfoot, Mr M.: Outlook of Energy Storage Technologıes / IP/A/ITRE/ST/2007-07. Version: 2008. http://www.europarl.europa.eu/document/activities/cont/201109/20110906ATT26009/20110906ATT26009EN.pdf. 2008. – Forschungsbericht

[120] Knab, Sebastian ; Strunz, Kai ; Lehmann, Heiko: Smart Grid: The Central Nervous System for Power Supply-New Paradigms, New Challenges, New Services. (2009). https://www.depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/2710/1/Dokument_23.pdf

[121] Kasperk, Garnet ; Drauz, Ralf: Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette. In: Kampker, Achim (Hrsg.) ; Vallée, Dirk (Hrsg.) ; Schnettler, Armin (Hrsg.): *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie.* Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2013, S. 103 – 148

[122] Link, Jochen: *Elektromobilität und erneuerbare Energien: Lokal optimierter Einsatz von netzgekoppelten Fahrzeugen*, Technischen Universität Dortmund, Diss., 2011

[123] Cormen, T.H. ; Leiserson, C.E. ; Rivest, R. ; Stein, C.: *Algorithmen - Eine Einführung.* De Gruyter, 2013. – ISBN 9783110522013

[124] Dempe, S. ; Schreier, H.: *Operations Research: Deterministische Modelle und Methoden.* Vieweg+Teubner Verlag, 2007 (Studienbücher Wirtschaftsmathematik). – ISBN 9783835190559

[125] Wooldridge, Michael: *An introduction to multiagent systems.* John Wiley & Sons, 2009

[126] Warmer, CJ ; Hommelberg, MPF ; Roossien, Bart ; Kok, JK ; Turkstra, Jan W.: A field test using agents for coordination of residential micro-chp. In:

Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. ISAP 2007. International Conference on IEEE, 2007, 1–4

[127] Wieland, Kevin: *openWB - Die modulare Open Source Wallbox Lösung*. https://openwb.de/. Version: 2018

[128] Wieland, K.: *openWallbox zum steuern einer SimpleEVSEwb*. https://github.com/snaptec/openWB. Version: 2018

[129] Frenzel, I. ; Jarass, J. ; Trommer, S. ; Lenz, B.: Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung. (2015). https://www.dlr.de/vf/Portaldata/12/Resources/dokumente/projekte/pakt2/Ergebnisbericht_E-Nutzer_2015.pdf. – Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR).

[130] Deutscher Wetterdienst Abt. Klima und Umweltberatung: *Globalstrahlungskarten, Mittlere Monats- und Jahressummen*. https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html?cl2Categories_LeistungsId=strahlungskarten_mi&lsId=505200&cl2Categories_Monat=straka_mi_13. Version: 2010

[131] Thewissen, C. ; Runia, P. ; Wahl, F. ; Geyer, O.: *Marketing: Prozess- und praxisorientierte Grundlagen*. De Gruyter, 2015 (De Gruyter Studium). – ISBN 9783110413960

[132] Homburg, C.: *Quantitative Betriebswirtschaftslehre: Entscheidungsunterstützung durch Modelle ; mit Beispielen, Übungsaufgaben und Lösungen*. Gabler Verlag, 2000 (Gabler-Lehrbuch). – ISBN 9783409334174

[133] Bundesverwaltungsgericht: *Urteil vom 27.02.2018 - 7 C 30.17*. https://www.bverwg.de/270218U7C30.17.0. Version: 2018

[134] Pauly, Christoph: *ADAC Autotest BMW i3 (94 AH)*. https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5542_BMW_i3_94_Ah/BMW_i3_94_Ah.pdf. Version: 2016

[135] Ruhdorfer, M.: *ADAC Autotest Renault Zoe (41 kWh) Intens*. https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5633_Renault_Zoe_41_kWh_Intens_mit_Batteriemiete_/Renault_Zoe_41_kWh_Intens_mit_Batteriemiete_.pdf. Version: 2017

[136] Ruhdorfer, M.: *ADAC Autotest Opel Ampera-E First Edition*. https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5606_Opel_Ampera-E_First_Edition/Opel_Ampera-E_First_Edition.pdf. Version: 2017

[137] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: *Einigung auf Kaufprämie für E-Autos.* https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/04/2016-04-27-foerderung-fuer-elektroautos-beschlossen.html. Version: 2016

[138] Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen: *Nachteilsausgleich Dienstwagenbesteuerung.* https://www.elektromobilitaet.nrw.de/privatnutzer/foerderprogramme/. Version: 2018

[139] McKinsey: *Elektromobilität: China baut Vorsprung aus.* https://www.mckinsey.de/elektromobilitaet. Version: 2018

[140] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg: *Zahl der Elektroautos steigt weltweit von zwei auf über drei Millionen.* https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Pressemitteilungen/2018/pi04-2018-ZSW-WeltweiteZahlenElektroautos.pdf. Version: 2018

[141] Deutscher Bundestag: *Sachstand und weitere Förderung der Elektromobilität und der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge.* http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/009/1900986.pdf. Version: 2018

[142] Allego GmbH: *Europas erste öffentliche Ultra-Schnellladestation in Betrieb.* https://www.allego.eu/de/europas-erste-oeffentliche-ultra-schnellladestation-in-betrieb/. Version: 2017

[143] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Förderrichtlinie Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland.* https://www.bav.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Foerderung_Ladeinfrastruktur/Foerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=6. Version: 2017

[144] Daimler AG: *Weltweit größter 2nd-Use-Batteriespeicher geht ans Netz.* http://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/de/13634457. Version: 2016

[145] ENEL: *NISSAN, ENEL AND NUVVE OPERATE WORLD'S FIRST FULLY COMMERCIAL VEHICLE-TO-GRID HUB IN DENMARK.* https://www.enel.com/content/dam/enel-com/pressrelease/porting_pressrelease/Nuvve-Nissan-Enel%20ENG.pdf. Version: 2016

