

Gewerbliche Elektrofahrzeuge - Integration in das Energiesystem und wirtschaftliche Ladestrategien für Flotten

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

der

Technischen Universität Dortmund

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Dipl.-Wirt.-Ing. Ewa Plota

Dortmund

Referent: Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Januar 2019

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Angestellte am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft an der TU Dortmund. In dieser Zeit wurde ich von verschiedenen Menschen auf verschiedenen Wegen unterstützt, wofür ich mich aufrichtig und vom ganzen Herzen bedanken möchte. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz. Durch die Anstellung am Institut und seinen Glauben daran, dass ich diesen Weg gehen kann, hat er die Grundlagen für die enorme fachliche und persönliche Entwicklung geschaffen, die ich vollziehen konnte. Ich bin dankbar für jede der vielen unterschiedlichen Tätigkeiten und Herausforderungen.

Bei Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats sowie die konstruktiven Kommentare. Den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei und Prof. Dr.-Ing. Torsten Bertram danke ich für das Mitwirken am Promotionsverfahren.

Den ehemaligen Kollegen sowie den Studierenden am Institut ie³ danke ich für die besondere und schöne Zeit, für das freundschaftliche Arbeitsklima und die Hilfsbereitschaft. Mein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Willi Horenkamp. Seit meiner Studienarbeit stand er mir mit Rat und Tat zur Seite und hat meinen Werdegang durch sein Handeln und seine Persönlichkeit maßgeblich beeinflusst. Weiterhin danke ich Johannes Rolink und Sebastian Ruthe, an die ich mich mit fachlichen Fragen immer vertrauensvoll wenden konnte. Jonas Maasmann, Christoph Aldejohann, Fritz Rettberg und Ulrich Senkowsky danke ich für die praktische Unterstützung insbesondere in Bezug auf die Arbeit im Labor. Svetlina Ilieva danke ich für die inhaltliche und insbesondere für die emotionale Unterstützung.

Meiner Mutter gilt besonderer Dank. Ohne sie wäre ich heute nicht die Person, die ich geworden bin. Alle großen Entscheidungen hat sie mitgetragen. Nicht nur, dass sie mir durch ihre Vorbildfunktion immer Antrieb und Motivation gewesen ist, sie hat mir auch immer Freiraum zur Selbstverwirklichung gelassen.

Zuletzt möchte ich mich bei meinem Ehemann Alexander bedanken, den ich am Institut kennen und lieben gelernt habe. Er war mir die größte Stütze in den holprigen Zeiten, insbesondere in der Phase der Fertigstellung dieser Arbeit. Unsere fachlichen Diskussionen sind bis heute spannend und unterhaltsam und wenn meine Kraftreserven aufgebraucht waren, hat er seine zur Verfügung gestellt, indem er mich beraten und motiviert hat.

Dortmund, im Mai 2019

Kurzfassung

Fast 10 Jahre nach Veröffentlichung des *Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität* liegt der Bestand an batterieelektrischen Elektrofahrzeugen und Plug-In Hybriden bei ca. 100.000 und damit bei 10 % des Ziels der Bundesregierung für das Jahr 2020. Der gewerbliche Verkehrssektor mit insgesamt ca. 6 Mio. Fahrzeugen an Pkw und leichten Nutzfahrzeugen verfügt über Voraussetzungen ein Eintrittssegment darzustellen und die Marktintegration stärker voranzutreiben, und begründet dadurch den Fokus dieser Arbeit. Zunächst wird das technische Potential einer vollständigen Elektrifizierung dieser beiden Fahrzeugtypen auf Systemebene des Energiesystems in Deutschland quantitativ bewertet. Dazu gehören das energietechnische Verhalten sowie die Interaktion mit der Einspeisecharakteristik von dargebotsabhängigen Erzeugern von erneuerbarer Energie. Die dafür verwendeten saisonalen und wochentagspezifischen Energie- und Lastprofile werden aus den Fahrt-Datensätzen der Verkehrsstudie *Kraftfahrzeuge in Deutschland* abgeleitet. Anschließend wird das wirtschaftliche Potential der Nutzung einer Ladestrategie im Flottenbetrieb untersucht, mit dem Ziel die Gesamtkosten der Elektrifizierung zu senken und so den Anteil an Erstnutzern der Elektromobilität zu erhöhen. Es wird eine Methode zur monetären Bewertung einer Ladesteuerung konzipiert. Dabei wird das gesteuerte Laden basierend auf einem Optimierungsalgorithmus mit einer konfigurierbaren Zielfunktion simuliert. In einem Anwendungsfall wird das Kostensenkungspotential von einer spezifischen Flotte ermittelt.

Abstract

Almost 10 years after the publication of the *National Development Plan for Electric Mobility*, the number of battery electric vehicles and plug-in hybrids is around 100,000 and thus 10% of the German government's target for 2020. The commercial transport sector, with a total of around 6 million vehicles of passenger cars and light commercial vehicles, has the prerequisites to represent an entry segment and to drive market integration forward more strongly, thus justifying the focus of this work. First, the technical potential of a complete electrification of these two vehicle types at the system level of the German energy system will be quantitatively evaluated. This includes the energy-technical behaviour and the interaction with the feed-in characteristics of supply-dependent plants of renewable energy as well as the resulting storage demand. The seasonal and weekday-specific energy and load profiles used for this purpose are derived from the trip data records of the traffic study *Kraftfahrzeuge in Deutschland*. The economic potential of using a charging strategy in fleet operation will then be investigated with the aim of reducing the overall costs of electrification and thus increasing the amount early adopters of electric mobility. A method for the monetary evaluation of an arbitrary charge control will be designed. The latter is simulated based on an optimization algorithm. In one application the cost reduction potential of a specific fleet is presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Motivation	1
1.2	Forschungsziel und Aufbau der Arbeit	3
2	Elektrifizierung von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen gewerblicher Halter in Deutschland	7
2.1	Verkehrssektor in Deutschland – Eckdaten.....	8
2.2	Gewerblich gehaltene Fahrzeuge als Katalysator für die Elektromobilität	12
2.3	Verkehrs- und energiewirtschaftliches Verhalten gewerblich gehaltener Pkw und leichter Nutzfahrzeuge.....	15
2.3.1	KID 2010	15
2.3.2	Methodik und Annahmen der Analyse des Verkehrs- und des energetischen Verhaltens.....	17
2.3.3	Ergebnisse	25
2.4	Zusammenfassung und Bewertung.....	35
3	Interdependenzen mit dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien	39
3.1	Energie und installierte Leistung aus dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien	40
3.2	Systemeigenschaften bei ungesteuerter Ladung	44
3.2.1	Kennwerte zur Beschreibung der Systemeigenschaften.....	44
3.2.2	Eingangsdaten	45
3.2.3	Ergebnisse	46
3.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse.....	51
4	Integration von E-Flotten aus betriebswirtschaftlicher Sicht unter Berücksichtigung von erneuerbaren Energien	53
4.1	Wirtschaftliche Bewertung eines elektrischen Fuhrparks anhand der Kapitalwertmethode.....	53

4.2	Energieversorgungskonzepte mit lokalen erneuerbaren Energien.....	57
4.2.1	Rechtlicher Rahmen bei der lokalen Bewirtschaftung von Elektrofahrzeugen	59
4.2.2	Einordnung der Anwendungsfälle in den rechtlichen und wirtschaftlichen Kontext einer Direktbelieferung mit Strom aus erneuerbaren Energien	67
4.3	Zusammenfassung.....	75
5	Bewertung der Kostensenkungspotentiale eines Lademanagements	77
5.1	Lademanagement zur Senkung der Gesamtstromkosten eines Betreibers	78
5.2	Methodik und Analysesoftware zur Ermittlung des Kostensenkungspotentials eines Lademanagements	80
5.3	Verbrauchsmodell zur Bestimmung des Energiebedarfs einer Fahrt	83
5.3.1	Ausgewählte Streckentypen.....	84
5.3.2	Translatorische Bewegungsenergie eines Fahrzeugs.....	87
5.3.3	Nebenverbraucher.....	90
5.3.4	Gesamtenergieverbrauch und resultierende Reichweite am Beispiel des e-Golf	91
5.3.5	Verifizierung und Bewertung des Verbrauchsmodells.....	92
5.4	Aufbereiten und Filtern der Nutzerdaten	93
5.5	Ermittlung des Ladeleistungsverlaufs der ungesteuerten und gesteuerten Ladung.....	96
5.6	Zusammenfassung und Bewertung.....	99
6	Anwendungsfall	103
6.1	Eingangsdaten und Parameter.....	105
6.2	Ergebnisse.....	107
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	113
	Abkürzungen und Formelzeichen.....	117
	Literaturverzeichnis	125

Anhang A: Energie- und Leistungsprofile	133
Anhang B: Abbildungen	157
Anhang C: Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	161

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit fossiler Energieträger und der klimapolitischen Ziele befindet sich der elektrische Energiesektor in einer Umstrukturierung, von der sowohl das Stromnetz und die Erzeuger als auch die Verbraucher betroffen sind. Deutschland senkt seine Abhängigkeit vom Import fossiler Ressourcen [2], um geopolitische und wirtschaftliche Unsicherheiten zu reduzieren und etabliert gleichzeitig eine nachhaltige Energieversorgung. In Bezug auf den Stromverbrauch wird der heutige Anteil an erneuerbaren Energien von über 36 % [3] in den nächsten Jahrzehnten stetig gesteigert, mit dem Ziel einer Versorgung von 80 % im Stromsektor in 2050 [1].

Im Hinblick auf die Verbraucher der verschiedenen Sektoren, werden diese technologisch und in ihrer Nutzungsweise angepasst, um den Anforderungen des zukünftigen Energiesystems zu entsprechen. Dies betrifft verschiedene Aspekte: Zusätzlich zur Effizienzsteigerung des Verbrauchers zur allgemeinen Reduktion des Energiebedarfs kann neben Power-to-Gas-Technologien eine Elektrifizierung sinnvoll sein, um den Zuwachs an Strom aus erneuerbaren Energien aufnehmen zu können. [4], [5], [6]

Ein weiterer Aspekt der Änderungen auf Verbraucherseite ist die Umsetzung eines zeitlich geplanten Einsatzes (Demand Side Management) und die Steuerbarkeit bei Verbrauchern aller Leistungsklassen, wie sie bei Großverbrauchern üblich ist. Dazu wurde bspw. der § 14a des Energiewirtschaftsgesetzes in 2011 eingeführt, der reduzierte Netzentgelte für steuerbare Verbrauchseinrichtungen in der Niederspannung behandelt. Durch die mittelfristige zeitliche Planung des Verbrauchs in Abhängigkeit des Energieangebotes und des Netzzustandes sowie durch eine kurzfristige Anpassung auf Erzeugungsschwankungen kann die dargebotsabhängige Energie effizienter aufgenommen werden, der Netzbetrieb gestützt und außerdem das steigende Speicher- und Reservevolumen minimiert werden [11], [13], [32]. Die Bedeutung des Speicher- und Reservevolumens für die zukünftige Energieversorgung zeigt sich in der Verabschiedung des Strommarktgesetzes in 2016, welches verschiedene Formen der Reserveerzeugung sowie Netzstabilitätsanlagen behandelt [31]. Der Verkehrssektor bietet dabei ein erhebliches Potential und umfasst alle Aspekte. Darüber hinaus kann das batterieelektrische Fahrzeug als direkter Stromspeicher fungieren.

Seit etwa einem Jahrzehnt wird die Elektrifizierung des Straßenverkehrs durch die Bundesregierung stetig vorangetrieben. Der *Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität* wurde mit dem Ziel die Wettbewerbsfähigkeit der Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen herzustellen im Jahr 2009 veröffentlicht. Dazu werden zahlreiche Projekte zu u.a. der Elektrifizierbarkeit aller Fahrzeugklassen, sowie ihrer Netz- und Marktintegration gefördert [22]. Nachdem die Forschungsthemen der Elektrifizierbarkeit und der Netzstützung des Pkw-

Bereichs anfänglich den Privatverkehr fokussierten, wird seit 2012 verstärkt der Wirtschaftsverkehr erforscht, da das Nutzerverhalten im gewerblichen Bereich, mit seinen üblicherweise regelmäßigeren und vorhersagbaren Nutzungsprofilen, eine höhere Kompatibilität mit den technischen Eigenschaften der Elektrofahrzeuge aufweist. [12], [40], [88] Die höhere Jahresfahrleistung von gewerblichen Pkw ermöglicht des Weiteren eine schnellere kilometerbezogene Amortisation. Dem Flottenbetrieb kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da im Verbundbetrieb mit konventionellen Fahrzeugen eine mögliche Reichweitenbeschränkung weitestgehend vermieden wird. Aber auch in Bezug auf netzdienliche Maßnahmen oder der Nutzung der Antriebsbatterien und Ladevorgänge als Flexibilität im Kundenetz verfügt eine gewerbliche Elektrofahrzeugflotte über ein höheres Potential als Privatfahrzeuge. Vorteilhaft sind dabei das höhere sichere Flexibilitätsvolumen an einem Standort sowie mögliche Kostenvorteile bei der Automatisierungstechnik zur Umsetzung der Steuerung.

Bisherige Analysen über die Auswirkungen einer vollständigen Elektrifizierung des Pkw-Bereichs auf Energiesystemebene erfolgten auf Basis von Energiebedarfen, die aus den Fahrleistungen resultieren. Dabei wurden diese mit einheitlichen Fahrzeugverbräuchen bestimmt, unabhängig von Fahrzeugtypen oder den witterungsbedingten Nebenverbrauchern. Untersuchungen zum Lastverhalten oder einer gezielten Versorgung von Elektrofahrzeugen mit erneuerbaren Energien werden verstärkt auf Nutzer- und Netzebene in Feldversuchen durchgeführt. So konnte bereits hinreichend die Wirksamkeit der Elektrofahrzeuge im Demand Side Management zur Netzstützung des Verteilnetzes oder zur Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien gezeigt werden [14], [15]. Aktuelle Feldversuche behandeln das bidirektionale Laden zur aktiven Nutzung des Batteriespeichers zur Rückspeisung elektrischer Energie. Die dafür notwendige Ladeinfrastruktur auf Fahrzeug- und Netzseite ist seit 2016 kommerziell verfügbar [77], [78]. Gezielte Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Elektrifizierung des gewerblichen Individualverkehrs finden ebenfalls im Wesentlichen lediglich auf Nutzerebene in Praxisbeispielen statt. Umfassende Analysen unter Berücksichtigung der Zeitpunkte der Leistungsbedarfe und der Interaktion mit dargebotsabhängigen Energien bei hohen Elektrifizierungsgraden liegen nicht vor.

In Bezug auf die Nutzung von Elektrofahrzeugen im Flottenbetrieb lag der Forschungsschwerpunkt auf der Untersuchung des Potentials zum Ersatz konventionell angetriebener Fahrzeuge. Mithilfe von Nutzerdaten lässt sich ein optimaler Elektrifizierungsgrad des Fuhrparks eines Flottenbetreibers bestimmen. Dabei steigern Anwendungen aus der Informations- und Kommunikationstechnik das Potential durch Unterstützung der Nutzers bei der Wahl einer stromsparenden Strecke oder bei der Planung der nächsten Ladung [16]. Die Analysen werden inzwischen als kommerzielle Dienstleistung angeboten, um Fuhrpark-betreiber bei der Elektrifizierung, unter Beachtung wirtschaftlicher Aspekte, zu beraten. Die Bedingungen für einen wirtschaftlichen Betrieb, im Vergleich zur

rein konventionellen Flotte, sind insbesondere aufgrund der noch vergleichsweise hohen Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen aktuell nur bedingt gegeben. Die Entscheidung für einen elektrischen Fuhrpark ist weiterhin maßgeblich durch den Innovationscharakter oder durch ein angestrebtes grünes Image motiviert. Eine umfassende Untersuchung der Integration einer elektrischen Flotte in das Energiemanagementsystem eines Unternehmens mit Nutzung der Flexibilitäten der Flotte stellt einen nächsten notwendigen Schritt dar, um Potentiale zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit zu identifizieren.

1.2 Forschungsziel und Aufbau der Arbeit

Das energietechnische Potential einer umfassenden Elektrifizierung des Straßenverkehrs wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst, welche schematisch in Abbildung 1-1 dargestellt sind.

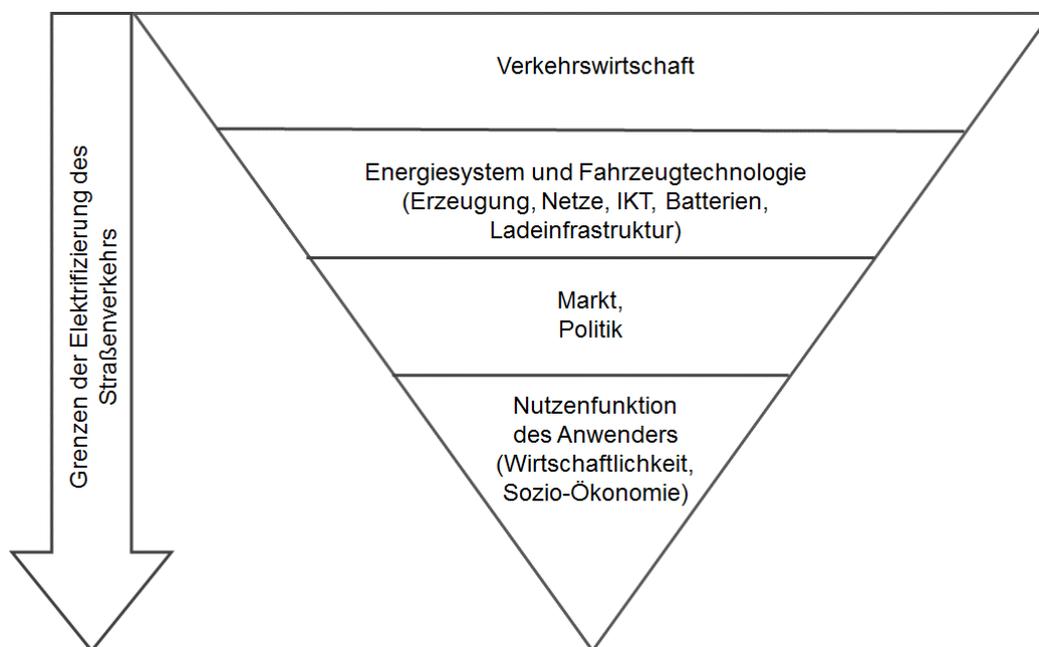


Abbildung 1-1: Aspekte des Elektrifizierungspotentials des gewerblichen Straßenverkehrs

Die Verkehrswirtschaft bildet mit den Bestandszahlen an Kfz und den Jahresfahrleistungen eine Obergrenze der resultierenden elektrischen Energiemengen bei einer vollständigen Elektrifizierung des Straßenverkehrs. Um dieses Potential zu heben, müssen Anforderungen des Straßenverkehrs erfüllt werden, die eine Substitution durch Elektrofahrzeuge erlauben. Das Elektrofahrzeug muss bspw. in der Lage sein, sowohl die erforderlichen Strecken zu fahren, als auch Güter zu transportieren. Der Erfüllungsgrad wird dabei durch technische Aspekte des Strom- und Fahrzeugsystems bestimmt, wie bspw. der Energieversorgung (Brennstoffzelle oder Batterie), der Batteriegröße bei batterieelektrischen Fahrzeugen und der Höhe der Ladeleistung sowie durch das Angebot und die Nutzbarkeit von Ladeinfrastruktur. Das Vorhandensein und die Umsetzung der erforderlichen technischen

Komponenten werden wesentlich durch den Markt und die Gesetzgebung beeinflusst. Der Markt wird Komponenten oder auch notwendige Dienstleistungen nur bereitstellen, sofern die Bedingungen für eine wirtschaftliche Vermarktung gegeben sind. Einfluss auf eine wirtschaftliche Vermarktung hat die Politik in Form von Förderungen der Forschung (Analysen, technische Entwicklungen, etc.) und durch Substitutionen, sowie durch Gesetzgebung (bspw. Vorgaben zu Flottenemissionen der Automobilhersteller). Zuletzt beeinflusst die Nutzenfunktion des Kunden seine Entscheidung bzgl. des Kaufs von E-Fahrzeugen. Die Nutzenfunktion wird maßgeblich aus wirtschaftlichen und sozio-ökonomischen Aspekten abgeleitet.