[146] Shankleman, Jess: *Parked Electric Cars Earn $1,530 From Europe's Power Grids.* https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-08-11/parked-electric-cars-earn-1-530-feeding-power-grids-in-europe. Version: 2017

[147] Wachenfeld, Walther ; Winner, Hermann ; Gerdes, Chris ; Lenz, Barbara ; Maurer, M ; Beiker, SA ; Fraedrich, E ; Winkle, Thomas: Use-cases des autonomen Fahrens. Version: 2015. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-45854-9_2.pdf. In: *Autonomes Fahren*. Springer, 2015, 9–37

[148] Cyganski, Rita: Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren aus Sicht der Nachfragemodellierung. Version: 2015. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-45854-9_12.pdf. In: *Autonomes Fahren*. Springer, 2015, 241–263

[149] Schrader, Marian: *e2work Das Flotten-Sharing*. www.e2work.de. Version: 2018

Teil II.

Anhang

Mitarbeiterbefragung Mobilität

Liebe Kolleginnen und Kollegen,
seit dem 01.10.2014 ist der ADAC Niedersachsen/Sachsen-Anhalt e.V. Partner im Verbundvorhaben e-Autarke Zukunft. Das Projekt wird im Rahmen des Schaufensters Elektromobilität vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Unsere Partner in diesem Fördervorhaben sind die Uni Hildesheim, der TÜV Nord und Helma Hausbau. Ziel unseres Projektes ist unter anderem die Förderung der Elektromobilität. Im Rahmen des Projekts werden wir in den kommenden 18 Monaten drei Elektrofahrzeuge anschaffen und auf dem Parkplatz am Standort Laatzen einen Carport mit Ladeinfrastruktur aufbauen. In dieser Zeit möchten wir die Praxistauglichkeit von Elektrofahrzeugen im privaten und geschäftlichen Einsatz mit Ihrer Unterstützung testen.
Wir alle sind mobil, aber auf unterschiedliche Weise. Wir möchten diese Formen möglichst umfassend berücksichtigen und Sie mit verschiedenen Angeboten bei der Nutzung der Fahrzeuge mit einbinden. Dazu benötigen wir Ihre Hilfe. In einem ersten Schritt haben wir einen Fragebogen entworfen. Bitte nehmen Sie sich ein paar Minuten Zeit und füllen diesen aus. Nur so ist es uns möglich einen Überblick zu erhalten und Sie in den Feldversuch mit einzubeziehen.
Der Fragebogen ist anonym. Wir würden uns freuen, wenn Sie das Projekt unterstützen und diesen Fragebogen zeitnah ausfüllen.

1. Haben Sie ein eigenes Fahrzeug?
☐ Ja ☐ Nein

2. Wie viele Fahrzeuge haben Sie in Ihrem Haushalt?
Anzahl:____

3. Welches Verkehrsmittel nutzen Sie, um zur Arbeit zu kommen?
(Mehrfachnennungen sind möglich)
☐ Pkw
☐ Fahrgemeinschaft
☐ ÖPNV, Bahn
☐ Fahrrad, Pedelec, E-Bike
☐ Andere

4. Wie groß ist die einfache Distanz zwischen Ihrem Wohnort und Ihrem Arbeitsort?
____km

5. Wie viele Kilometer fahren Sie im Durchschnitt mit Ihrem Fahrzeug?
An einem Arbeitstag: ____km und im Jahr: ____km

6. Wie ist das Verhältnis zwischen Stadt-, Land- und Autobahnfahrten?
____% Stadt, ____% Land, ____% Autobahn

7. Wie groß müsste die Reichweite eines Elektroautos mindestens sein, damit es für Sie als Privatwagen in Frage kommt?
Ca. ____km

8. Würden Sie gerne an einem Praxistest mit einem Elektroauto teilnehmen?
☐ Ja ☐ Nein ☐ Weiß nicht

9. Hätten Sie die Möglichkeit ein E-Auto, z.B. an einer Steckdose, zu laden (außer am Standort Laatzen)?
☐ Ja, auf Privatgelände
☐ Ja, auf öffentlichem Gelände
☐ Nein
☐ Weiß nicht

10. Welche Aspekte spielen bei der Wahl des Verkehrsmittels eine Rolle?

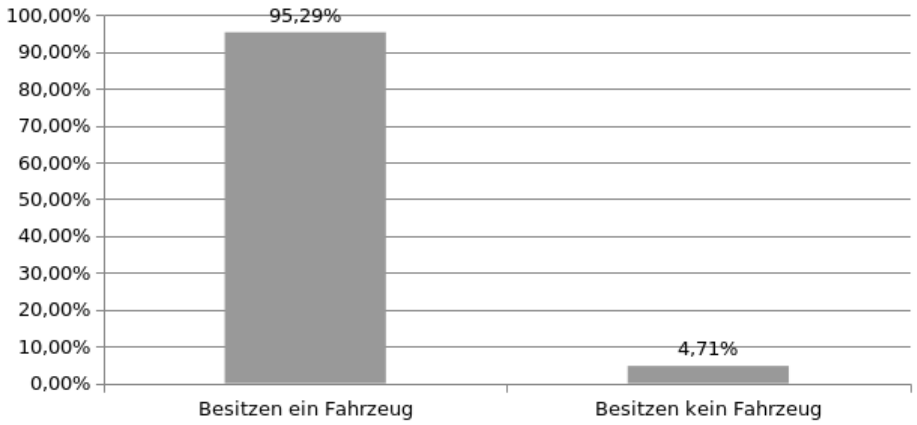
	sehr unwichtig	**unwichtig**	**wichtig**	**sehr wichtig**
Umweldfreundlichkeit				
Kosten				
Komfort				
Zeit				

11. Wie gut fühlen Sie sich über den aktuellen Stand zum Thema Elektroauto informiert wenn Sie an folgende Aspekte denken?

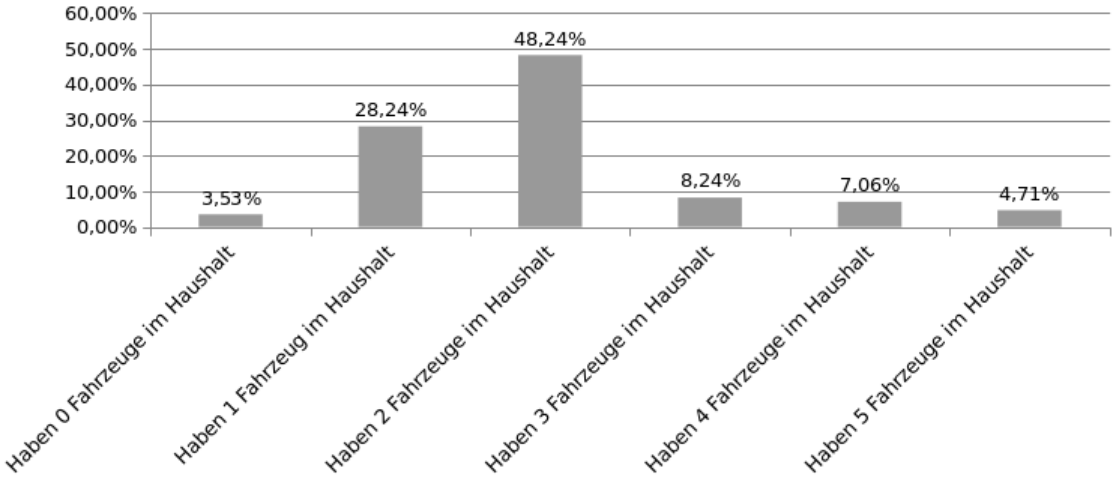
	sehr schlecht	**schlecht**	**gut**	**sehr gut**
Reichweite der Fahrzeuge				
Ladezeit für eine Vollladung				
Arten der Ladung				
Verfügbarkeit Ladeinfrastruktur				

Ergebnisse Mitarbeiterbefragung

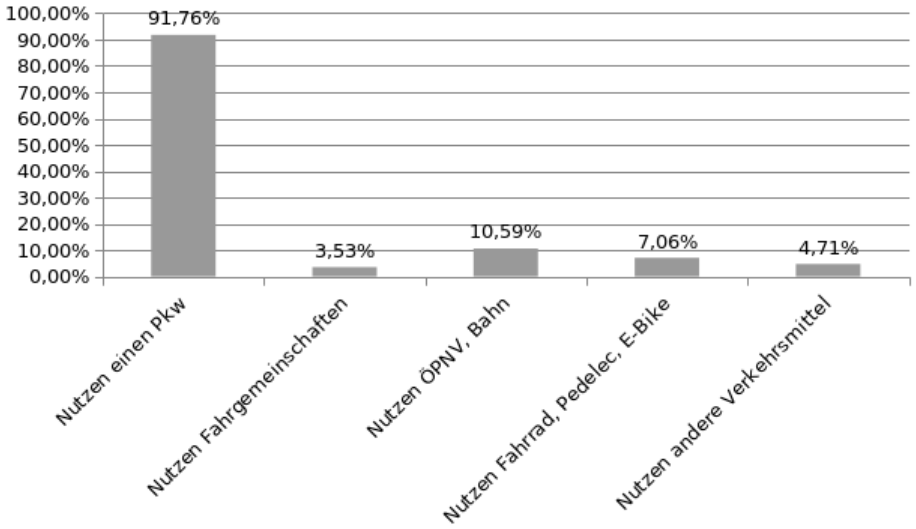
Allgemein: n = 85
Zu Frage 2: Insgesamt 171 Fahrzeuge
Zu Frage 3: Mehrfachangaben möglich. 11 Personen haben Mehrfachangaben gemacht.
Zu Frage 4: Maximale Entfernung = 93 km.
Zu Frage 5: Maximal 180 km pro Tag zurückgelegt. 34 Personen legen am Tag nur den Arbeitsweg zurück. Mittlere Jahresfahrleistung liegt bei 19.313,33 km je Mitarbeiter.
Zu Frage 6: Nur 81 Personen haben diese Frage beantwortet
Zu Frage 7: Durchschnitt = 306 km. Maximal 900 km gewünscht.
Zu Frage 9: 3 Personen haben Mehrfachangaben gemacht.