Die Arbeit ist in zwei Hauptthemen unterteilt, in denen das Elektrifizierungspotential unter Berücksichtigung von erneuerbaren Energien von der Seite der Verkehrswirtschaft und der Seite des Kunden untersucht wird. Das erste Thema wird in Kapitel 2 und Kapitel 3 behandelt und beleuchtet die Systemebene der Vollelektrifizierung der Pkw und leichten Nutzfahrzeugen (LNfzg) im gewerblichen Straßenverkehr mit dem Fokus der Integration von dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien. Durch die Ermittlung des Energie- und Leistungsbedarfs des gewerblichen Straßenverkehrs kann die Bedeutung für die Energiewirtschaft und die erneuerbaren Energien quantitativ beschrieben werden. Die Kapitel 4 bis Kapitel 6 behandeln das zweite Thema und beschäftigen sich mit der wirtschaftlichen Seite der Betreiberebene. Es werden Untersuchungen zur aktuellen Elektrifizierbarkeit eines Fuhrparks durchgeführt sowie Betrachtungen zur wirtschaftlichen Bewertung des Flottenbetriebs angestellt. Hierbei liegt der Fokus auf einer lokalen Versorgung mit erneuerbaren Energien und dem nutzbringendem Einsatz von Lademanagement. Die übergeordneten Forschungsfragen jedes Kapitels der Arbeit sind in Abbildung 1-2 zusammengefasst.

In Kapitel 2 werden zunächst die Eckdaten des konventionellen Verkehrssektors und insbesondere der beiden betrachteten Fahrzeugtypen der Pkw und LNfzg aufgestellt. Dies umfasst die Anteile am Gesamtenergiebedarf Deutschlands, sowie die Bestandszahlen der Fahrzeuge und ihre Jahresfahrleistungen. Danach werden Aspekte bei der Elektrifizierung dieser Fahrzeugtypen diskutiert, die eine Katalysatorfunktion für den Markthochlauf der Elektromobilität innehaben. Mit den Daten der Verkehrsstudie Kraftfahrzeuge in Deutschland (KID), die zuletzt im Jahr 2010 durchgeführt wurde und das Nutzungsverhalten der beiden Fahrzeuggruppen beschreibt, werden aus dem stochastischen Verhalten elektrische Energie- und Leistungsprofile abgeleitet, ähnlich den Standardlastprofilen der Energiewirtschaft. Diese werden nach Wochentagstypen und Jahreszeiten differenziert. Bei den Energieprofilen wird der frühestmögliche Zeitpunkt der Energieaufnahme betrachtet, so dass der Energiebedarf unmittelbar nach Fahrtende entsteht. Für die Erstellung der Leistungsprofile werden die Ladeleistungen so ausgelegt, dass die gesamte Standzeit der Fahrzeuge für die Ladung genutzt wird, um Minimalwerte der Ladeleistungen zu erhalten.

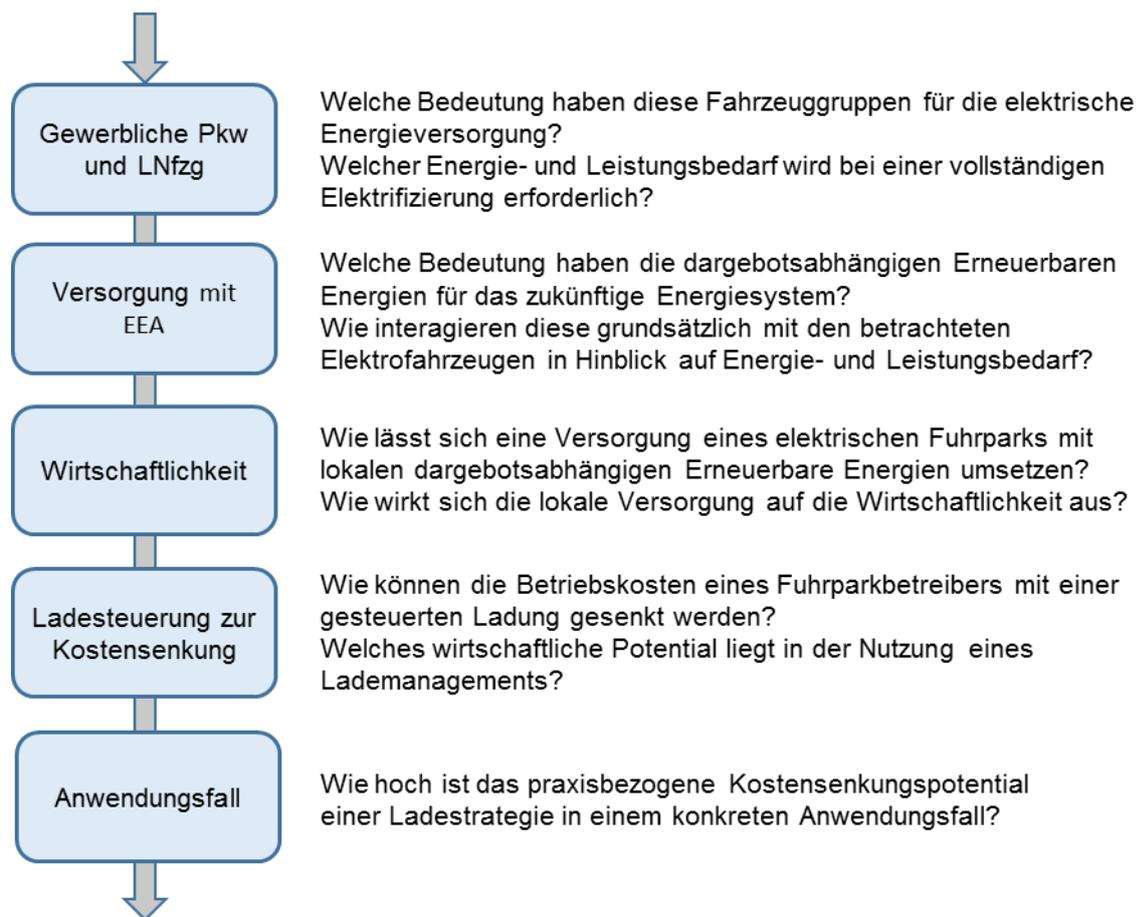


Abbildung 1-2: Struktur und wissenschaftliche Fragestellungen der Arbeit

Mithilfe der Energie- und Lastprofile werden in Kapitel 3 die Interdependenzen mit den dargebotsabhängigen erneuerbaren Erzeugern analysiert. Der Fokus liegt auf der allgemeinen Kompatibilität des Bedarfs und der Erzeugung, es werden keine Netzrestriktionen berücksichtigt. Zunächst wird die Erzeugung von Photovoltaik und Wind energetisch eingeordnet. Es erfolgt eine Beschreibung des Anteils an der Bruttostromerzeugung, der installierten Leistung sowie der Einspeisecharakteristik, zudem wird ein Ausblick auf die zukünftige Entwicklung gegeben. Anschließend werden Kennwerte definiert mit denen die Systemeigenschaften eines energieautarken Systems aus dargebotsabhängiger Erzeugung und elektrischem Verbraucher beschrieben werden können. Anhand dieser Kennwerte wird abschließend das System aus elektrifizierten gewerblichen Pkw und LNfzg und einer dargebotsabhängigen Erzeugung beschrieben.

In Kapitel 4 wird der wirtschaftliche Kontext der Elektrifizierung eines Fuhrparks bei lokaler Erzeugung mit erneuerbaren Energien – in dieser Arbeit im Zusammenhang mit einer Photovoltaikanlage – erarbeitet. Zunächst wird gezeigt, wie eine Gegenüberstellung mit dem konventionellen Fuhrpark anhand der dynamischen Investitionsrechnung erfolgen kann. Die relevanten Kostenpositionen werden erläutert. Der Strompreis wird differenziert betrachtet, da der Bezug vom lokalen Erzeuger zu vom Stromlieferanten abweichenden Strompreisen

führt. Die unterschiedlichen Möglichkeiten der lokalen Direktbelieferung werden aus energierechtlicher Sicht beschrieben, um die Bestimmung des lokalen Strompreises zu ermöglichen. Untersuchte Aspekte, die den resultierenden Preis beeinflussen, sind das Inbetriebnahmejahr der Erzeugungsanlage und damit die politischen Fördermechanismen, die Nutzung des öffentlichen Stromnetzes sowie der Eigentümerstatus der Anlage.

Kapitel 5 behandelt den wirtschaftlichen Nutzen einer Ladesteuerung. Dafür wird in dieser Arbeit eine Software-Anwendung entwickelt, die das anwendungsfallsspezifische Kostensenkungspotential bei den Stromkosten durch Einsatz eines Lastmanagements ermittelt. Zunächst werden die Wirkungsmechanismen der ausgewählten Ladestrategie beschrieben, welche die Berücksichtigung von HT/NT-Tarifen, der Eigenerzeugung sowie die Begrenzung der Netzbezugsleistung zur Reduzierung der Stromkosten fokussieren. Danach wird die Methodik zur Ermittlung des Kostensenkungspotentials dargestellt, bei welcher der elektrische Fuhrpark als Verursacher aller Zusatzkosten des Betreibers fungiert. Letztere dienen als Bezugsgröße für die Kostensenkung.

Anschließend erfolgt die Beschreibung der Modelle und Freiheitsgrade der Software-Anwendung. Mit dieser werden, neben der Kostengegenüberstellung beim ungesteuerten und gesteuerten Laden, die für die Kostengegenüberstellung notwendigen Leistungsverläufe generiert. Eine wesentliche Komponente ist das differenzierte Verbrauchsmodell, welches es erlaubt den Energie- und Leistungsbedarf bei einer Elektrifizierung von Kleinstwagen bis zu LNfzg auf Grundlage von Nutzerdaten von konventionellen Fahrzeugen zu ermitteln. Hierbei werden verschiedene Streckentypen und die Witterung berücksichtigt, welche sich auf die Energiebedarfe der Elektrofahrzeuge auswirken. Nicht elektrifizierbare Fahrzeuge bzw. Fahrten werden durch die Begrenzung von Ladeleistungen und Batteriegrößen identifiziert und gefiltert. Das gesteuerte Laden wird durch das Lösen eines Optimierungsproblems zur Reduzierung der Stromkosten umgesetzt.

In Kapitel 6 wird die Software-Anwendung zur Analyse eines Fallbeispiels genutzt. Es wird ein Betreiber mit einem elektrischen Fuhrpark aus acht Fahrzeugen, die am eigenen Standort geladen werden, und einer Eigenversorgung mit einer PV-Anlage betrachtet. Die Auswirkungen von unterschiedlichen Ladeleistungen bei zwei verschiedenen PV-Anlagengrößen werden untersucht.

Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit in Kapitel 7 zusammengefasst und es wird ein Ausblick für weiterführende Forschungsfragen gegeben.

2 Elektrifizierung von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen gewerblicher Halter in Deutschland

Das Energiekonzept der Bundesregierung sieht im Einklang mit der EU-Richtlinie 2009/28/EG bis 2020 einen Anteil von mindestens 10 % erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch im Verkehrsbereich vor (ca. 73 TWh), in 2017 lag dieser bei etwa 5,2 %. Die Nutzung erfolgte überwiegend als Beimischung zu Diesel- und Benzinkraftstoffen, etwa 9 % wurden durch elektrische erneuerbare Energie gedeckt. [10], [52], [53], [54].

Die Elektrifizierung des Verkehrssektors ist ein fester Bestandteil des Energiekonzeptes. Bis 2020 plant die Bundesregierung eine Anzahl von einer Million elektrischer Kraftfahrzeuge zu erreichen, bis 2030 sind es 6 Mio. [24], [29]

Zusätzlich ist im *Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz* vom September 2010 bis 2020 eine Reduzierung des Primärenergiebedarfs um 20 % gegenüber 2008 vorgesehen [67]. Der Rückgang lag 2017 bei 6 % [68]. Durch die Steigerung der Energieeffizienz bei der angestrebten Sektorkopplung¹ wird ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung dieser Ziele gesehen [10]. Diesbezüglich birgt eine Elektrifizierung des Straßenverkehrs, der etwa 81 % des Primärenergiebedarfs des Verkehrsbereichs verursacht (vgl. Kapitel 2.1), im Rahmen der heutigen technischen Möglichkeiten ein wesentliches Potential zur Erreichung der energiepolitischen Ziele und Entwicklungspfade.

Das vorliegende Kapitel dieser Arbeit behandelt die Elektrifizierung des gewerblichen Pkw- und LNfz (Leichtes Nutzfahrzeug)- Bereichs, um ihre energiepolitischen und energiewirtschaftlichen Potentiale einordnen zu können.

Es erfolgt zunächst eine Betrachtung der Energiemengen, die durch den Verkehrssektor verursacht werden, mit dem Fokus auf den Straßenverkehr. Anschließend wird die bedeutende Rolle der gewerblich gehaltenen Pkw und LNfz für die Einführungsphase und den Markthochlauf der Elektromobilität herausgestellt. Zuletzt wird das Verkehrsverhalten dieser beiden Fahrzeuggruppen untersucht, um die resultierenden elektrischen Energie- und Leistungsprofile für die Anwendung auf Systemebene zu bestimmen und eine Voll-elektrifizierung darzustellen. Die Eingangsdaten für die Analysen werden der Studie *Kraftfahrzeuge in Deutschland* (KID) entnommen. Mit den Ergebnissen werden anschließend in Kapitel 3 die Interdependenzen zu dargebotsabhängigen Energien untersucht.

¹ Sektorkopplung meint hier: Erhöhung des elektrischen Anteils an der Endenergie in Deutschland.

2.1 Verkehrssektor in Deutschland – Eckdaten

Der Gesamtendenergieverbrauch in Deutschland lag 2013 bei etwa 2.400 TWh und wie in Abbildung 2-1 dargestellt, bei etwa 730 TWh bzw. 28 % im Verkehrsbereich, wodurch dieser eine Hauptverbrauchergruppe darstellt. Bezogen auf den Primärenergiebedarf liegt der Anteil bei etwa 24 % [8], [9].

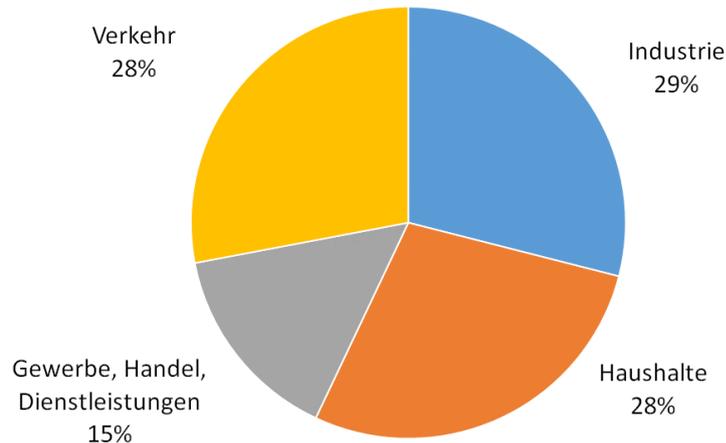


Abbildung 2-1: Endenergieverbrauch in 2013 nach Sektoren (Quelle: Eigene Darstellung nach [7])

Innerhalb des Verkehrssektors verursacht der Straßenverkehr mit mehr als 80 % den größten Anteil am Primärenergiebedarf, nach Abbildung 2-2 sind 57 % dem Personenstraßenverkehr zuzuordnen.

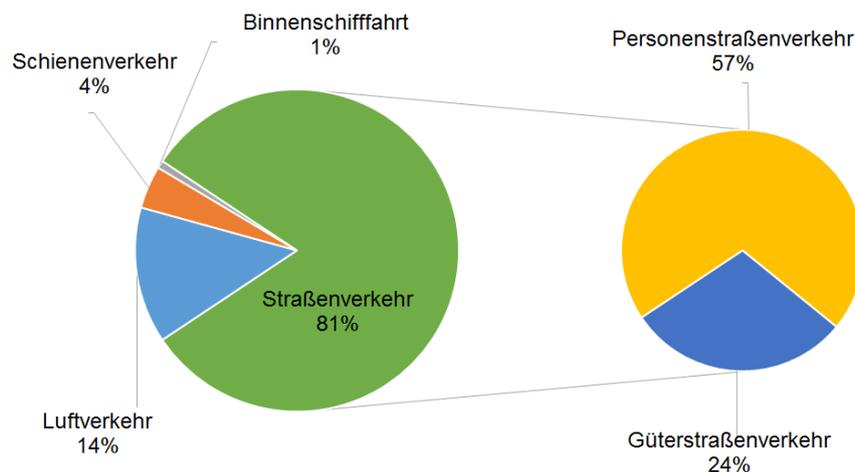


Abbildung 2-2: Primärenergieverbrauch nach Verkehrsträgern in 2013 (Quelle: Eigene Darstellung nach [7])

Die Energiemengen im Straßenverkehr in Abbildung 2-2 unterteilen sich in Abhängigkeit des Transportzwecks (Personen- und Gütertransport) und sind nicht fahrzeugtypbezogen. Um fahrzeugtypbezogene Energiemengen zu bestimmen, und so die Einordnung der

Tabelle 2-1: Fahrleistungen 2010 der verschiedenen Fahrzeugarten gegliedert nach Wirtschafts- und Privatverkehr (eigene Darstellung nach [19])

Fahrzeugart	Mittl. Bestand 2010 [in 1.000 Kfz]	Fahrzeugfahrleistung d_{Fzgj} 2010					
		Privatverkehr		Wirtschaftsverkehr		Insgesamt	
		[in Mio. Fzkm]	in %	[in Mio. Fzkm]	in %	[in Mio. Fzkm]	in %
Krafträder							
- gewerbbl. Halter	74	108	0,0	68	0,0	176	0,0
- priv. Halter	3.666	15.299	3,6	150	0,1	15.450	2,6
Pkw							
- gewerbbl. Halter	4.024	30.177	88,1	54.218	33,5	84.395	14,3
- priv. Halter	37.733	377.166	7,1	45.572	28,1	422.737	71,6
LNfzgw < 3,5 t Nutzlast-							
- gewerbbl. Halter	1.366	1.723	0,4	20.645	12,7	22.366	3,8
- priv. Halter	742	2.415	0,6	7.205	4,4	9.620	1,6
Lkw > 3,5 t Nutzlast	292	131	0,0	11.789	7,3	11.920	2,0
Sattelzugmaschinen	180	86	0,0	17.417	10,8	17.503	3,0
Sonst. Fahrzeuge	2.136	934	0,2	4.909	3,0	5.841	1,0
Gesamt	50.218	428.040	100,0	161.971	100,0	590.011	100,0

gewerblichen Pkw und LNfzg hinsichtlich ihres Beitrages zur Zielerreichung zu ermöglichen, wird hier eine Hilfsrechnung nach Gl. (1) durchgeführt.

$$a_{E,prim,j} = c_{Straßenverkehr} \cdot ((d_{Fzg,j} \cdot k_j) / (\sum_{j=1}^J d_{Fzg,j} \cdot k_j)) \quad (1)$$

Die fahrzeugtypabhängigen Primärenergien $a_{E,primär,j}$ werden mithilfe der Fahrzeugfahrleistung $d_{Fzg,j}$ aus Tabelle 2-1 und relativen Verbrauchskennzahlen k_j abgeschätzt. Die relativen Verbrauchskennzahlen k_j sind eine fiktive und dimensionslose Größe, und beschreiben das Verhältnis der durchschnittlichen Energieverbräuche der unterschiedlichen Fahrzeugtypen zueinander. Der Ausdruck in den äußeren Klammern beschreibt das Verhältnis der Primärenergie eines Fahrzeugtyps bezogen auf die Primärenergie des gesamten Straßenverkehrs ($a_{E,prim,j,Straße}$).

Mit dem Anteil des Straßenverkehrs $c_{Straßenverkehr}$ am Primärenergiebedarf des Verkehrssektors, lässt sich so der Anteil der Primärenergie $a_{E,primär,j}$ der Fahrzeugtypen an der Primärenergie des Verkehrssektors nach Gl. (1) abschätzen. Dieser ist in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Schätzung der Anteile am Primärenergiebedarf des Straßenverkehrs nach Fahrzeugtypen

Fahrzeugtyp J	$d_{Fzg,j}$ [%]	k_j^2	$d_{Fzg,j} \cdot k_j$	$\sum_1^J d_{Fzg,j} \cdot k_j$	$a_{E,prim,j,Straße}$
Kräder	2,6	3	7,8	765,8	1,02
Pkw	85,9	6	515,4	765,8	67,30
LNfzg	5,2	13	67,6	765,8	8,83
Lkw > 3,5t	2,0	25	50,0	765,8	6,53
Sattelzug	3,0	35	105,0	765,8	13,71
Sonstige	1,0	20	20,0	765,8	2,60
Gesamt	100	-	765,8	-	100

Es ergibt sich, dass der allein durch Pkw verursachte Verkehr (86 % der Jahresfahrleistung aller Straßenfahrzeuge) im Bereich von zwei Dritteln der benötigten Primärenergie für den gesamten Straßenverkehr liegt (67,3 %). Davon werden ca. 17 % von gewerblich gehaltenen Pkw verursacht, was etwa 80 TWh bzw. 287 Mrd. MJ an Primärenergie entspricht. Bei den gewerblich gehaltenen LNfzg sind es ca. 44 TWh bzw. 160 Mrd. MJ. Unter der Annahme,

² Annahme der Autorin

dass die gleichen Anteile bei der Endenergie vorliegen³, verbrauchen gewerblich gehaltene Pkw ca. 66,5 TWh Endenergie und LNfzg etwa 37 TWh.

Wie in Abbildung 2-3 dargestellt, ist der Verkehrssektor aus elektrischer Sicht noch kaum erschlossen. Es werden weniger als 2 % der benötigten Endenergie durch Strom gedeckt und diese sind maßgeblich vom Schienenverkehr verursacht [1], [8]. Damit bergen die betrachteten Nutzergruppen ein Potential zur Sektorkopplung von etwa 15 % des Gesamtendenergiebedarfs des Verkehrssektors in 2014. In Bezug auf die Primärenergie liegt der Anteil bei etwa 3,2 %.

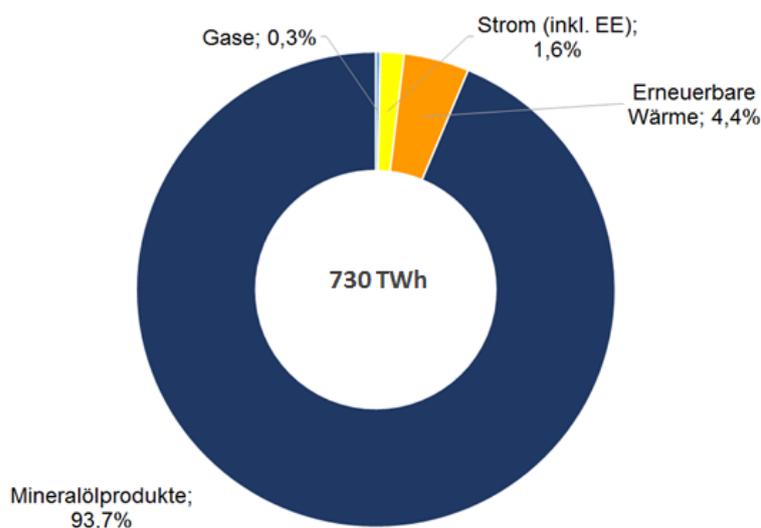


Abbildung 2-3: Endenergieverbrauch im Verkehr nach Energieträgern (eigene Darstellung nach [8])

In Bezug auf die Ziele der Bundesregierung birgt die vollständige Elektrifizierung von gewerblich gehaltenen Pkw und LNfzg, unter Nutzung von erneuerbaren Energien, das Potential, die kurzfristigen energiepolitischen Ziele bis 2020 zu erreichen. Zudem kann die Katalysatorfunktion, die der gewerbliche Bereich innehat, die Elektrifizierung im privaten Bereich beschleunigen, wie im nachfolgendem Kapitel 2.2 erläutert.

Entwicklung des Straßenverkehrs – Ausblick für Pkw

Der Gesamt-Endenergiebedarf von Pkw sinkt nach [25] im Personenverkehr stetig seit 2011 und wird in 2030 weniger als 1.000 PJ (~277.778 GWh) betragen, was maßgeblich mit der Effizienzsteigerung einhergeht und einen Rückgang von fast 30 % in Bezug auf 2011 bedeutet. Die Verkehrsleistungen des individuellen Personenverkehrs wachsen leicht an bis 2020 und bleiben bis 2030 stabil [94]. Die aktuellen Bestandszahlen von Pkw in Höhe von

³ Hierbei wird derselbe Primärenergiefaktor für alle Energieträger unterstellt ($f_{p_{Benzin}} = 1,2$ [66]).

etwa 46,5 Mio. [95] in 2017, werden nach [96] bis etwa 2020 steigen und danach auf ein Niveau von etwa 45 Mio. Pkw sinken.

2.2 Gewerblich gehaltene Fahrzeuge als Katalysator für die Elektromobilität

Die Elektromobilität ist aus Marktsicht eine neue Technologie und befindet sich in der Marktintegrationsphase, wie die Bestandszahlen an Elektrofahrzeugen (EF) verdeutlichen: In 2017 belief sich der Bestand an vollelektrischen Fahrzeugen und elektrischen Hybriden auf ca. 55.000 Fahrzeuge [14]. Für einen erfolgreichen Markthochlauf muss die Marktfähigkeit gegeben sein. Um diese voranzutreiben ist es sinnvoll, geeignete Segmente und Anwendungsfälle im Individualverkehr zu identifizieren, in denen eine Elektrifizierung im Vergleich zur Nutzung konventioneller Technik Vorteile generieren kann.

Ein hoher Anteil von Studien zum Thema Elektromobilität hat sich zunächst verstärkt mit dem privaten Verkehr beschäftigt. Über 80 % der in Deutschland gemeldeten Fahrzeuge werden privat gehalten⁴ und bieten aufgrund der höheren Grundgesamtheit das zahlenmäßig größere Potential für eine Elektrifizierung. Jedoch verfügen die gewerblich gehaltenen Fahrzeuge, insbesondere Flottenfahrzeuge, aufgrund der nachfolgend erläuterten Aspekte eine Eignung die Markthochlauf-Phase im besonderen Maße zu stützen und begründen damit den Fokus der Arbeit.

Neuzulassungen:

Der Anteil gewerblich zugelassener Pkw ist im Vergleich zum Anteil privat zugelassener Pkw zwar bestandsmäßig gering (10 %), bei den Neuzulassungen beträgt er jedoch rund 60 %, was ca. 1,2 Mio. Pkw pro Jahr ausmacht [63]. Eine verstärkte Förderung von gewerblich gehaltenen Pkw kann die Marktintegration beschleunigen. Bereits in 2011 wurden 90 % aller Elektrofahrzeuge im gewerblichen Bereich zugelassen. [46], [21]

Wirtschaftlichkeit – km-abhängige Kosten:

Aufgrund der höheren Fahrleistungen von gewerblich gehaltenen Fahrzeugen können sich die geringeren km-abhängigen Betriebskosten von Elektrofahrzeugen positiv auf ihre Wirtschaftlichkeit auswirken. Die durchschnittliche Jahresfahrleistung gewerblich gemeldeter Pkw liegt bei 20.973 km und ist damit fast doppelt so hoch wie die von privat gemeldeten Pkw mit 11.204 km [19]. Bei LNfzg⁵ sind es 16.375 km gewerblich bzw. 12.965 km privat.

⁴ In 2010: ca. 8 Mio gewerblich gehaltene Fahrzeuge von insgesamt ca. 50,2 Mio. gemeldeten Fahrzeugen (Jahresdurchschnitt 2010 nach KID 2010)

⁵ Eigene Auswertungen (ausgewertet mit Auswertungstool „KiD 2010 in Tabellen“ (KiT2010))

Im gemanagten Fuhrparkbetrieb erfolgt eine Kostenoptimierung neben der Reduzierung der Treibstoffkosten u.a. auch durch die Reduktion der Fahrzeug-Überbestände, um Anschaffungskosten zu minimieren, wodurch die gleiche Fahrleistung mit weniger Fahrzeugen umgesetzt wird, so dass sich die durchschnittliche Fahrleistung im Schnitt sogar noch erhöht. [51], [64]

Hohe elektrifizierbare Tagesfahrleistung:

Bei einer Elektrifizierung ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der technischen Restriktionen (Batteriekapazität und Ladeleistungen) Tagesfahrleistungen bzw. Distanzen einzelner Fahrten Grenzwerte nicht überschreiten, die aktuell als ungeeignet angesehen werden. Abbildung 2-4 zeigt die Verteilung der Tagesdistanzen von Pkw und LNfzg für die Grundgesamtheit⁶ der Fahrzeugtage für die Wochentagstypen von Montag bis Freitag. Lediglich an 13 % aller Fahrzeugtage sind die Tagesstrecken > 150 km und damit in den Grenzbereichen der Reichweite. Es ist ersichtlich, dass die Mehrheit der täglichen Distanzen kleiner als 150 km ist und damit durchaus im Betriebsbereich von Elektrofahrzeugen liegt. Werden die Fahrzeugtage herausgerechnet, an denen die Fahrzeuge nicht genutzt wurden, lässt sich eine erste Schätzung zum elektrifizierbaren Anteil der tatsächlichen Fahrleistung treffen. Der Anteil mit Tagesstrecken kleiner 100 km bzw. 150 km liegt bei 70 % bzw. 80 % und stellt (je nach Reichweite der Fahrzeuge) den elektrifizierbaren Anteil ohne Zwischenladung dar. Mit Zwischenladungen kann die elektrifizierbare Fahrleistung noch weiter erhöht werden können⁷.

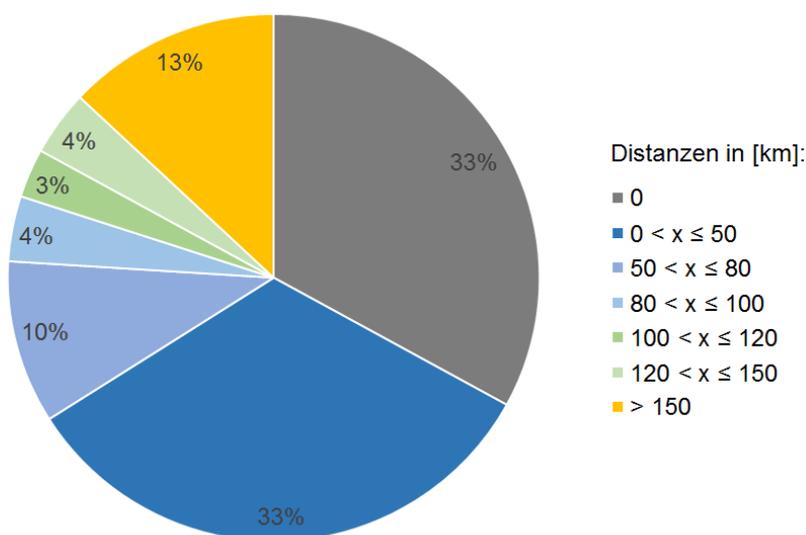


Abbildung 2-4: Verteilung der Tagesstrecken von gewerblich gemeldeten Pkw und LNfzg über Gesamtfahrzeugtage (eigene Auswertung von [19])

⁶ Die zugehörige Grundgesamtheit der Fahrzeugtage liegt bei ca. 1,36 Mrd. bei Betrachtung von insgesamt ca. 5.4 Mio. Kfz und umfasst ausschließlich die Tage, an den die Fahrzeuge gemeldet waren (KiT).

⁷ Vgl. weitere Ausführungen zum Verkehrsverhalten in Kapitel 2.3.

Reduktion der Reichweitenangst:

Reichweitenangst kann im Fahrzeugpool einer Flotte unter Umständen vollständig vermieden werden, da die zu fahrenden Strecken häufig sehr gut prognostizierbar sind. Bei längeren Fahrten oder bei Unsicherheit können konventionelle Fahrzeuge oder Hybride, die im optimierten Pool ausreichend vorhanden sind, eingesetzt werden oder in multimodalen Konzepten öffentliche Alternativen genutzt werden. Durch diese Ausweichmöglichkeit kann die Akzeptanz wesentlich gesteigert werden. Im Poolbetrieb befindet sich am Betriebshof bzw. Fuhrpark-Standort meist außerdem ein gesicherter Zugang zur Ladeinfrastruktur [27], [42].

Umweltfreundliches und innovatives Image:

Elektrofahrzeuge werden häufig mit Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit verbunden [34], [65], [88]. Die Nutzung von Elektrofahrzeugen in einer gewerblichen Flotte verspricht eine Außenwirkung, die das Image des Betreibers als umweltfreundlicher und nachhaltiger Akteur hervorhebt, wodurch Kundengruppen angesprochen und zu einer Kaufentscheidung angeregt werden können. Bei Bewirtschaftung der gewerblichen Flotte mit erneuerbaren Energien kann dieses Image noch weiter verstärkt werden. Zudem wird Innovativität signalisiert, welche als Erfolgsfaktor für viele Unternehmen eine wesentliche Rolle spielt.

Reduktion der Vorbehalte einer neuen Technologie im Geschäftsumfeld:

Die potentielle Erstnutzer der Elektromobilität, die sog. *Innovatoren* und frühen *Early Adopter* haben nach [45] und [46] die folgenden Attribute:

- Männer mittleren Alters
- Höhere Bildung und höheres Einkommen, technischer Beruf
- Hohe Technikaffinität und robust in ihrer Entscheidung („Experte“)
- Umweltorientiert
- Individualisten
- Anschaffungspreis spielt eine untergeordnete Rolle bzw. Bereitschaft einen höheren Anschaffungspreis zu bezahlen ist gegeben

Diese beiden Gruppen umfassen allerdings nur ca. 1,5 % der Neu-Pkw-Käufer. Die *Early-Majority*, bestehend aus weiteren *Early Adopter*, weisen ähnliche Attribute auf, wie die frühen *Early Adopter*, entsprechen jedoch mehr dem Bevölkerungsdurchschnitt. Sie haben mehr Vorbehalte und entscheiden sich erst zum Kauf einer neuen Technologie, wenn die ersten Hürden überwunden sind. Bspw. würden Frauen mit höherem Umweltbewusstsein den Kauf erst tätigen, sobald erste technische Mängel ausgeschlossen werden können. [46]

Die *Early Majority* Gruppen würden im Geschäftsumfeld ihre (technischen) Vorbehalte schneller verlieren, so dass sie anschließend früher eine Multiplikatorfunktion einnehmen

[34]. In [27] wird diesbezüglich „eine positive Grundstimmung zur Nutzung des Elektrofahrzeugs als Dienstwagen“ beschrieben. Durch die verstärkte Sichtbarkeit und das schrittweise Heranführen an die neue Technologie im Geschäftsumfeld, könnte ein elektrifizierter Fahrzeugpool als Katalysator für die Elektromobilität fungieren.

Gebrauchtwagenmarkt:

Obwohl es in Deutschland nur ca. 4 Mio. gewerblich zugelassene Pkw gibt, beeinflussen diese maßgeblich die Zusammensetzung der restlichen ca. 38 Mio. privat gehaltenen. Dies liegt daran, dass die gewerblichen Fahrzeuge nach wenigen Jahren in den privaten Fahrzeugbestand übergehen. [44] Der Gebrauchtwagenmarkt fungiert dadurch als Schleuse für die Elektromobilität. Im Geschäftsumfeld werden häufiger repräsentative und dadurch meist verbrauchsstärkere Fahrzeuge angeschafft, so dass der Durchschnittsverbrauch tendenziell gestiegen ist. Dieser Entwicklung könnte durch Wahl von kleineren und umweltfreundlicheren Fahrzeugen entgegengewirkt werden. Geeignete Förderinstrumente, die die Anschaffung von Elektrofahrzeugen im gewerblichen Umfeld unterstützen, wirken sich damit auf sekundärer Ebene auf den privaten Kraftfahrzeugmarkt aus.

2.3 Verkehrs- und energiewirtschaftliches Verhalten gewerblich gehaltener Pkw und leichter Nutzfahrzeuge

In diesem Kapitel werden das Verkehrsverhalten und das daraus resultierende energiewirtschaftliche Verhalten der Fahrzeuggruppe der gewerblich gehaltenen Pkw und LNfzg näher untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse sind durchschnittliche Tages- und Fahrdistanzen, Energiebedarfe, Energie- und Leistungsprofile für die Systemebene sowie die Verteilung der resultierenden Ladeleistungen. Mit den Energie- und Leistungsprofilen werden im Kapitel 3 Untersuchungen zu Interdependenzen mit erneuerbaren Energien ermöglicht, welche für die mittel- und langfristige Gestaltung der Energieversorgung relevant sind. Die Untersuchungen basieren auf der Studie *Kraftfahrzeuge im Deutschland 2010* (KID 2010).

Zunächst erfolgt die Vorstellung der Studie KID 2010, insbesondere des Erhebungsverlaufs und des Datenumfangs. Anschließend werden die Methodik und die Annahmen der Analysen sowie die entwickelten Szenarien erläutert.

2.3.1 KID 2010

Zur Beschreibung der Auswirkungen einer Elektrifizierung des Wirtschaftsverkehrs und für weitere Untersuchungen wird als Datengrundlage die Studie KID 2010 herangezogen, welche im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zuletzt in 2010 durchgeführt wurde. Das Ziel der Studie ist es den Wirtschaftsverkehr von in

Deutschland gemeldeten Fahrzeugen zu beschreiben und eine Datengrundlage für differenzierte Analysen für Forschungs- und Informationszwecke unterschiedlicher Fachdisziplinen und Branchen bereitstellen zu können. Die KID beruht auf der Befragung (Fragebogen) von Fahrzeughaltern aller Fahrzeugkategorien mit dem Fokus auf Pkw und LNfzg bis zu einer Nutzlast von 3,5 t. Über 90 % der ausgewählten Stichprobenfahrzeuge sind dieser Fahrzeugkategorie zuzuordnen. Zum Stichprobenumfang gehören neben den gewerblich auch privat gehaltene Fahrzeuge, da mit diesen auch gewerbliche Fahrten durchgeführt werden können (z.B. Dienstreisen). Ihr Anteil beträgt in den beiden betrachteten Fahrzeugkategorien etwa 25 %. Dieser Anteil an gewerblichen Fahrten fließt nicht in die Untersuchungen ein. Pro Stichprobenfahrzeug wird das Nutzungsverhalten von je einem Stichtag erfasst.