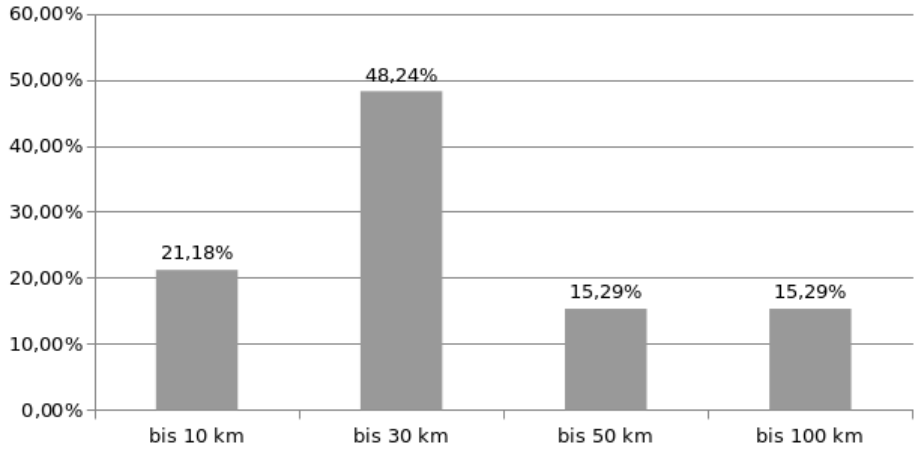
Frage 1: Fahrzeugbesitz



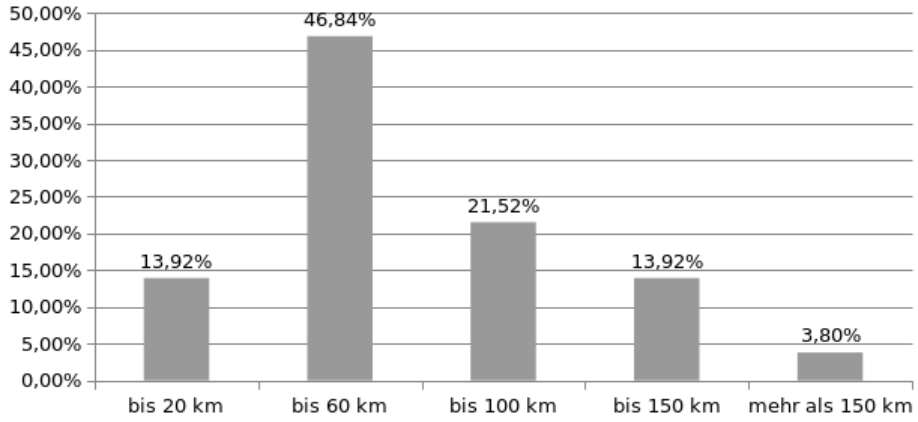
Frage 2: Fahrzeuge je Haushalt



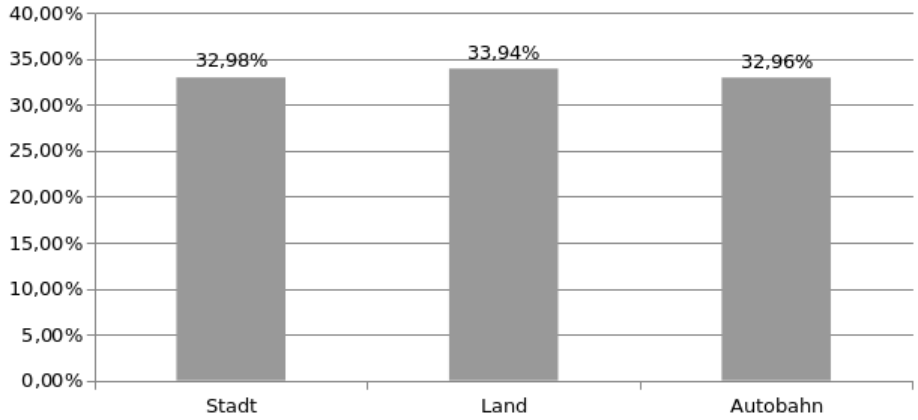
Frage 3: Verkehrsmittel für den Arbeitsweg



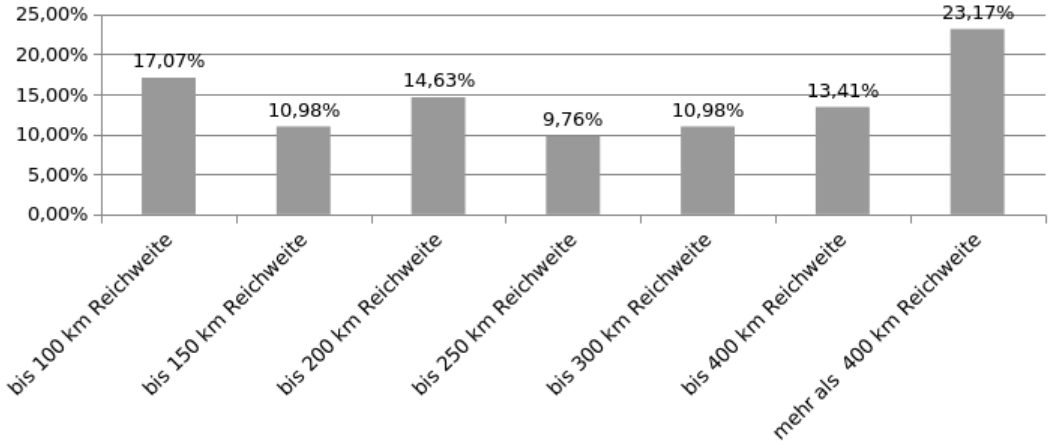
Frage 4: Länge des Arbeitswegs



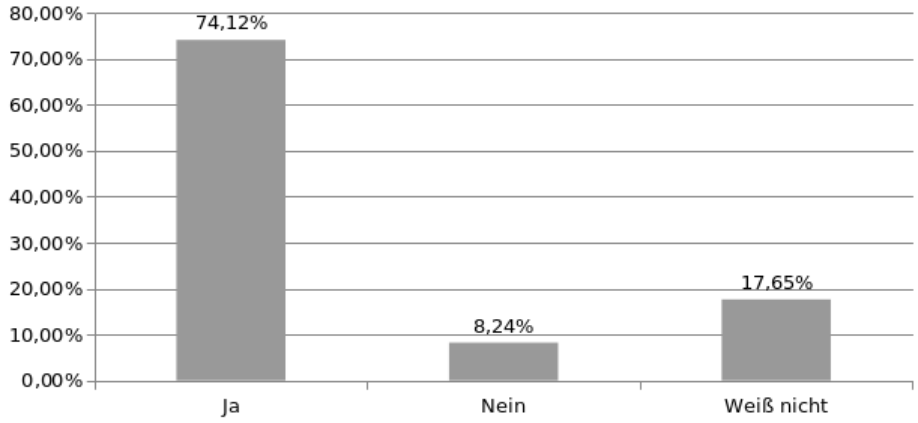
Frage 5: Tageskilometer, Jahreskilometer