Verfügbare Kennzahlen und Daten

Die abgefragten Merkmale des Fragenkatalogs wurden in der KID in unterschiedliche Datengruppen unterteilt. Diese beziehen sich auf das Kfz und den Halter (Fahrzeug-Datei), auf die Fahrt (Fahrten-Datei), auf die Fahrtenkette (Fahrtenketten-Datei) und zuletzt auf geographische Daten (Geodatensatz). Fahrtenketten sind dabei definiert als Zusammenfassung von mehreren Einzelfahrten, mit der gleichen Nutzungsart, welche in gewerblich und privat unterteilt sind und anhand des Nutzungszwecks kategorisiert werden. Eine Fahrt wird dabei als Ortsveränderung des Fahrzeugs zwischen Quelle und Ziel verstanden. Die Fahrzeug-Datei enthält u.a. den Fahrzeugtyp (Krafträder bis Sattelzüge), den Befragungsstichtag, die zul. Nutzlast, den Wirtschaftszweig, usw. Die Fahrten- und Fahrtenketten-Datei enthalten keine fahrzeugspezifischen Daten, sondern Informationen zum Verkehrsverhalten, wie Ankunfts- und Abfahrtzeiten, die zugehörigen PLZ-Gebiete, bspw. die Fahrzeugbesetzung, usw. Da die Fahrzeug-Datei auch Fahrzeuge enthält, die am Stichtag immobil gewesen sind, ist die Anzahl der Fahrzeuge im Fahrzeug-Datensatz größer, als die Anzahl der Fahrzeuge im Fahrten und Fahrtenketten-Datensatz, da die immobilen Fahrzeuge in letzteren nicht auftauchen. Die 70.249 erfassten Stichprobenfahrzeuge umfassen 117.377 Fahrten und 44.393 Fahrtenketten. Wie in Abbildung 2-5 dargestellt, lassen sich die Datensätze über die Fahrzeug-ID verknüpfen, wie beispielsweise bei dem Fahrzeug mit der ID 1387223. Am betrachteten Stichtag wurden damit fünf Fahrten durchgeführt (1a), die zu zwei Fahrtenketten zugeordnet werden können (1b). Das Fahrzeug mit der ID 1387224 hat am Befragungsstichtag keine Fahrten durchgeführt und ist damit in der Fahrten-Datei nicht gelistet.

Erhebungsverlauf

Die Befragung erfolgte in acht Erhebungswellen im Zeitraum von 12 Monaten (November 2009 – Oktober 2010). Jede Erhebungswelle besteht aus einer Hauptbefragung und einer Befragung im Zusammenhang mit einer zeitversetzten Erinnerungsaktion. Ausgewählte

Teilnehmer, die an ihrem zugeordneten Stichtag der Hauptbefragung nicht teilgenommen haben, können ihre Teilnahme dadurch nachholen. Damit werden ungültige Stichproben reduziert und der gültige Stichprobenumfang erhöht. Aufgrund der Erinnerungsaktion liegen Daten aus jedem Monat im Erfassungszeitraum vor. Die Erhebungswellen und ihre Erinnerungsaktionen dauern jeweils eine Woche, um alle Wochentage zu berücksichtigen.

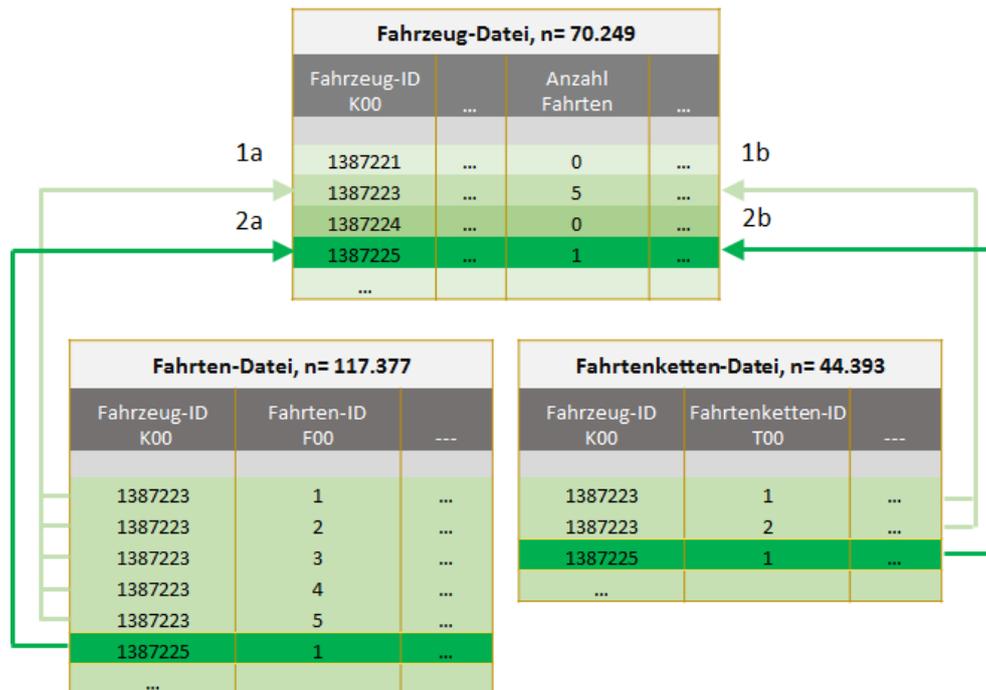


Abbildung 2-5: Verknüpfung der KID 2010 Datensätze (ohne Geodatensatz) (Quelle: Eigene Darstellung nach [19])

2.3.2 Methodik und Annahmen der Analyse des Verkehrs- und des energetischen Verhaltens

Ein wesentliches Ziel der Auswertung ist es, Profile zu ermitteln, mit denen der aufkommende Energie und Leistungsbedarf in Abhängigkeit der Anzahl der elektrifizierten Fahrzeuge gewerblicher Halter für unterschiedliche Wochentagstypen und in Abhängigkeit von saisonalen Unterschieden beschrieben werden kann, analog zu Lastprofilen, die in energiewirtschaftlichen Prozessen Anwendung finden. Die so gewonnene Datenbasis ermöglicht Untersuchungen für die zukünftige Gestaltung des Energiesystems in Hinblick auf u.a. die Erzeuger- und Speicherstruktur.

Dafür wurde eine Software-Anwendung in der Matlab-Umgebung entwickelt, mit welcher variable Szenarien bzgl. Ladeleistung und Batteriekapazität ausgewertet werden können. Die Ergebnisse basieren auf statistischen Auswertungen, die Güte der Ergebnisse hängt damit von der Stichprobengröße ab.

Die jahresdurchschnittlichen Ergebnisse des Verkehrsverhaltens werden mit der Analyseanwendung *KiT2010* erzeugt, die für Auswertungen einer Vielzahl von Merkmalen der KID 2010 bereitgestellt wird (vgl. dazu *Handbuch für das Auswertungstool „KID 2010 in Tabellen“ (KiT)*). Für detailliertere Auswertungen mit den Anforderungen in dieser Arbeit ist *KiT2010* nicht geeignet, so dass weiterführende Ergebnisse mit eigenen Anwendungen erzeugt werden. Die Nutzeroberfläche von *KiT2010* ist im Anhang B abgebildet.

Szenarien

Es werden zwei Szenarien untersucht, die sich in der Begrenzung der möglichen Ladeleistung unterscheiden.

- a) Vollständige Elektrifizierung aller betrachteten Fahrzeuge ohne Begrenzung der Ladeleistung und der Batteriekapazität
- b) Vollständige Elektrifizierung aller betrachteten Fahrzeuge mit Durchführung eines Batteriewechsels bei Fahrten, die zur Überschreitung einer maximal angenommenen Ladeleistung führen.

Die Batteriekapazität wird in beiden Szenarien nicht begrenzt, da ausgehend vom bisherigen Entwicklungsstand und Entwicklungsverlauf in der Batterietechnik, davon ausgegangen wird, dass die Batteriegröße in Abhängigkeit der Nutzungsweise ausgelegt wird und große Kapazitäten verfügbar sind. Aktuell verfügbare Fahrzeuge sind mit Batteriekapazitäten von bis zu 100 kWh ausgestattet (Tesla SP100D). Damit sind Fahrtweiten von über 500 km möglich. Bzgl. der Ladeleistung werden Ladestationen mit über 150 kW installiert. Die Norm *DIN IEC 61851-23: Gleichstrom-Ladestationen für Elektrofahrzeuge CCS* definiert Grenzwerte für Strom (350 A) und Spannung (1.000 V), so dass Ladeleistungen von über 300 kW in den nächsten Jahren zu erwarten sind.

Die Szenarien erlauben für die beiden Fahrzeuggruppen die Betrachtung:

- des elektrischen Energiebedarfs bei einer vollständigen Elektrifizierung
- des Energie- und Lastverhaltens ohne Restriktionen und damit die Identifizierung des technischen Entwicklungsbedarfs
- des Energie- und Lastverhaltens ohne Restriktionen bei Vermeidung sehr hoher Ladeleistungen
- der Verteilung der aufkommenden Ladeleistungen und damit die Bewertung der notwendigen Infrastruktur

Methodik

Bei der Erstellung der Profile wird in Hinblick auf die Ladezeitpunkte der Ansatz verfolgt, dass Zwischenladungen bei jedem Halt mit einer Mindeststanddauer durchgeführt werden, und dass die Infrastruktur dafür ausreichend verfügbar ist. Für die Energieprofile gilt, dass

der Energiebedarf im Zeitpunkt der Ankunft des Fahrzeugs, also bei Fahrtende auftritt. Dies ist der frühestmögliche Zeitpunkt, an dem die Energie der Batterie wieder zugeführt werden kann. Für die Leistungsprofile gilt vereinfacht, dass die Ladung nach jeder Fahrt mit einer konstanten Ladeleistung über die gesamte Standzeit erfolgt.

Abbildung 2-6 beschreibt das Vorgehen zur Ermittlung der Energie- und Leistungsprofile für beide Szenarien.

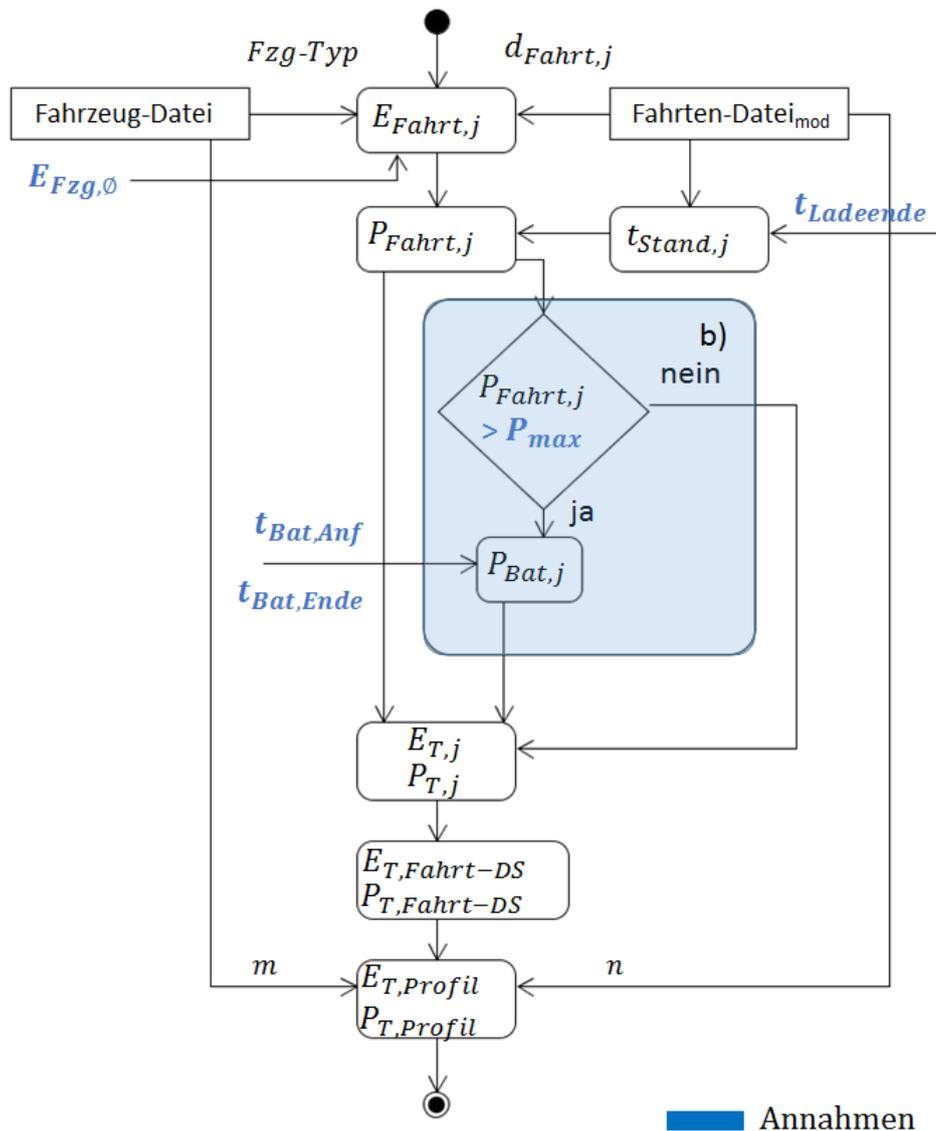


Abbildung 2-6: Methodisches Vorgehen zur Ermittlung der Energie- und Leistungsprofile

Als Eingangsdaten fungieren die Fahrzeug-Datei und eine modifizierte Fahrten-Datei (Fahrten-Datei_{mod}). In Fahrten-Datei_{mod} werden die ursprünglichen minutengenauen Zeitangaben durch Aufrunden in 5-Minuten Zeitschritte überführt. Dadurch ergeben sich Fälle, bei denen die Ankunftszeit einer Fahrt und die Abfahrtszeit der nächsten Fahrt eines Fahrzeugs den gleichen Wert annehmen (z.B. Kurier-Fahrten mit sehr kurzen Standzeiten).

Diese Fahrten werden solange zusammengefasst, bis sich die Abfahrtszeit von der Ankunftszeit unterscheidet. Die Fahrt-Distanzen werden aufaddiert. Durch dieses Vorgehen werden Standzeit von < 5 Minuten nicht berücksichtigt und stehen für eine Ladung oder einen Batteriewechsel nicht zur Verfügung.

Mithilfe des Fahrzeug-Typs (Fzg-Typ) aus der Fahrzeug-Datei wird dem Stichprobenfahrzeug ein elektrischer Grundverbrauch $E_{Fzg,\emptyset}$ [kWh/100 km] zugeordnet, so dass mit der Angabe zur zurückgelegten Distanz $d_{Fahrt,j}$, die der Fahrten-Datei entnommen wird, die verbrauchte Energie einer Fahrt $E_{Fahrt,j}$, nach Gl. (2) ermittelt werden kann:

$$E_{Fahrt,j} = E_{Fzg,\emptyset} \cdot d_{Fahrt,j} \quad (2)$$

Mit $j=1, \dots, J$; J = Anzahl Fahrten im Fahrten-Datensatz.

Mit $E_{Fahrt,j}$ und der Ladezeit $t_{Stand,j}$ wird die minimale Ladeleistung $P_{Fahrt,j}$ nach Gl. (3) berechnet.

$$P_{Fahrt,j} = E_{Fahrt,j} / t_{Stand,j} \quad (3)$$

$t_{Stand,j}$ entspricht der Standzeit des Fahrzeugs zwischen der Ankunftszeit $t_{an,j}$ nach einer Fahrt und der Abfahrtszeit $t_{ab,j+1}$ der nächsten Fahrt. Wurde mit dem Fahrzeug nur eine Fahrt am Stichprobentag durchgeführt, so wird $t_{Stand,j}$ durch die Ladeendzeit $t_{Ladeende}$ ermittelt, bis zu der jedes Fahrzeug nach seiner letzten Fahrt wieder vollgeladen sein soll, so dass gilt:

$$\text{wenn } j > 1: t_{Stand} = t_{ab,j+1} - t_{an,j} \quad (4)$$

$$\text{wenn } j = 1: t_{Stand} = t_{Ladeende} - t_{an,j}$$

Bevor die Energie- und Leistungszeitreihen erstellt werden, wird in Szenario b) (vgl. blauer Kasten in Abbildung 2-6) geprüft, ob $P_{Fahrt,j}$ die zulässige Ladeleistung P_{max} überschreitet. Fällt die Prüfung positiv aus, wird angenommen, dass die Fahrzeugbatterie nicht geladen wird, sondern ein Batteriewechsel stattfindet. In diesem Fall wird für diese Fahrt nach Gl. (5) $P_{Bat,j}$ anstatt $P_{Fahrt,j}$ (Gl. (3)) mit den Anfangs- und End-Ladezeiten der Wechselbatterien $t_{Bat,end}$ und $t_{Bat,anf}$ ermittelt:

$$P_{Bat,j} = E_{Fahrt,j} / t_B \quad (5)$$

$$\text{mit: } t_B = t_{Bat,end} - t_{Bat,anf}$$

Mit allen $E_{Fahrt,j}$, $P_{Fahrt,j}$ bzw. $P_{Bat,j}$, die für jeden Fahrten-Datensatz bestimmt worden sind, lassen sich anschließend Energie- und Leistungs-Zeitreihen aufstellen. Die Zeitreihen haben eine Intervallbreite von 5 Minuten und eine Länge von 576 Zeitschritten, um zwei Tage abzubilden. Eine Betrachtung von mehr als einem Tag ist erforderlich, da sowohl die Ankunft am Tag nach dem Stichprobentag erfolgen kann, als auch die Ladung sich bis in den nächsten Tag hinziehen kann.

Unabhängig vom betrachteten Szenario gilt für alle Werte e_t der Energiezeitreihen $E_{T,j}$:

$$e_{t,j}: E_{Fahrt,j}, \text{ wenn } t = t_{an,j} \quad (6)$$

$$e_{t,j}: 0, \text{ wenn } t \neq t_{an,j}$$

Das bedeutet, dass der gesamte Energiebedarf im Zeitpunkt der Ankunft vorliegt.

Bei der Erstellung der Leistungszeitreihe $P_{T,j}$ gilt für Szenario a) und für den nein-Pfad von Szenario b) (ohne $P_{Bat,j}$):

$$p_{t,j}: P_{Fahrt,j}, \text{ wenn } t_{an,j} \leq t < (t_{ab,j+1} \vee t_{Ladeende}) \quad (7)$$

$$p_{t,j}: 0, \text{ sonst}$$

Bei Durchführung eines Batteriewechsels (ja-Pfad von Szenario b)) gilt für $P_{T,j}$:

$$p_{t,j}: P_{Bat,j}, \text{ wenn } t_{Bat,anf} \leq t < t_{Bat,end} \quad (8)$$

$$p_{t,j}: 0, \text{ sonst}$$

Die Werte der Zeitreihen aller Fahrzeuge $E_{T,j}$ und $P_{T,j}$ werden anschließend zeitschrittweise aufsummiert, und durch die Anzahl der Fahrzeuge aus der Fahrten-Datei $n_{Fahrt-DS}$ dividiert. $E_{T,Fahrt-DS}$ und $P_{T,Fahrt-DS}$ stellen damit das durchschnittliche Verhalten der Stichproben-Fahrzeuge aus dem Fahrten-Datensatz dar:

$$E_{T,Fahrt-DS} = \frac{\sum_{j=1}^J e_{t,j}}{n_{Fahrt-DS}} \quad (9)$$

$$P_{T,Fahrt-DS} = \frac{\sum_{j=1}^J p_{t,j}}{n_{Fahrt-DS}} \quad (10)$$

Um immobile Fahrzeuge zu berücksichtigen, werden $E_{T,Fahrt-DS}$ und $P_{T,Fahrt-DS}$ anschließend mit dem Mobilitätsfaktor m gewichtet, der das Verhältnis von mobilen Fahrzeugen $n_{Fahrt-DS}$ zur Fahrzeuggesamtheit n_{FzG-DS} des Fahrzeug-Datensatzes angibt:

$$E_{T,Fzg-DS} = E_{T,Fahrt-DS} \cdot m \quad (11)$$

$$P_{T,Fzg-DS} = P_{T,Fahrt-DS} \cdot m \quad (12)$$

Die so gewonnenen Zeitreihen, die sich über zwei Tage erstrecken, bilden das energetische durchschnittliche Verhalten eines Fahrzeugs ab dem Zeitpunkt der Ankunft nach der ersten Fahrt bis zum Ladeende am nächsten Tag ab. Die Ladungen und die Energieaufkommen im Zeitraum davor, die von den Fahrten vom Vortag herrühren, sind noch nicht berücksichtigt, und die des zweiten Tages sind noch dem Folgetag zuzuordnen. Im letzten Schritt der Profilerstellung werden die Zeitreihen daher in zwei Tage aufgespalten, wie in Abbildung 2-7 beispielhaft für die Energiezeitreihen $E_{T,Mo}$ und $E_{T,Di}$ dargestellt (diese entsprechen $E_{T,Fzg-DS}$ aus Gl. (11)⁸). Für das Dienstag-Profil $E_{T,Di,Profil}$ werden jeweils zu den Werten des ersten Tages von $E_{T,Di}$ die Werte des zweiten Tages von $E_{T,Mo}$ hinzuaddiert.

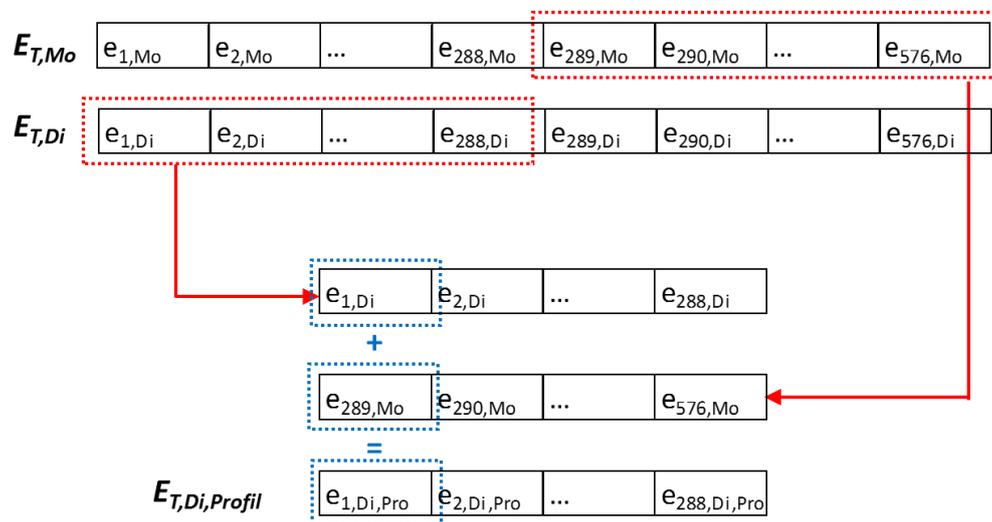


Abbildung 2-7: Zusammenführung der Zeitreihen zum Energieprofil

Annahmen

Für Auswertungen werden die folgenden Annahmen zugrunde gelegt:

- Durchschnittsverbrauch $E_{Fzg,\emptyset}$:

Es werden die Verbräuche wie in Tabelle 2-3 angenommen.

⁸ Der Übersicht halber wurden die Indizes vereinfacht.

Tabelle 2-3: Durchschnittsverbräuche für die ausgewählten Fahrzeugtypen

Energieverbrauch	$E_{Pkw,\emptyset}$ [kWh/100km]	$E_{LNfzg,\emptyset}$ [kWh/100km]
Sommermonate	15	30
Wintermonate	25	50

Die Sommermonate umfassen die Monate von Mai bis September. Die restlichen Monate des Jahres werden den Wintermonaten zugerechnet. Der höhere Verbrauch in den Wintermonaten wird durch die zusätzlichen Verbraucher wie Heizung, Scheibenwischer, Lüfter und Licht begründet, die witterungs- und saisonbedingt verstärkt eingesetzt werden.

b) Ladeendzeit $t_{Ladeende}$:

Da die Stichproben nur einen Tag umfassen, wird die erste Abfahrt am anschließenden Tag, im Fragebogen nicht mehr erfasst. Aus diesem Grund muss eine Ladeendzeit für die letzte Fahrt bestimmt werden. Es wird ein Zeitpunkt ausgewählt, zu dem die meisten Fahrzeuge morgens noch nicht ihre erste Fahrt angetreten haben, mit $t_{Ladeende} = 6.00$ Uhr.

c) Maximale Ladeleistung P_{max} :

Die maximale Ladeleistung P_{max} , welche für Szenario b) notwendig ist, wird zu 300 kW angenommen.

d) Batterieladezeit t_{Bat} :

Die Ladung der Wechselbatterien wird in Zeiten der System-Grundlast durchgeführt, mit $t_{Bat,anf} = 0.00$ Uhr und $t_{Bat,end} = 4.00$ Uhr.

e) Minimale Haltezeit $t_{Stand,min}$:

Die minimale Haltezeit, um eine um Ladung einzuleiten, ergibt sich aus der Intervallbreite der Zeitschritte zu $t_{Stand,min} = 5$ min.

Eingangsdaten

Die relevante Stichprobe beinhaltet in der Fahrzeug-Datei 49.310 gewerblich gehaltenen Pkw und LNfzg und in der zugehörigen Fahrten-Datei 82.416 Fahrten. Etwa 3 % der Fahrten haben fehlerhafte Angaben in der Abfahrts- oder Ankunftszeit. Diese Stichprobenfahrzeuge werden nicht weiter berücksichtigt. Fahrten mit einer fehlerhaften Angabe im Abfahrtsdatum, konnten zur Vermeidung eines weiteren Datenverlustes durch den realisierten Befragungsstichtag, der ebenfalls in der Fahrzeug-Datei steht, ersetzt werden. Weitere 3,5 % der Fahrten werden durch das Runden der Uhrzeiten zusammengefasst, so dass insgesamt 77.017 Fahrten ausgewertet werden.

Da die Analysen wochentagspezifisch und für jeden Stichprobenmonat erfolgen können, werden die Eingangsdaten weiter unterteilt. Im Einklang mit der KID wurden fünf Wochentagstypen (WTT) betrachtet. Diese werden im Folgenden mithilfe ihrer Kennzahlen ausgewiesen, wie sie in Tabelle 2-4 dargestellt sind.

Tabelle 2-4: Wochentagstypen nach KID

WTT	Wochentag
1	Montag
2	Dienstag, Mittwoch, Donnerstag
3	Freitag
4	Samstag
5	Sonntag/Feiertag

Damit basieren die verschiedenen Profile auf den Anzahlen von Fahrten in Tabelle 2-5.

Tabelle 2-5: Stichprobenumfang in jeden Monat

	WTT									
	1		2		3		4		5	
	Pkw	LNfzg	Pkw	LNfzg	Pkw	LNfzg	Pkw	LNfzg	Pkw	LNfzg
Jan	351	328	1.087	891	327	266	153	59	103	9
Feb	458	340	1.546	1.562	470	476	189	82	147	29
Mär	841	891	2.251	2.633	750	708	254	143	213	51
Apr	20	16	972	858	282	253	142	43	195	56
Mai	885	1.154	1.438	1.839	489	463	211	142	91	22
Jun	356	391	2.038	2.267	618	628	281	133	306	90
Jul	324	427	1.114	1.066	318	333	218	97	72	10
Aug	1.238	1.443	2.650	2.555	517	564	261	133	157	24
Sep	384	399	2.698	2.658	1.000	916	449	182	263	34
Okt	404	391	1.343	1.232	419	328	206	55	127	18
Nov	1.031	1.235	1.638	1.678	568	534	259	122	186	35
Dez	347	299	2.744	2.623	775	765	426	152	236	50

2.3.3 Ergebnisse

Nutzerverhalten aus verkehrstechnischer Sicht

Die nachfolgende Tabelle 2-6 zeigt die jährliche, durchschnittliche Tagesfahrleistung der beiden Fahrzeuggruppen Pkw und LNfzg für alle Wochentagstypen.

Tabelle 2-6: Durchschnittliche Tagesfahrleistung (Auswertung mit *Kit2010*)

Fahrzeugtyp	WTT1	WTT2	WTT3	WTT4	WTT5
Pkw [km]	68,9	76,2	62,9	30,1	19,2
LNfzg [km]	65,0	60,8	58,3	12,1	4,8

Die geringste durchschnittliche Fahrtweite wird am WTT5 erzielt. Die Höchste wird bei Pkw am WTT2 und bei LNfzg am WTT1 erreicht. Da die folgenden Analysen in Kapitel 3 auf systemtechnischer Ebene durchgeführt werden und zudem Grenzwertbetrachtungen sind, basieren die weiteren Auswertungen auf den WTT2 und WTT5. WTT2 führt in der Gesamtbetrachtung zu einem höheren Energiebedarf, da Pkw im Vergleich zu LNfzg aufgrund ihrer Anzahl den höheren Energiebedarf verursachen (vgl. dazu Tabelle 2-1 und Tabelle 2-3).

Tabelle 2-7 dient der Veranschaulichung des Nutzerverhaltens im Jahresverlauf. Sie zeigt die Verkehrsbeteiligung mithilfe der Mobilitätsfaktoren und die durchschnittliche, monatliche Tagesfahrleistung aller Stichprobenfahrzeuge d_{Tag} . Am WTT2 werden im Durchschnitt etwa 2/3 sowohl der Pkw als auch der LNfzg im Verkehr bewegt. Im November ist die Verkehrsbeteiligung beider Fahrzeugtypen am höchsten. An Sonn- und Feiertagen (WTT5) werden sowohl Pkw als auch LNfzg deutlich weniger genutzt. Während die Pkw noch zu ca. 20-25 % genutzt werden, sind es bei den LNfzg nur noch etwa 5 %. Es wird deutlich, dass die Variation in d_{Tag} nicht ausschließlich von m abhängt. Andere Einflüsse werden hier nicht weiter untersucht.

Werden mithilfe einer Gewichtung von m – entsprechend des Umfanges des Stichproben-datensatzes (vgl. Tabelle 2-5) – ausschließlich die mobilen Fahrzeuge betrachtet, zeigt sich, dass sowohl bei Pkw als auch bei LNfzg an den beiden WTT die Tagesfahrleistung nicht maßgeblich voneinander abweichen: Mobile Pkw fahren am WTT2 etwa 112 km und an WTT5 etwa 88 km, während LNfzg 91 km bzw. 86 km zurücklegen.

Tabelle 2-7: Mobilitätsfaktor m und durchschnittliche Tagesfahrleistung an WTT2 und WTT5 in jedem Monat (eigene Auswertung)

	Pkw				LNfzg			
	WTT2		WTT5		WTT2		WTT5	
	m	d_{Tag}	m	d_{Tag}	m	d_{Tag}	m	d_{Tag}
Jan	0,67	64,0	0,17	13,3	0,56	52,2	0,04	3,2
Feb	0,67	61,5	0,22	22,9	0,56	52,7	0,05	6,0
Mär	0,65	70,4	0,21	15,1	0,64	60,1	0,05	6,4
Apr	0,62	53,9	0,25	21,3	0,66	57,2	0,09	7,1
Mai	0,70	80,2	0,18	14,9	0,70	70,6	0,04	4,6
Jun	0,68	78,1	0,21	22,4	0,71	75,0	0,06	6,3
Jul	0,66	60,1	0,19	15,7	0,68	64,5	0,04	1,7
Aug	0,63	69,3	0,19	23,0	0,65	60,6	0,04	3,7
Sep	0,68	65,3	0,21	17,9	0,70	71,9	0,04	3,1
Okt	0,70	61,0	0,27	24,2	0,69	70,8	0,06	1,3
Nov	0,75	82,0	0,24	19,0	0,72	75,4	0,05	5,4
Dez	0,71	75,9	0,24	18,9	0,69	92,1	0,05	4,5

Tabelle 2-8 zeigt die Verteilung der Tagesfahrleistungen der mobilen Fahrzeuge auf Distanzbereiche für den WTT2 im Jahresdurchschnitt. Bei lediglich etwa 31 % der Pkw und 28 % der LNfzg ist eine untertägige Nachladung erforderlich, bei Annahme, dass die Batteriekapazität unabhängig von der Jahreszeit und Nutzungsweise auf mindestens 100 km ausgelegt wird.

Tabelle 2-8: Verteilung der Tagesfahrleistungen d_{Tag} mobiler Fahrzeuge an WTT2 im Jahresdurchschnitt (Auswertung mit KiT2010)

d in [km]	0<d≤80	80<d≤100	100<d≤150	150<d≤200	>200
Pkw	62,7 %	6,2 %	10,0 %	6,1 %	14,9 %
LNfzg	66,2 %	6,2 %	10,7 %	5,7 %	11,3 %

Zuletzt wird die Verteilung der Fahrdistanzen in Tabelle 2-9 betrachtet, um das Elektrifizierungspotential mit Zwischenladungen zu verdeutlichen. An WTT2 liegt der Anteil von Einzelfahrten mit > 100 km bei Pkw bei unter 7 %, bei LNfzg bei etwa 5 %. Am WTT5 sind es bei beiden Fahrzeugen etwa 9 %.

Tabelle 2-9: Verteilung der Fahrdistanzen d_{Fahrt}

d_{Fahrt} in [km]	Verteilung der Fahrdistanzen [%]			
	Pkw		LNfzg	
	WTT2	WTT5	WTT2	WTT5
$0 < d \leq 25$	71,3	73,1	74,0	70,1
$25 < d \leq 50$	13,9	12,3	13,2	11,4
$50 < d \leq 75$	5,4	3,7	5,0	6,8
$75 < d \leq 100$	2,9	2,6	2,6	3,0
$100 < d \leq 150$	2,6	3,1	2,5	3,0
$150 < d \leq 200$	1,2	1,8	1,0	0,5
$d > 200$	2,6	3,9	1,6	5,1

Nutzerverhalten aus energietechnischer Sicht

Die differenzierte Betrachtung des durchschnittlichen täglichen Energieverbrauchs beider Fahrzeugtypen in einem Monat ist in Tabelle 2-10 dargestellt. Die Werte werden durch Multiplikation der durchschnittlichen Energiebedarfe aus Tabelle 2-3 und der durchschnittlichen Tagesfahrleistung d_{Tag} aus Tabelle 2-7 bestimmt. Hier wird der Einfluss des saisonalen Verbrauchsunterschieds deutlich. An den Hauptverkehrstagen (WTT2) kann der Energiebedarf um mehr als 125 % im Jahresverlauf variieren, die Fahrdistanzen hingegen variieren um maximal ca. 50 %.

Tabelle 2-10: Durchschnittlicher täglicher Energieverbrauch von Pkw und LNfzg an WTT2 und WTT5 nach Monaten

	WTT2		WTT5	
	Pkw [kWh]	LNfzg [kWh]	Pkw [kWh]	LNfzg [kWh]
Jan	16,0	21,7	3,3	1,3
Feb	15,4	22,0	5,7	2,5
Mär	17,6	25,0	3,8	2,7
Apr	13,5	23,8	5,3	3,0
Mai	12,0	17,6	2,2	1,2
Jun	11,7	18,8	3,4	1,6
Jul	9,0	16,1	2,4	0,4
Aug	10,4	15,2	3,5	0,9
Sep	9,8	18,0	2,7	0,8
Okt	15,3	29,5	6,0	0,5

Nov	20,5	31,4	4,7	2,3
Dez	19,0	38,4	4,7	1,9
∅	14,2	23,1	4,0	1,6

Energieprofil

Der Verlauf des Energieprofils ist im Jahresverlauf ähnlich ausgeprägt. Bei Pkw bilden sich zwei Bereiche mit erhöhten Energiebedarfsaufkommen an Wochentagen WTT2 aus. Der erste Bereich liegt meist in den Zeiten zwischen 9.00 Uhr und 11.00 Uhr und der zweite von 16.15 Uhr– 20.15 Uhr. In Abhängigkeit des Monats kann der höchste aufkommende Energiebedarf sowohl in der ersten als auch in der zweiten Tageshälfte liegen. Ab 20.00 Uhr ist eine deutliche Abnahme des Energiebedarfs zu erkennen, da die meisten Fahrzeuge die letzte Fahrt beendet haben. In der zweiten Jahreshälfte sind noch wesentliche Energiebedarfe bis zu 23.00 Uhr und 23.30 Uhr zu verzeichnen. Der höchste Bedarf wird in den Sommermonaten im Juni um 16.15 Uhr mit 0,48 kWh und in den Wintermonaten im Januar um 17.00 Uhr mit 0,91 kWh erreicht. Am WTT5 verteilt sich das Energieaufkommen auf die Zeiten zwischen 7.15 Uhr und 0.00 Uhr. Eindeutige Spitzenbereiche sind nicht zu erkennen. In den Sommermonaten wird das höchste Energieaufkommen im August um 20.00 Uhr mit 0,5 kWh und in den Wintermonaten im Oktober um 13.45 Uhr mit 0,66 kWh erreicht.

Bei den LNfzgw ähnelt der Verlauf der Energiebedarfe an WTT2 dem von Pkw, jedoch beginnt der erste Bereich mit erhöhtem Energiebedarf bereits 2-3 h früher, ab etwa 7.00 Uhr. Darüber hinaus flacht der Energiebedarf im gesamten Jahresverlauf in den späten Abend- und Nachtstunden nicht so drastisch ab, wie bei Pkw und tendenziell befinden sich zwischen den beiden Spitzenbereichen vermehrt höhere einzelne Energiebedarfsspitzen. Der höchste Energiebedarf tritt in den Wintermonaten im Oktober um 16.30 Uhr mit 1,55 kWh auf. In den Sommermonaten liegt das Maximum im Juli ebenfalls um 16.30 Uhr bei 0,94 kWh. Am WTT5 gibt es keinen eindeutigen Bereich mit erhöhtem Energiebedarf, der Verlauf ist geprägt von verstärkt einzeln auftretenden Bedarfsspitzen. Das Maximum ist in den Sommermonaten im August um 4.00 Uhr mit 0,36 kWh, in den Wintermonaten im Februar um 22.00 Uhr mit 0,95 kWh.

Leistungsprofil

In Bezug auf die Ladeleistungen ist der Profilverlauf im Jahresverlauf einheitlicher als der des Energiebedarfs. Da der Leistungsbedarf auf die maximal mögliche Ladezeit verteilt ist, werden Lastspitzen reduziert und hohe Energiebedarfe führen nicht zwangsläufig zu hohen Leistungen. Der Profilverlauf der Ladeleistung beider Fahrzeugtypen lässt sich am WTT2 für alle Monate in drei Hauptbereiche einteilen:

Niedriglastbereich: Quasi-konstante Last in den Abendstunden bis zur Ladeendzeit

1. Bereich mit steigender Last: Ladeendzeit bis zur Lastspitze
2. Spitzenlastbereich: Bereich mit volatilen Lasten, deren Werte über der konstanten Last liegen, in den Tagesstunden von etwa 8.30 bis 16.30 Uhr

Aufgrund der vorgegebenen Ladeendzeit, existiert in den Morgenstunden bis etwa 6.00 Uhr eine tendenziell konstante Last, beginnend mit den letzten Ankünften der Fahrzeuge (etwa bei 20.00 Uhr). Bei Pkw liegt diese Last an WTT2 in den Wintermonaten bei 0,54 – 0,75 kW ($\varnothing = 0,63$ kW), in den Sommermonaten bei 0,35 und 0,41 kW ($\varnothing = 0,38$ kW). Bei LNfzg hat dieses Zeitintervall einen leicht steigenden Verlauf und liegt bei 0,81 – 1,49 kW ($\varnothing = 1,18$ kW) bzw. bei 0,58 und 0,81 kW ($\varnothing = 0,66$ kW).