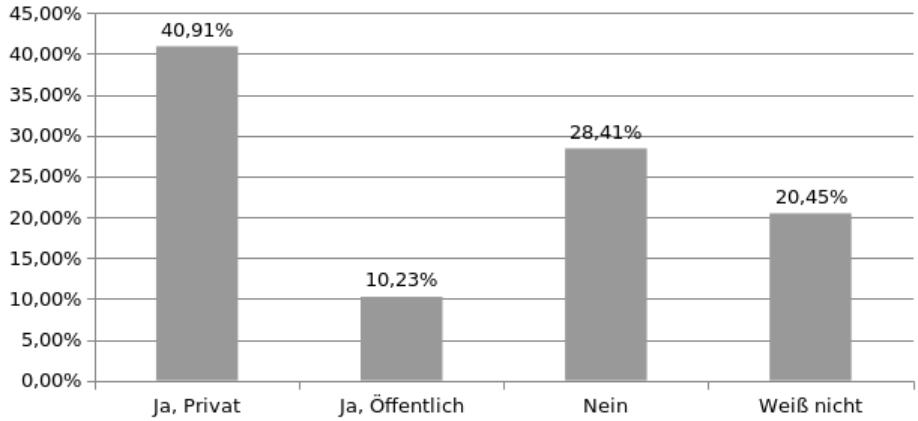
Frage 6: Nutzungsprofil



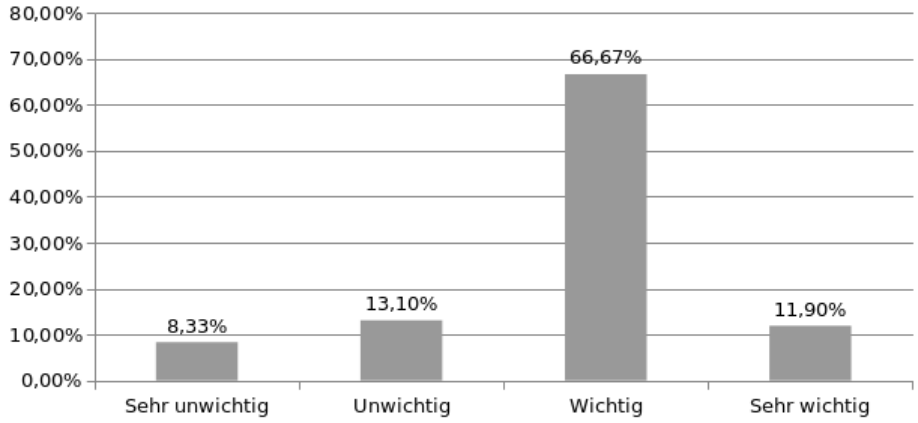
Frage 7: Gewünschte Fahrzeugreichweite



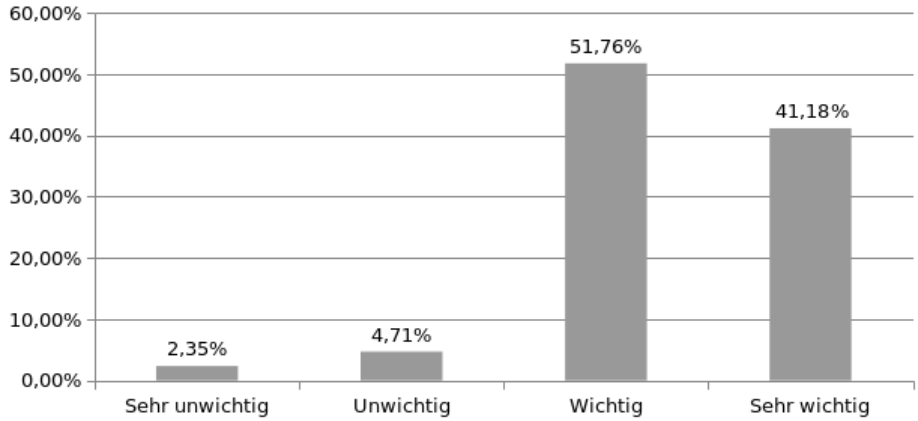
Frage 8: Bereitschaft zur Teilnahme an der Erprobung



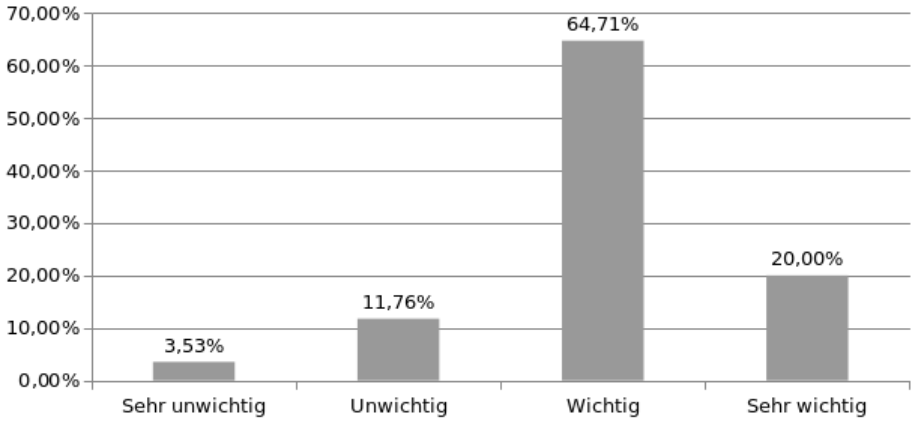
Frage 9: Zugang zu Lademöglichkeit



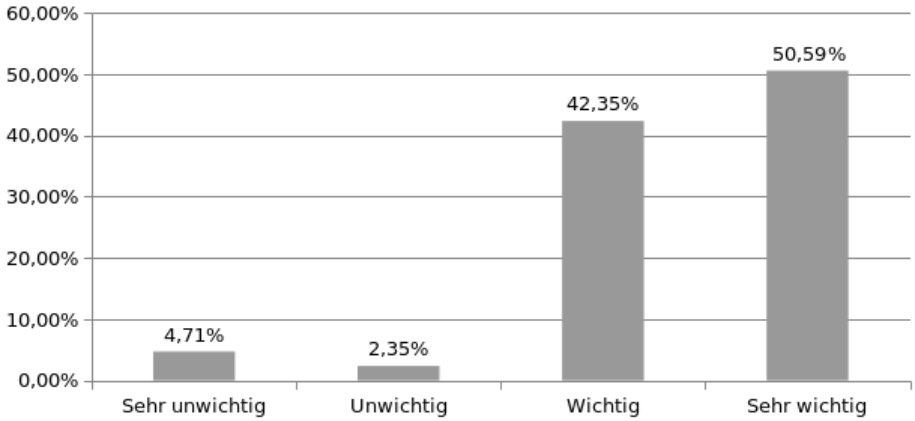
Frage 10a: Stellenwert Umwelt bei Verkehrsmittelwahl



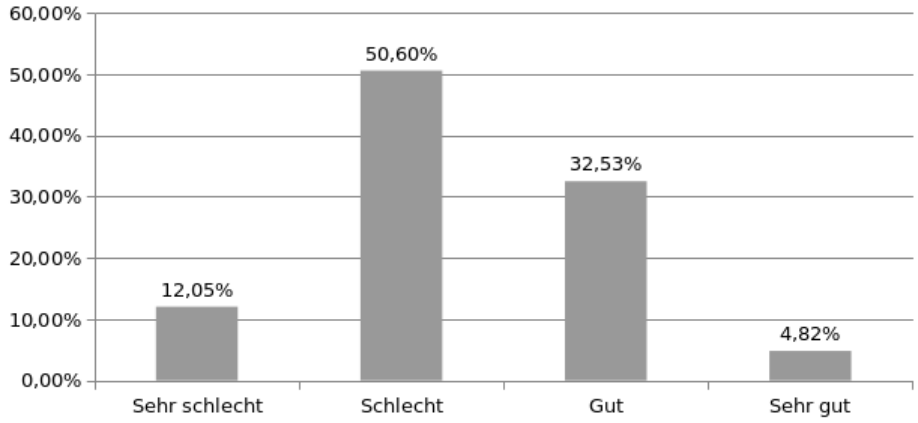
Frage 10b: Stellenwert Kosten bei Verkehrsmittelwahl



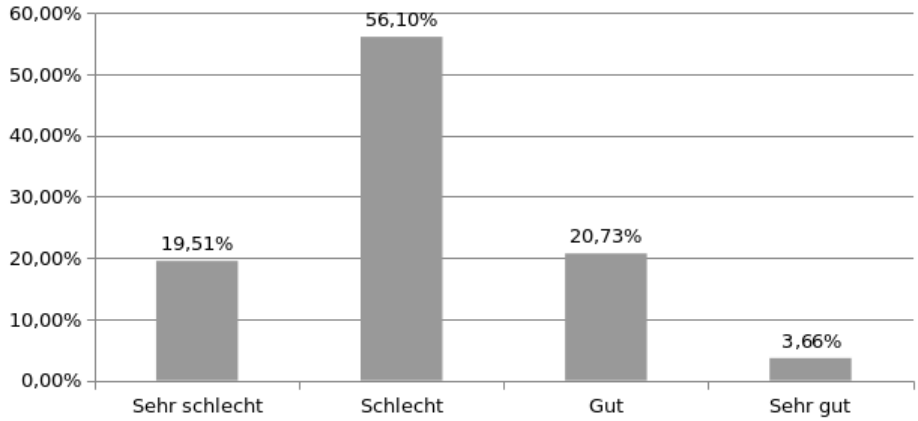
Frage 10c: Stellenwert Komfort bei Verkehrsmittelwahl



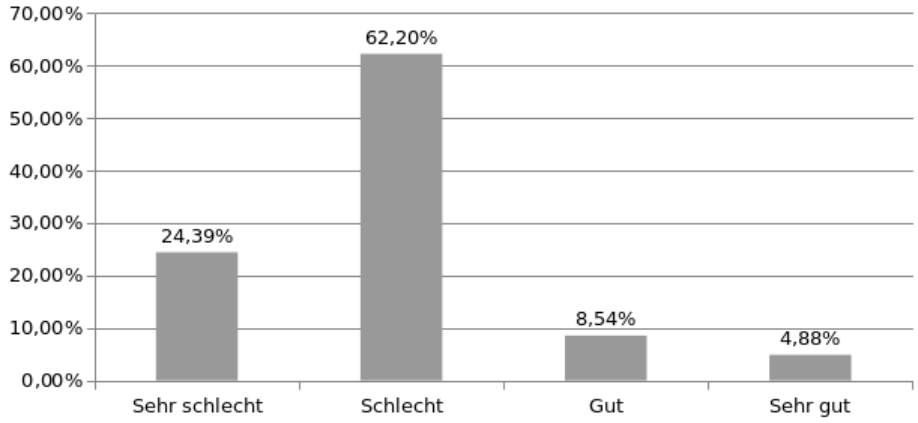
Frage 10d: Stellenwert Zeit bei Verkehrsmittelwahl