Danach erreicht die Last ihr absolutes Minimum, an WTT2 sind es bei Pkw annähernd 0 kW, bei LNfzg verbleibt der Wert meist bei über 0,1 kW. Im Anschluss ist ein Anstieg bei beiden Fahrzeugtypen auf eine Lastspitze bis etwa 10.00 Uhr zu erkennen. Diese ist in etwa 50 % der Fälle die absolute Lastspitze, welche sich im Zeitraum von 10.00 – 16.00 Uhr befindet. Bei Pkw liegt sie bei maximal 1,64 kW in den Wintermonaten und bei 1,04 kW in den Sommermonaten. Bei LNfzg sind es 2,86 bzw. 1,71 kW. Danach fällt die Last volatil ab, bis sie wieder ihren konstanten Wert erreicht. Im Zeitraum mit Spitzenlast schwanken die Werte im Bereich zwischen der Lastspitze und dem Wert der konstanten Last.

Bereich 3) kann Bereich 2) überlappen. Zudem können im gesamten Tagesverlauf vereinzelt Lastspitzen auftreten, die durch die Berücksichtigung besonders langer Fahrten herrühren können. In diesen Zeitpunkten kann es zu Abweichungen vom beschriebenen Verlauf nach 1), 2) und 3) in Form von Ausreißern kommen.

An WTT5 schwankt der Profilverlauf bei beiden Fahrzeugtypen etwas mehr als an WTT2, da einzelne Fahrten aufgrund der geringeren Fahrtenanzahl in der Stichprobe den Verlauf stärker beeinflussen können. Es existiert ein Bereich 1) wie an WTT2, jedoch kann dieser auch den Spitzenbereich darstellen. Die Last der Pkw übersteigt im gesamten Jahresverlauf nicht den Wert von 0,25 und 0,73 kW, außer im Februar mit 1,57 kW. Bei LNfzg liegt dieser Wert bei 0,5 kW.

In Szenario b), mit ergänzender Batterieladung nachts, entspricht der Profilverlauf annähernd dem des Szenario a). In Bereich 1) bildet sich in der Batterieladezeit erwartungsgemäß eine weitere Stufe aus. Die beiden Stufen weichen minimal von der konstanten Ladeleistung ab. Es entfallen einige der Lastspitzen. Der Verlauf ändert sich jedoch nicht wesentlich, auch die Schwankungen sind weiter zu verzeichnen.

In den Diagrammen in Abbildung 2-8 bis Abbildung 2-11 werden die Ergebnisse der energiestärksten und -schwächsten Monate in Bezug auf den WTT2 dargestellt. Dabei

werden jeweils die Energie- und Leistungsprofile eines Fahrzeugtyps für beide Wochentagstypen in einem Diagramm zusammengefasst.

Die Profile der Pkw sind für Juli und November dargestellt. Der oben beschriebene Lastverlauf ist mit einigen zeitlichen Verschiebungen innerhalb der Bereiche deutlich zu erkennen. Im Juli ist kein wesentlicher Unterschied zwischen Szenario a) und b) zu erkennen. Im November wird deutlich, dass die Lastspitze zwischen 15:15 und 16:00 Uhr sich in Szenario b) nicht ausbildet, da die Last in die Zeiten der Batterieladung verschoben wird.

Die Ergebnisse der LNfzgw sind für August und für Dezember dargestellt. Der Effekt der Batterieladung wird hier besonders deutlich. Die absolute Lastspitze von WTT2 im Dezember wurde verhindert und insgesamt ist ein gleichmäßigerer Verlauf zu erkennen.

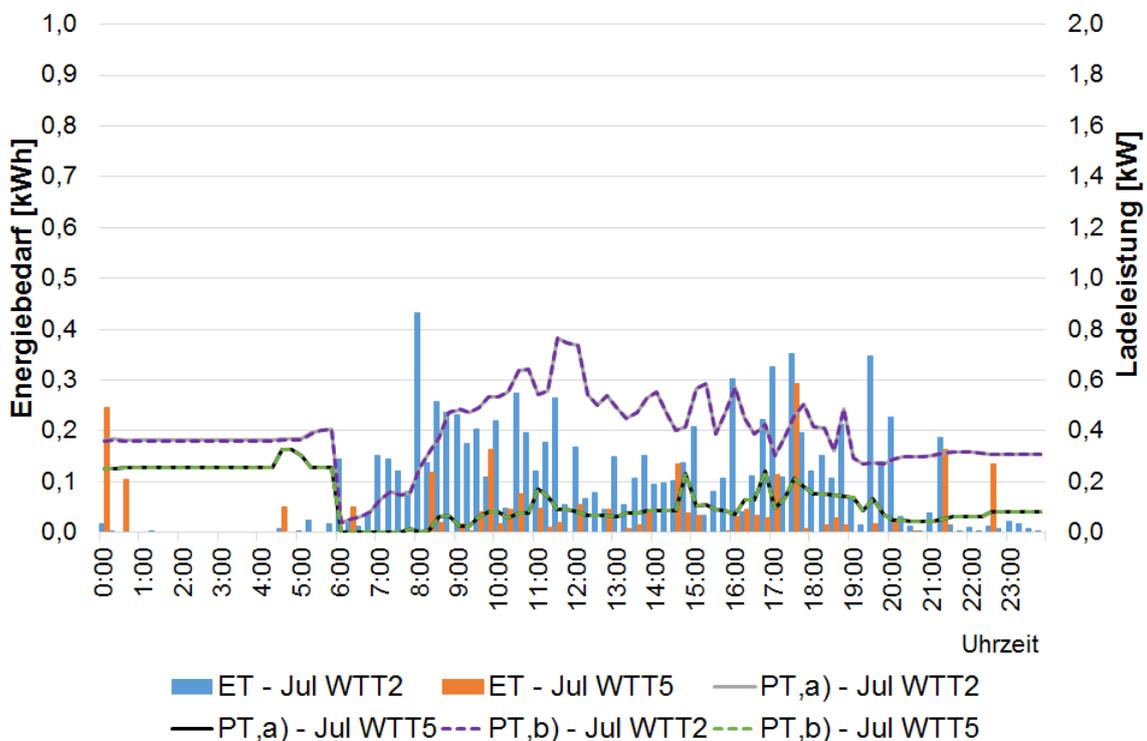


Abbildung 2-8: Energie- und Leistungsprofil eines gewerblich gemeldeten Pkw im Juli für WTT2 und WTT5

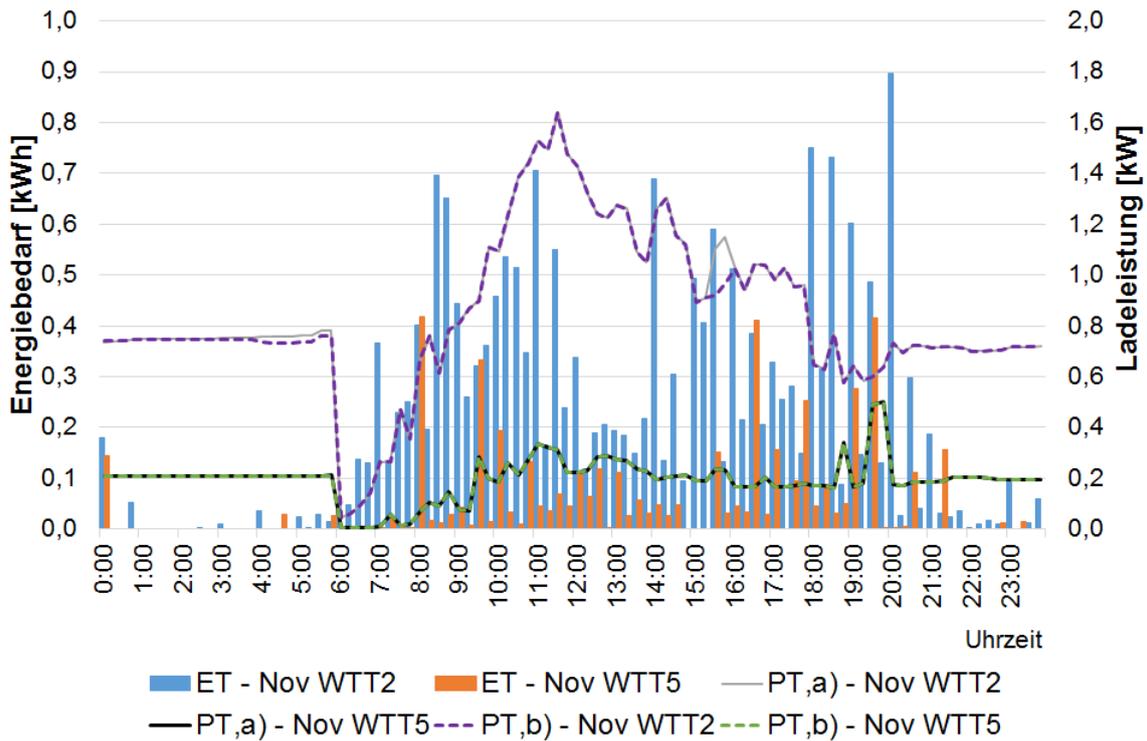


Abbildung 2-9: Energie- und Leistungsprofil eines gewerbliche gemeldeten Pkw im November für WTT2 und WTT5

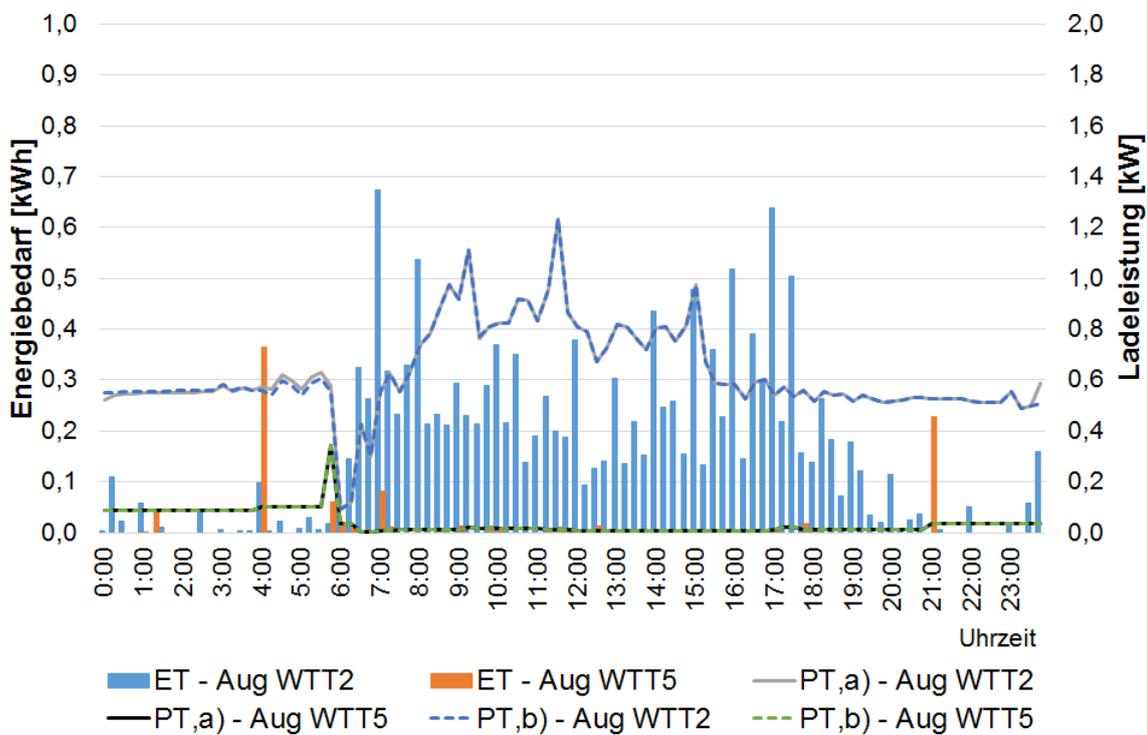


Abbildung 2-10: Energie- und Leistungsprofil eines gewerbliche gemeldeten LNfzq im August für WTT2 und WTT5

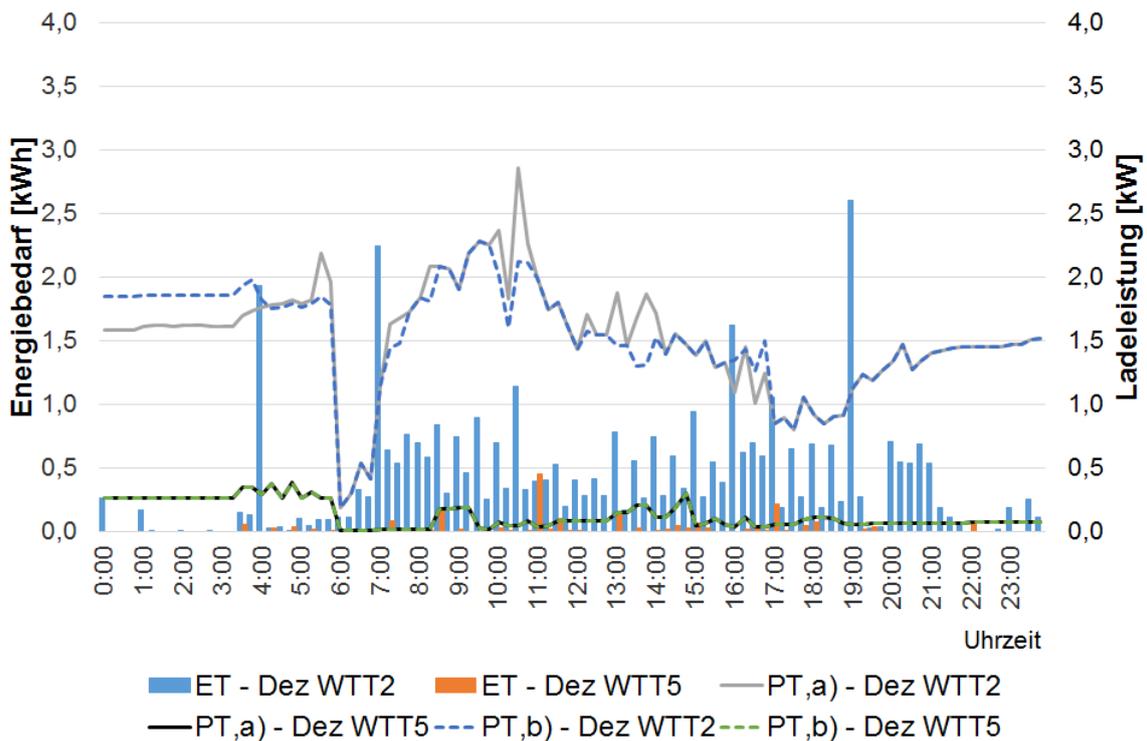


Abbildung 2-11: Energie- und Leistungsprofil eines gewerbliche gemeldeten LNfzq im Dezember für WTT2 und WTT5

Die nachfolgenden Abbildungen Abbildung 2-12 und Abbildung 2-13 dienen der Veranschaulichung der resultierenden Ladeleistungen und ihrer Häufigkeit in der Stichprobe und entstammen Szenario a). Die Ergebnisse sind bezogen auf einen Ladepunkt. Die Ladeleistungen sind in Bereiche mit unterschiedlicher Intervallbreite eingeteilt. In den niedrigen Leistungsklassen sind die Leistungsintervalle kleinschrittig, in höheren Leistungsklassen werden sie breiter, da die Häufigkeit der auftretenden Leistungen in diesen Bereichen sehr gering ist.

Die kumulierten Anteile werden durch die grüne Linie angezeigt. Für die Ladung von Pkw reicht eine installierte Leistung an einem Ladepunkt von 10 kW bei über 90 % aller Fahrten aus, bei LNfzq ist dafür eine Leistung von 25 kW erforderlich. Bezogen auf die maximalen Ladeleistungen, die sich aktuell in der Entwicklung befinden (150 - 350 kW), liegt der Anteil mit Leistungen darüber bei weniger als einem Prozent.

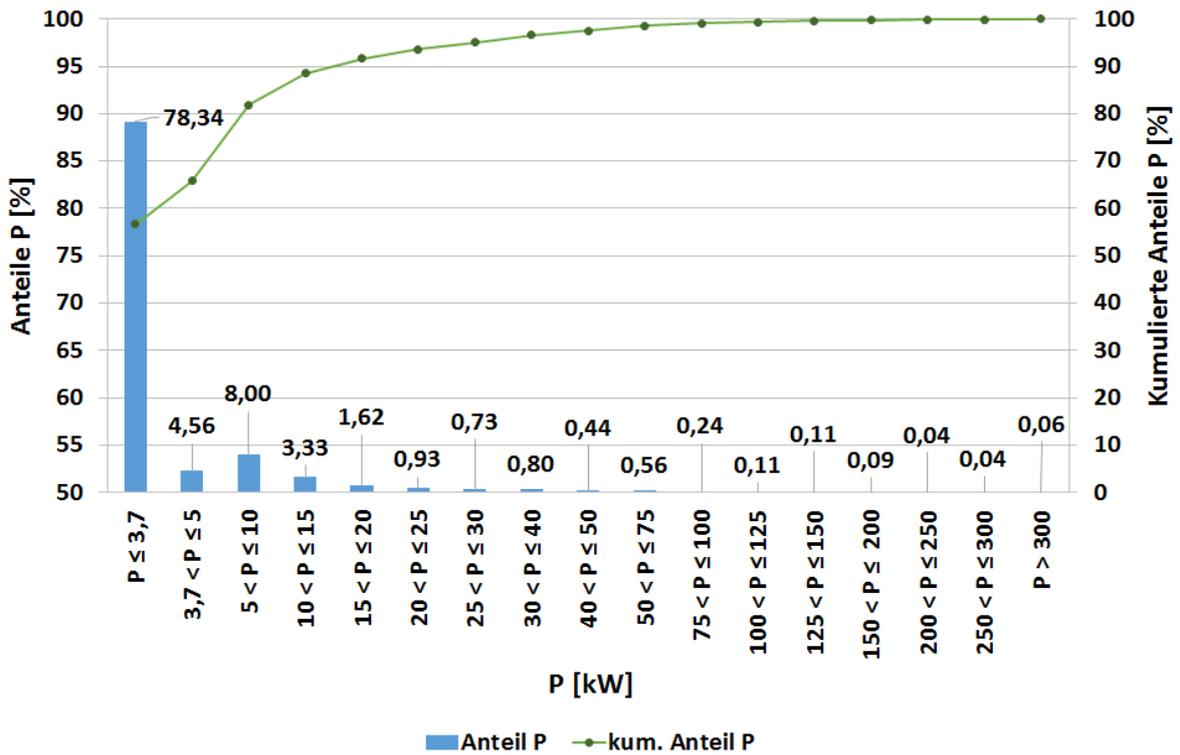


Abbildung 2-12: Anteile und kumulierte Anteile von notwendigen Ladeleistungen nach Fahrten von Pkw