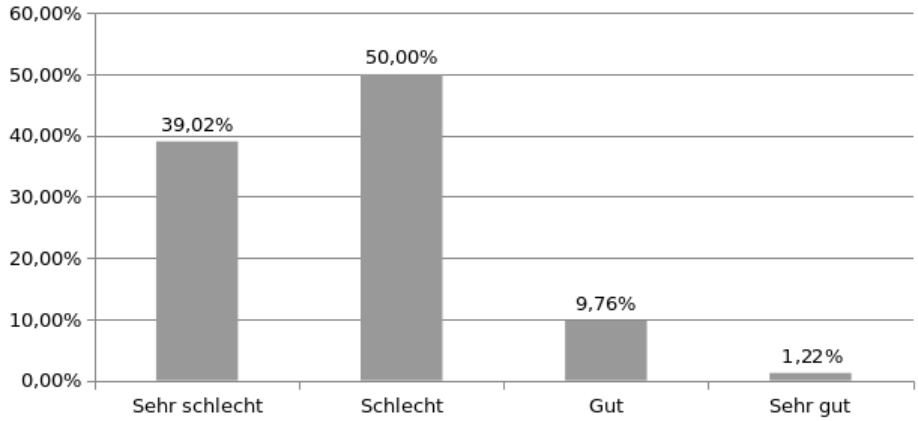
Frage 11a: Informationsstand zum Thema Fahrzeugreichweite



Frage 11b: Informationsstand zum Thema Ladezeiten



Frage 11c: Informationsstand zum Thema Arten der Ladung



Frage 11d: Informationsstand zum Thema Ladeinfrastruktur

Fragebogen Tandempartner

ADAC

ADAC Niedersachsen
Sachsen-Anhalt e. V.

Fahrbericht
Elektrofahrzeug

Datum _____

Strecke
Angezeigte Reichweite Start: _____ km Ziel: _____ km
Kilometerstand Start: _____ km Ziel: _____ km

Streckenprofil
Stadtverkehr wenig | normal | viel
Landstraße wenig | normal | viel
Autobahn wenig | normal | viel

Ladevorgang
Geladen ja | nein
Schnellladung ja | nein
Ort _____

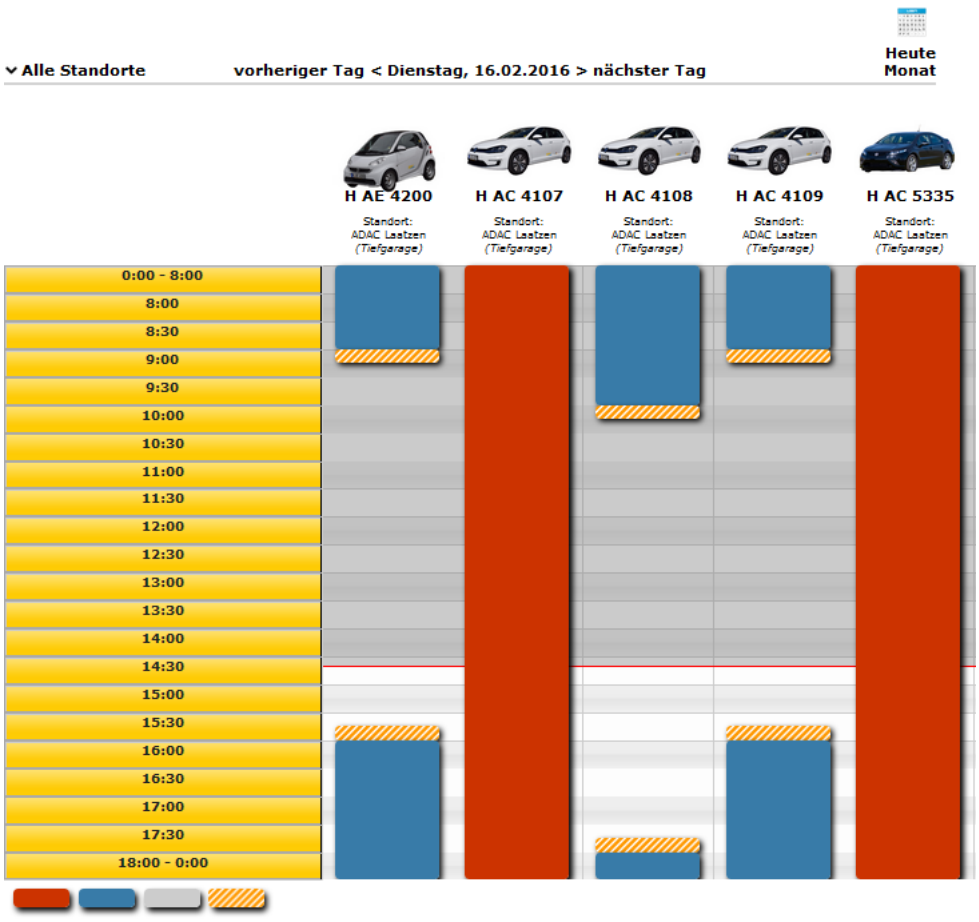
Fahrsituation stau | stop and go | freie Fahrt
Fahrstil zügig | normal | defensiv

Außentemperatur: _____°C
(im Display angezeigt)

Bemerkung _____
_____
_____
_____

Erhebungsbogen, welcher von Tandempartnern nach jeder Fahrt ausgefüllt wurde

Buchungsportal



Nutzeransicht Buchungsportal

Performance of Grid-connected PV

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 52°17'51" North, 9°49'38" East, Elevation: 72 m a.s.l.,
Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Nominal power of the PV system: 7.5 kW (crystalline silicon)
Estimated losses due to temperature and low irradiance: 10.8% (using local ambient temperature)
Estimated loss due to angular reflectance effects: 3.7%
Other losses (cables, inverter etc.): 14.0%
Combined PV system losses: 26.2%

	Fixed system: inclination=10 deg., orientation=0 deg.			
Month	**Ed**	**Em**	**Hd**	**Hm**
Jan	4.13	128	0.70	21.8
Feb	8.74	245	1.47	41.1
Mar	17.30	538	2.97	92.1
Apr	25.70	771	4.58	137
May	28.40	881	5.21	162
Jun	30.00	901	5.63	169
Jul	28.00	868	5.29	164
Aug	23.90	740	4.46	138
Sep	18.40	553	3.34	100
Oct	12.00	372	2.11	65.3
Nov	5.31	159	0.92	27.6
Dec	3.47	108	0.60	18.6
Year	17.20	522	3.11	94.7
Total for year		6260		1140

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m2)

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m2)

PVGIS (c) European Communities, 2001-2012
Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged.
http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/

Disclaimer:

The European Commission maintains this website to enhance public access to information about its initiatives and European Union policies in general. However the Commission accepts no responsibility or liability whatsoever with regard to the information on this site.
This information is:

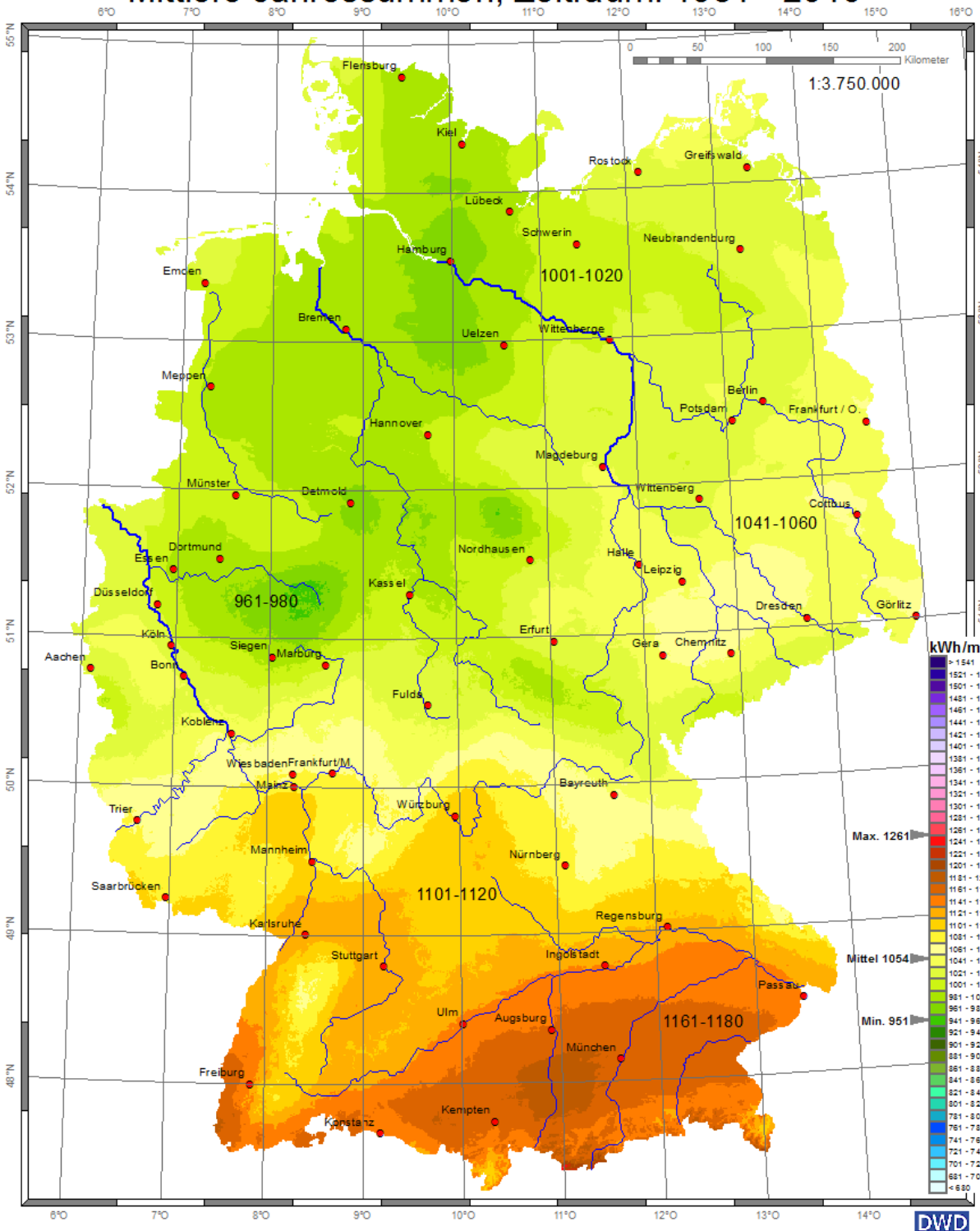
- of a general nature only and is not intended to address the specific circumstances of any particular individual or entity;
- not necessarily comprehensive, complete, accurate or up to date;
- not professional or legal advice (if you need specific advice, you should always consult a suitably qualified professional).

Some data or information on this site may have been created or structured in files or formats that are not error-free and we cannot guarantee that our service will not be interrupted or otherwise affected by such problems. The Commission accepts no responsibility with regard to such problems incurred as a result of using this site or any linked external sites.

Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland

Basierend auf Satellitendaten und Bodenwerte aus dem DWD-Messnetz

Mittlere Jahressummen, Zeitraum: 1981 - 2010



Deutscher Wetterdienst
Klima- und Umweltberatung, Hamburg
Email: klima.hamburg@dwd.de