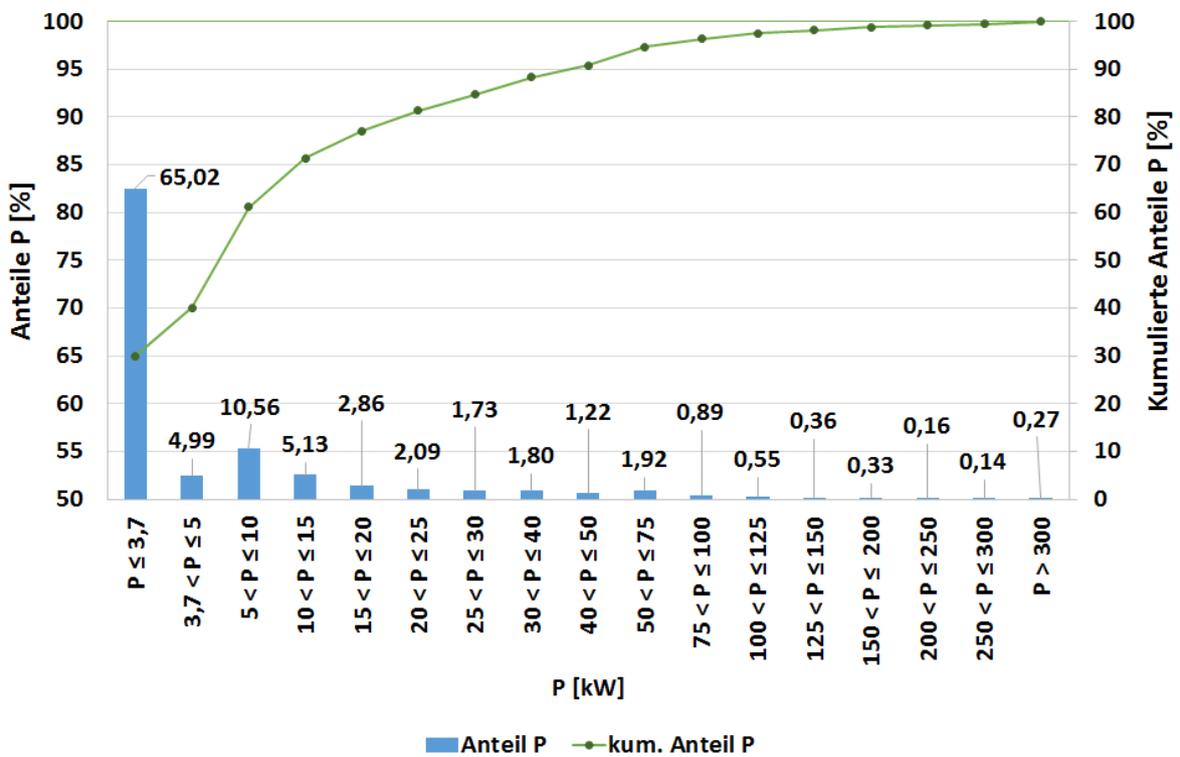


Abbildung 2-13: Anteile und kumulierte Anteile von notwendigen Ladeleistungen nach Fahrten von LNfzg

Resultierender Gesamtenergie und -leistungsbedarf bei vollständiger Elektrifizierung der gewerblich gemeldeten Fahrzeuge

Werden die in dieser Arbeit erstellten Profile für WTT1 bis WTT5 zur Abschätzung des Jahresenergiebedarfs bei einer vollständigen Elektrifizierung des gewerblichen Bereichs verwendet, ergibt sich ein Jahresenergiebedarf für den Pkw-Verkehr in Höhe von 16.025 GWh für das Jahr 2010 bei 4.023.000 Pkw. Bei LNfzg liegt dieser Wert bei 8.560 GWh bei 1.366.000 Fahrzeugen. Die resultierenden maximalen Leistungsbedarfe eines Monats (Monatslastspitzen) sind zeitunabhängig in Abbildung 2-14 und Abbildung 2-15 dargestellt. Diese liegen für Pkw an den meisten Tagen im einstelligen GW-Bereich und bei LNfzg bis etwa 5 GW. Ausnahmen davon bildet bei beiden Fahrzeugtypen die Lastspitze für WTT1 im April. Aufgrund des in diesem Monat vorliegenden geringen Stichprobenumfangs für den WTT 1 (vgl. Tabelle 2-5), können die resultierenden Lastwerte als Ausreißer betrachtet werden. Innerhalb dieser beiden Stichproben gab es jeweils ein Fahrzeug, dessen Fahrtstrecken im oberen Grenzbereich lagen. Die daraus folgenden hohen Ladeleistungen führten zu einer deutlichen Anhebung des dargestellten Mittelwertes.

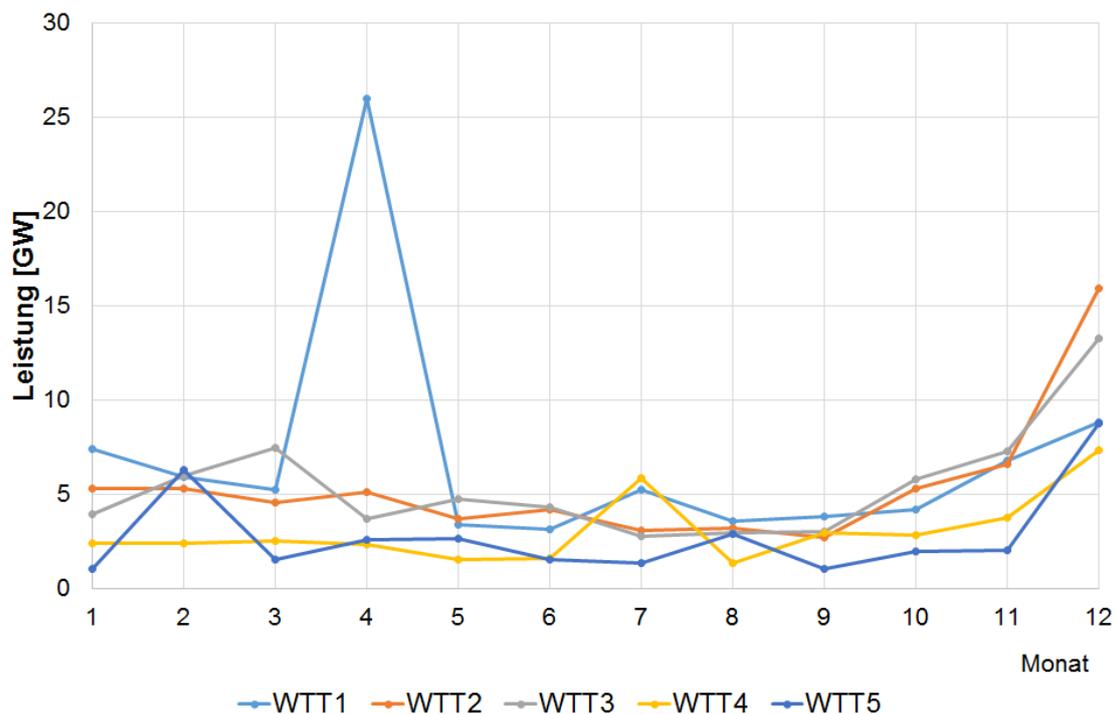


Abbildung 2-14: Monatliche Lastspitzen bei 4.024 Mio. Pkw

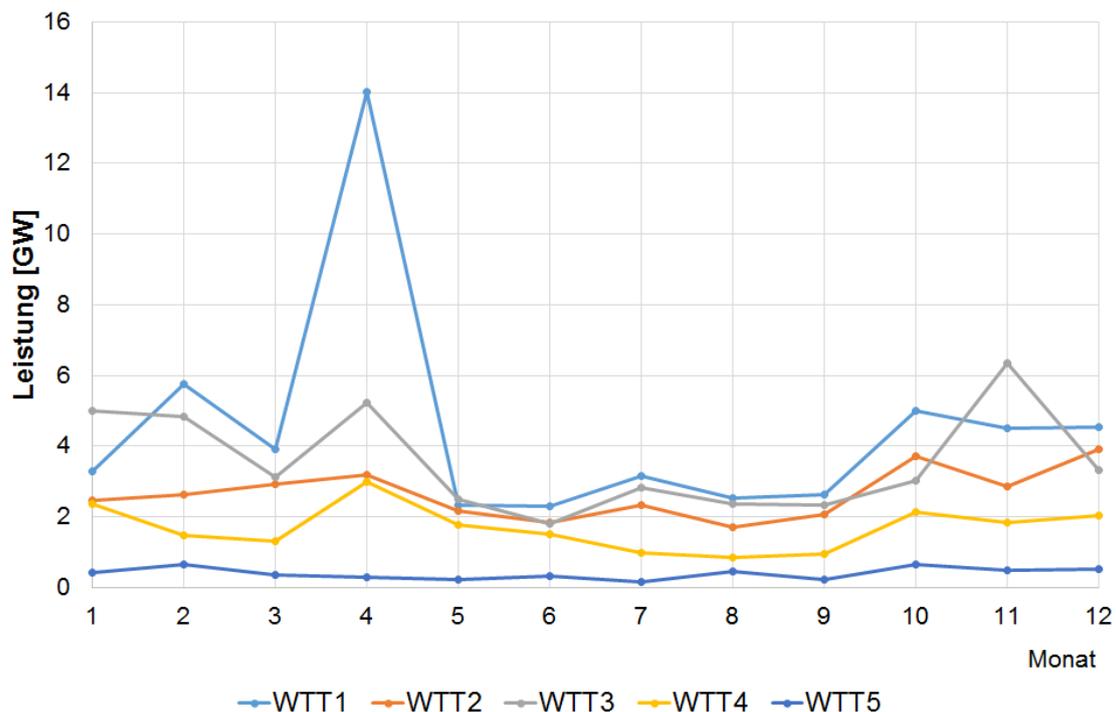


Abbildung 2-15: Monatliche Lastspitzen bei 1.366 Mio. LNfzg

2.4 Zusammenfassung und Bewertung

In diesem Kapitel wurde der gewerbliche Pkw- und LNfzg-Verkehr in die Elektromobilität und die Energiewirtschaft eingeordnet und in Bezug zu den energiepolitischen Zielen gesetzt. Dafür wurde zunächst der Verkehrssektor aus energietechnischer Sicht beschrieben und der Primär- und Endenergiebedarf für die betrachteten Fahrzeugtypen ermittelt. Mit insgesamt über fünf Millionen Elektrofahrzeugen würden die Ziele von sechs Millionen Fahrzeugen bis 2030 zu 90 % erreicht werden. Die Elektrifizierung kann wesentlich zu Erreichung der energiepolitischen Ziele beitragen. Lediglich die Elektrifizierung der Pkw liegt, bezogen auf die Endenergie, in der Größenordnung des geforderten Anteils von erneuerbaren Energien in Höhe von 10 %.

Neben der politischen Bedeutung hat die Elektrifizierung des gewerblichen Bereichs sozio-ökonomische Auswirkungen, die als Katalysator für die Marktintegration von elektrischen Fahrzeugen dienen, und die Markthochlaufphase wesentlich beeinflussen können. Des Weiteren gestaltet sich die Integration im gewerblichen Bereich aus Anwendersicht wirtschaftlicher. Neben der höheren Jahresfahrleistung führt die Nutzung im Verbundbetrieb, wie einem Fuhrpark, zu weiteren wirtschaftlichen Vorteilen.

Für die Erstellung der Energie- und Leistungsprofile für systemtechnische Untersuchungen wurde die Verkehrsstudie KID 2010 ausgewertet. Dafür wurde eine Software-Anwendung

entwickelt, die aus den Nutzerdaten, mit Informationen zu Fahrzeugtypen, Fahrzeiten und Fahrleistungen, monats- und wochentagsabhängige Energie- und Leistungsprofile berechnet.

Die Analysen mit den Profilen führen bei Vollelektrifizierung zu einem Energiebedarf bei Pkw in Höhe von 16.025 GWh und bei LNfzg in Höhe von 8.560 GWh. Bezogen auf den Leistungsbedarf liegt dieser in Szenario a) bei Pkw in den Sommermonaten zwischen 3 und 6 GW an Werktagen, in den meisten Wintermonaten bei unter 10 GW. Werte von bis zu 26 GW können erreicht werden. Bei LNfzg liegen die Werte im Sommer bei bis zu 3 GW und im Winter bei 2 bis 6 GW und maximal bei 14 GW.

Die Modellierung der Software-Anwendung wurde durch eine Vergleichsrechnung verifiziert. Dafür wurde der in der KID 2010 ermittelte Wert für die Jahresfahrleistung mit dem Ergebnis der Jahresfahrleistung verglichen, welche mit der Software-Anwendung berechnet wurde.

Dazu wurde unter Anwendung der entwickelten Energieprofile und Mobilitätsfaktoren der Jahresenergieverbrauch aller gewerblichen Pkw bestimmt. Aus dem Energiebedarf wurde die Jahresfahrleistung ermittelt. Die Ergebnisse der Modellierung führen zu einer Abweichung in der Jahresfahrleistung von ca. 10 %, die über dem Wert liegt, welcher in der KID 2010 angegeben ist. Gründe für die Abweichung resultieren aus den Vereinfachungen und der Datenaufbereitung und Bereinigung, die für die Profilerstellung notwendig sind. Das Modell wird als hinreichend genau erachtet, um es für weiterführende Analysen in der Systemebene zu verwenden.

Die dargestellten Ergebnisse in diesem Kapitel beruhen auf dem Nutzerverhalten aus 2010. Durch den Paradigmenwechsel im Verkehrsbereich unter Nutzung von intermodalen Konzepten werden strukturelle Änderungen stattfinden, die sich auf die Profile auswirken. Die folgenden Aspekte sollten daher bei der Nutzung der Ergebnisse für weiterführende Untersuchungen berücksichtigt werden.

- Verkehrsleistungsabhängige Energiebedarfe von einzelnen Fahrzeugen werden aufgrund von Effizienzsteigerungen und dem Trend zu niedrigeren Motorisierungsgraden sinken [17].
- Jahresenergiebedarfe von einzelnen Fahrzeugen können aufgrund von höheren Ausnutzungsgraden steigen.
- Es sind Änderungen in der Verkehrsleistung des Personen-Güterverkehrs zu erwarten, die einerseits demographisch bedingt sind, aber auch durch den verstärkten Einsatz von intermodalen Konzepten verursacht werden [17], wodurch der Gesamtenergiebedarf beeinflusst wird.

- Das Nutzerverhalten wird sich an die technologischen Änderungen anpassen, so dass die Zwischenhalte zukünftig auch von der Ladenotwendigkeit abhängen werden, wodurch Verschiebungen in den Profilen zu erwarten sind.
- Die Lade- und Batterietechnologie wird sich an die Erfordernisse anpassen, so dass die Ladeleistungen unter Umständen noch weiter ansteigen werden (bspw. werden Batteriepacks von elektrischen Lkw heute bereits parallel an > 2 Ladepunkten geladen, wodurch die Gesamtladeleistung vervielfacht werden kann).

Eine Erstellung von neuen Profilen ist mit der vorliegenden Software möglich und sollte erfolgen, sobald die strukturellen und technischen Änderungen bzgl. der Ladeleistungen wesentlich werden.

3 Interdependenzen mit dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien

Im Hinblick auf die Stromerzeugung beinhalten die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung eine Umgestaltung der Erzeugungsstruktur hin zu einer nahezu vollständigen regenerativen Versorgung in 2050 mit einem energetischen Anteil von 80 %. Als Zwischenziele werden im Energiekonzept 40-45 % in 2025 und 55-60 % in 2035 angegeben. Zur erfolgreichen Umsetzung wird das Energiesystem nach neuen Paradigmen gestaltet. Da wesentliche Anteile der Erzeugung, wie bereits heute, dargebotsabhängig sein werden, ist es – neben dem verstärkten Einsatz von Speichern – erforderlich Verbrauchergruppen hinsichtlich ihres Leistungsbedarfs und der Verbrauchszeitpunkte mithilfe eines Lastmanagements beeinflussen zu können. [54], [56]

Aktuell wird der elektrische Energiebedarf bereits zu mehr 33,1 % regenerativ gedeckt, wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Die dargebotsabhängigen Erzeuger Wind und Sonne produzieren davon 22,2 %.

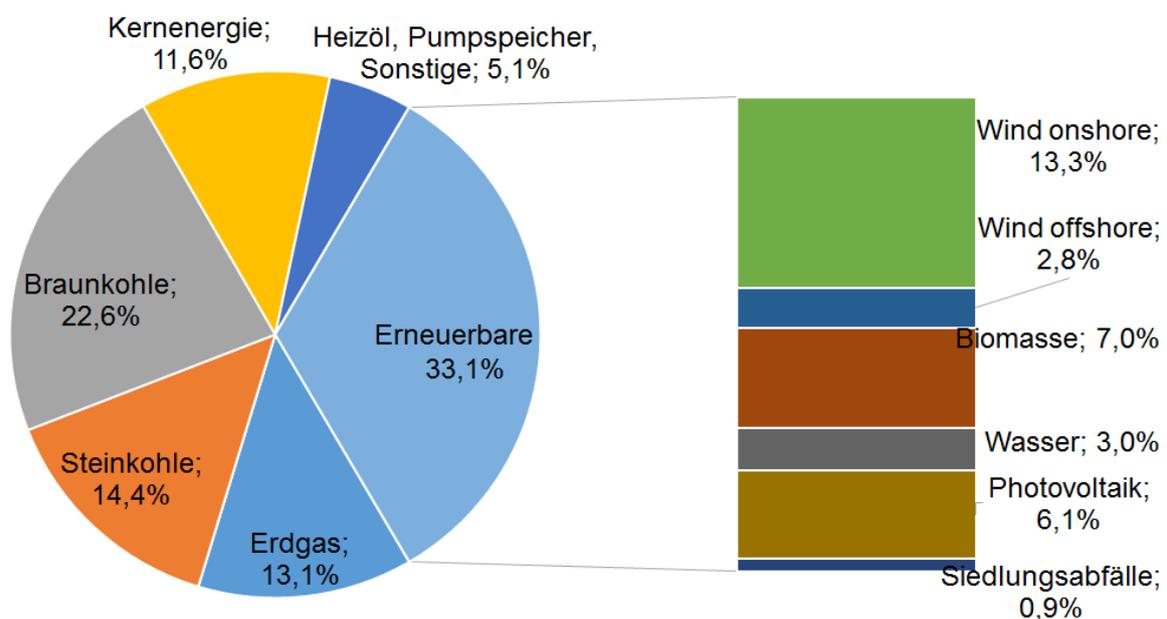


Abbildung 3-1: Brutto-Stromerzeugung Deutschland nach Energieträgern in 2015 (eigene Darstellung nach [55])

Die zukünftige Entwicklung der dargebotsabhängigen Erzeuger in Hinblick auf die Erzeugungsstruktur und die installierte Leistung wird von verschiedenen Aspekten beeinflusst. Neben den politischen Zielen sind das die Verfügbarkeit von Ressourcen, von ökonomischen, demografischen und politischen Faktoren, als auch von der Verbrauchscharakteristik. Letzteres, da das Zusammenspiel von Erzeugung und Verbrauch den Management- und Speicheraufwand wesentlich bestimmen wird. Je mehr Lastverschie-

bepotential und Speichervolumen zur Verfügung steht, desto geringer kann die installierte Leistung der dargebotsabhängigen Erzeuger ausgelegt werden.

In diesem Kapitel wird untersucht, wie das System, bestehend aus der Verbrauchgruppe der gewerblich gehaltenen Pkw und LNfzg und den Erzeugern von dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien in Deutschland, bei einer vollständigen Elektrifizierung der Kfz und ungesteuerter Ladung, im Jahresverlauf interagiert. Die Analyse mit der ungesteuerten Ladung stellt das minimale Integrationspotential dar, welches sich durch Lastverschiebung weiter erhöhen lässt.

Zunächst werden die Erneuerbaren Erzeuger PV und Wind bzgl. ihrer Einspeisecharakteristik und ihrer Entwicklung in den energiesystemtechnischen Rahmen eingeordnet. Anschließend werden Kennwerte zur Beschreibung der Systemeigenschaften des hier betrachteten Systems definiert, mit denen Rückschlüsse auf die Auslegung weiterer Komponenten des Energiesystems, zur Ermöglichung einer autarken Versorgung, gezogen werden können. Die Komponenten sind das erforderliche Speichervolumen sowie die notwendige Erzeugung an Zusatzenergie. Mit den Profilen aus Kapitel 2 werden Energie- und Leistungsbilanzen erstellt, um die Systemeigenschaften bei einer Versorgung mit erneuerbaren Energien anhand der Kennwerte zu quantifizieren.

Die Untersuchungen sind bilanzieller Art, es erfolgt keine Berücksichtigung der tatsächlichen Leistungsflüsse im Netz und möglicher Netzengpässe sowie lokaler Erzeugungsunterschiede. Die Ergebnisse können in weiteren Analysen zur mittel- und langfristigen Gestaltung des Energiesystems eingesetzt werden.

3.1 Energie und installierte Leistung aus dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien

Jahresnutzungsgrad

Windkraft- und Photovoltaikanlagen produzieren Energie, wenn der Energieträger zur Verfügung steht, so dass das schwankende Angebot zu Volllaststunden führt, die weitaus geringer sind, als bei steuerbaren Erzeugern. In Abhängigkeit des Standortes können sich diese unterscheiden, wie in Abbildung 3-2 dargestellt. Je nach Bundesland wurden bei Photovoltaik bis zu 1.044 h und bei der Windkraft onshore bis zu 2.656 h in 2015 erreicht. Offshore waren es an der Ostsee ca. 4.400 h, an der Nordsee hingegen etwa 3.230 h [54].

Mittel- und langfristig (bis 2050) werden sich bei der Photovoltaik die durchschnittlichen Volllaststunden nicht wesentlich verändern. Zwar werden PV-Technologien mit höheren Wirkungsgraden eingesetzt, jedoch erfolgt dies nicht nur im Zusammenhang mit dem Repowering von PV-Anlagen, sondern auch an Standorten, die weniger ertragreich sind, so dass die Volllaststunden sich von durchschnittlich ca. 950 h in 2015 auf ca. etwa 990 h/a

erhöhen werden. Bei Windkraft onshore werden die Volllaststunden von durchschnittlich 1.816 h in 2015 [59] auf ca. 2.100 – 2.300 h/a steigen. In den ersten Jahren ist der Zubau durch Anlagentypen mit höheren Nabenhöhen und Rotordurchmessern geprägt, später durch die verstärkte Nutzung von Standorten, die weniger ertragreich sind. Offshore werden durchschnittlich ca. 3.500 h/a erreicht werden. [58]

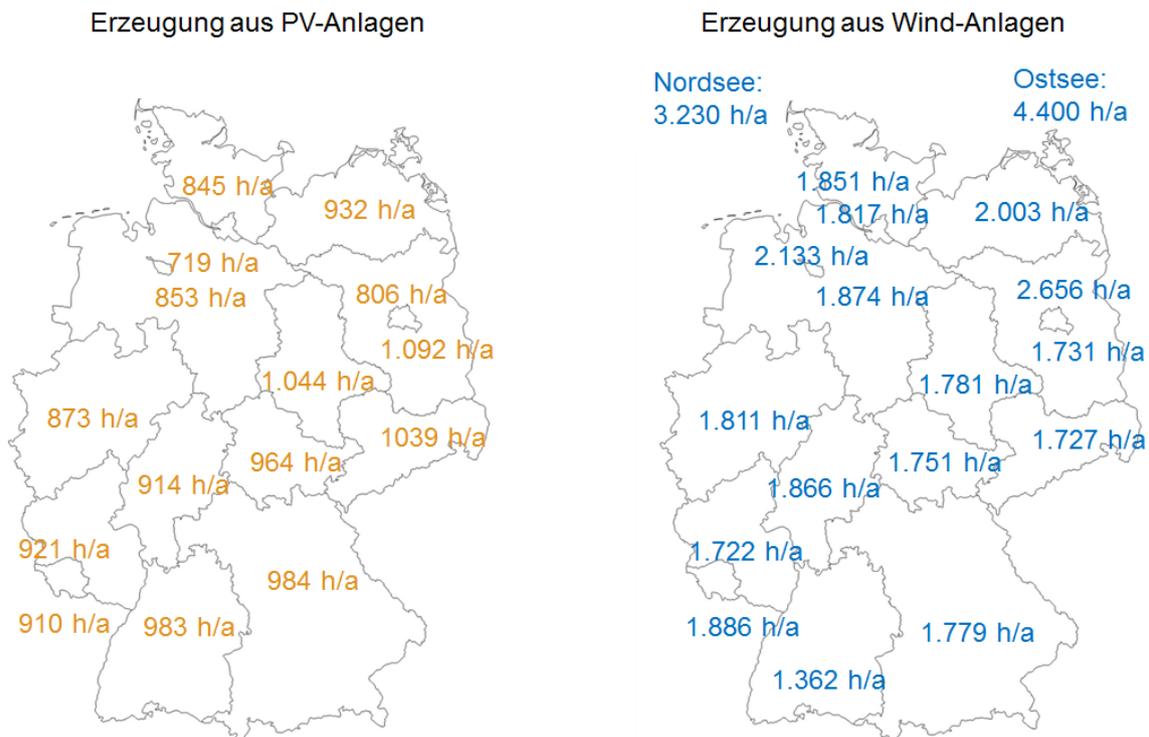


Abbildung 3-2: Jahresvolllaststunden nach Bundesländern in 2015 (eigene Darstellung nach [54])

Installierte Leistung

Der geringere Jahresnutzungsgrad der dargebotsabhängigen Erzeuger im Verhältnis zu steuerbaren Erzeugern ist außerdem in der nachfolgenden Abbildung 3-3 an der, im Verhältnis zum Anteil der Energiemenge, hohen installierten Leistung erkennbar. Insgesamt hatten die Erneuerbaren in 2015 einen absoluten Anteil von 96,5 GW an der installierten Leistung von ca. 193 GW [53], [57].

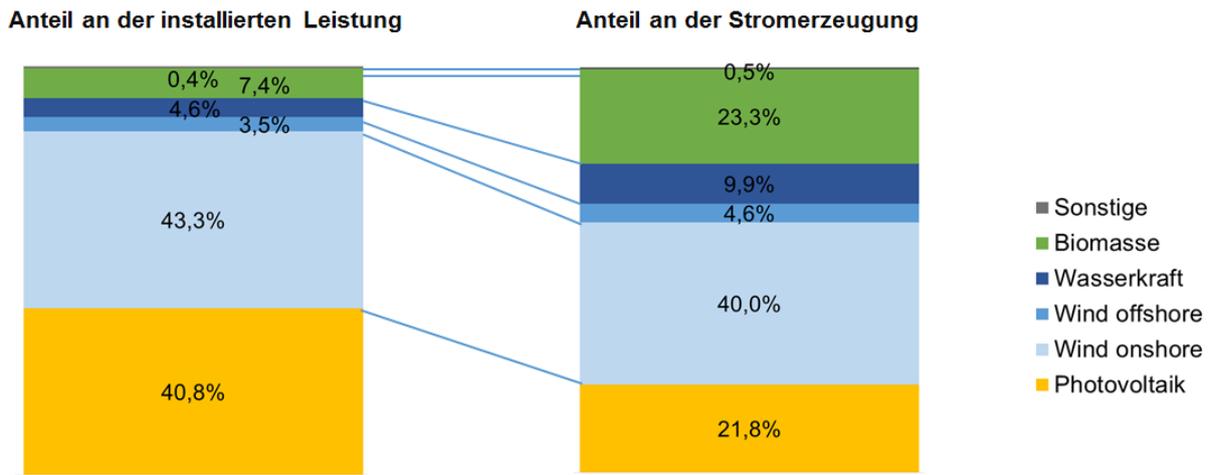


Abbildung 3-3: Anteile an Leistung und Erzeugung der regenerativen Erzeuger in 2015 (eigene Darstellung nach [54])

Nach dem Szenariorahmen des NEP 2015 erreicht die Photovoltaik in 2025 etwa 55-58 GW, in 2035 etwas über 60 GW an installierter Leistung. Bei Wind onshore sind es 55-65 GW in 2025 und ca. 85 GW in 2035, bei Wind offshore werden etwa 10–12 GW in 2025 bzw. etwas unter 20 GW in 2035 prognostiziert. Die vergleichenden Ergebnisse weiterer Studien, die auch über das Jahr 2035 hinausgehen sind im Anhang B (Abbildungen B-1 bis B-3). [30]

Einspeisecharakteristik

Im Jahresverlauf lassen sich sowohl bei PV als auch bei Wind deutliche Unterschiede in den erzeugten Energiemengen erkennen. Diese verhalten sich entgegengesetzt. Während PV eine Erzeugungsspitze im Juli aufweist, liegt diese bei der Windkraft onshore im Winter zwischen November und Februar, wie in Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 dargestellt. Im Tagesverlauf folgt die PV-Erzeugung der Sonneneinstrahlung, während die Windkraftanlage den ganzen Tag über produziert, tendenziell ist die Leistung nachts höher als tagsüber [57]. Windkraftanlagen offshore verhalten sich vom Grundsatz her wie Windkraftanlagen onshore. In 2015 wurden etwa 8.700 GWh produziert, was einem Anteil von ca. 10 % der gesamten Winderzeugung entspricht. [54] Technologie- oder standortbedingte Änderungen an der Einspeisecharakteristik sind nicht zu erwarten. Mögliche klimabedingte Änderungen dieser werden hier nicht dargestellt.

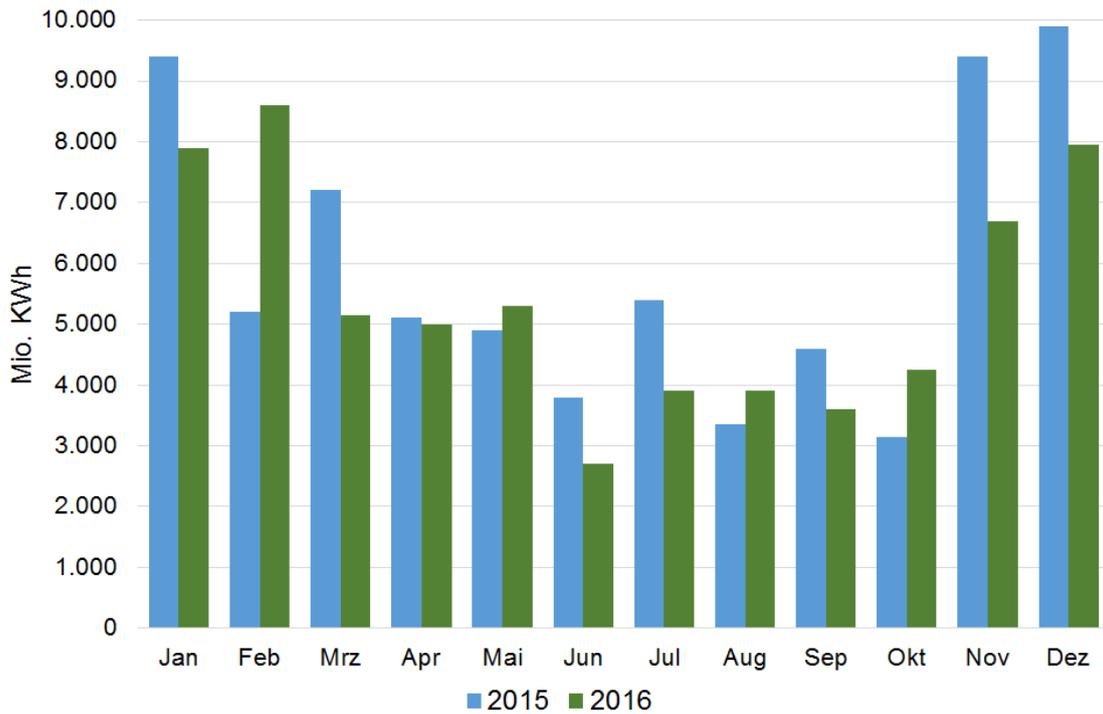


Abbildung 3-4: Stromerzeugung aus onshore Windkraftanlagen (eigene Darstellung nach [54])

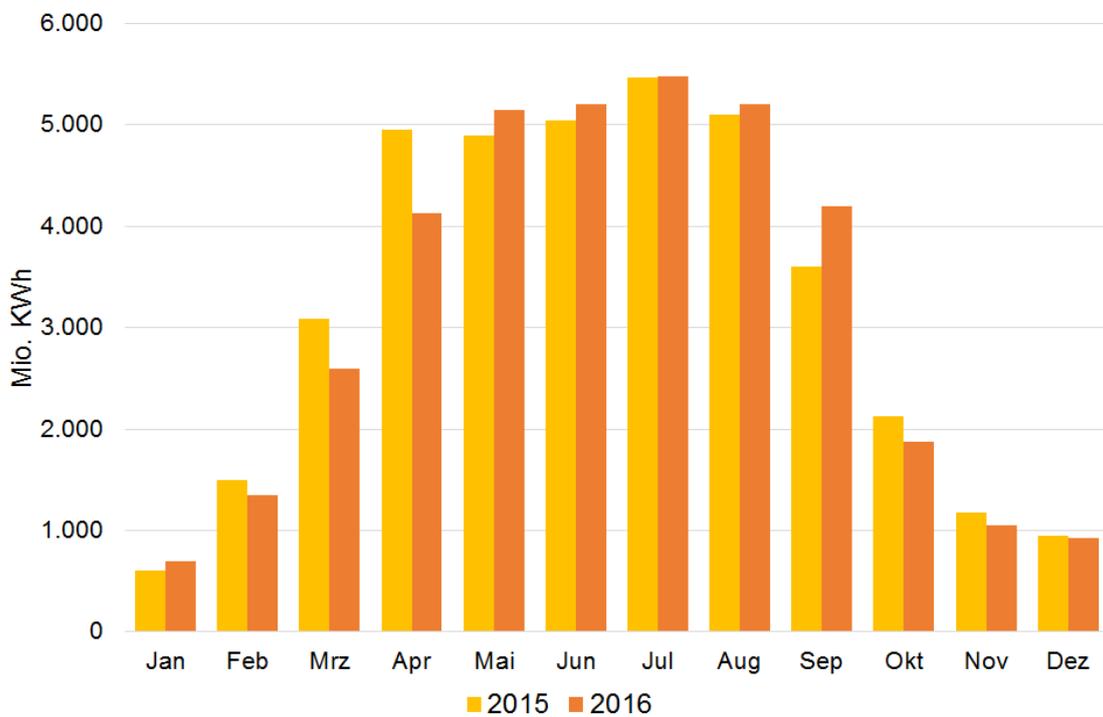


Abbildung 3-5: Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen (eigene Darstellung nach [54])

3.2 Systemeigenschaften bei ungesteuerter Ladung

3.2.1 Kennwerte zur Beschreibung der Systemeigenschaften

Die Untersuchungen erfolgen bei einer Auslegung der installierten Leistung der Erzeuger auf den Jahresenergiebedarf der Verbrauchergruppe, so dass die Bilanz aus Erzeugung und Verbrauch ausgeglichen ist. Die Systemeigenschaften werden in dieser Arbeit durch die folgenden Kennwerte beschrieben:

1. Installierte Leistung der erneuerbaren Erzeuger zur Deckung des Jahresenergiebedarfs der Elektrofahrzeuge $P_{EE,EFx}$
 - Aufbauend auf einer bilanziellen Auslegung der Erzeugung auf den Verbrauch können Untersuchungen zum Speicherbedarf, zur Reserveleistung und zur Lastverschiebung erfolgen, die einen autarken Betrieb des Systems ermöglichen.
2. Monatliche Energiemengen der Erzeuger und der Fahrzeuge, Über- und Unterdeckung und Summe der Unterdeckungen ($\sum E_{unter}$)
 - Die Betrachtung der Energiemengen und der Energiebilanzen fokussiert die Einspeise- und Verbrauchscharakteristik im Jahresverlauf und zeigt die prinzipielle Eignung der Erzeuger mit den Elektrofahrzeugen energieautark zu fungieren.
3. Speicherbedarf für einen autarken Betrieb Sp_{max}
 - Resultierender Speicherbedarf für einen autarken Betrieb ohne Lastverschiebung, der sich aus den kumulierten Über- und Unterdeckungen des Energieverbrauchs ergibt (ohne Berücksichtigung von Verlusten).
 - Die Kumulierung beginnt mit dem ersten Monat im Jahr, welcher eine Unterdeckung der erforderlichen Energiemengen aufweist.
4. Maximaler Bedarf an täglicher Zusatzleistung durch einen Reserveerzeuger für einen autarken Betrieb P_{Zusatz} :
 - Maximal auftretender zusätzlicher Energiebedarf an einem Tag ohne Lastmanagement
 - Diese Kennzahl dient der Einordnung eines zusätzlichen Erzeugers für einen autarken Betrieb und kann als Basis für die Auslegung der notwendigen Nennleistung dieses Erzeugers dienen
5. Autarkiegrad AG ohne zusätzliche Speicher, Erzeuger oder Lastverschiebung
 - Vergleich die viertelstündigen Leistungswerte zur Berücksichtigung der unter-tägigen Übereinstimmung von Erzeugung und Verbrauch.
 - Die Autarkiegrade werden für bei minimaler und maximaler Ladeleistung ermittelt.

- Leistungszeitreihen bei minimaler Ladeleistung werden mithilfe der Leistungsprofile aus Kapitel 2 bestimmt.
- Leistungszeitreihen bei maximaler Ladeleistung werden mithilfe des Energieprofils gewonnen. Hierbei wird der Umstand ausgenutzt, dass die Energieprofile den Energiebedarf im Zeitpunkt der Ankunft des Fahrzeugs darstellen und so (bei Multiplikation der Energiemenge mit der Anzahl Zeitreihenwerte in einer Stunde) einer Ladung mit maximaler Leistung entsprechen.

Mit den Ergebnissen lässt sich zum einen die installierte Leistung der dargebotsabhängigen Erzeuger einordnen, die den elektrifizierten Fahrzeugen zugewiesen werden kann. Zum anderen können die Ergebnisse zur Planung der notwendigen Maßnahmen und Komponenten verwendet werden, mit denen der Anteil an Erneuerbaren Energien zur Versorgung der Elektrofahrzeuge noch weiter erhöht werden kann.

3.2.2 Eingangsdaten

Die Erstellung der notwendigen Eingangsdaten erfolgt nach den folgenden Schritten:

1. Energie- und Leistungsbedarf der Elektrofahrzeuge:
 - Erstellung von Jahreszeitreihen für Energie $E_{T,Jahr}$ und Leistung $P_{T,Jahr,max}$ und $P_{T,Jahr,min}$ für die betrachtete Fahrzeugart durch Aneinanderreihung der fünf WTT-Profile für Energie bzw. Leistung, analog zu den tatsächlichen Wochentagstypen im betrachteten Jahr und anschließende Ermittlung des Jahresenergiebedarfs.
 - Für die Untersuchungen in diesem Kapitel werden die Zeitreihenwerte aus Kapitel 2 auf die Intervallbreite von 15 Minuten umgerechnet.
 - Berechnung von $P_{T,Jahr,max}$ aus $E_{T,Jahr}$
2. Dimensionierung der Erzeugungsleistung
 - Erstellung der Zeitreihe einer normierten Referenz-Anlage $P_{T,EE,1kW}$ für PV- und Windenergie, mit der installierten Leistung von $P_{inst,EE} = 1$ kW aus realen Einspeiseleistungen. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirkungsgrade in Abhängigkeit des Standortes, wie im Kap. 3.1 dargestellt, werden die Einspeiseleistungen verschiedener Anlagen n_{EE} an durchmischten Standorten verwendet (vgl. Gl. (13)).

$$P_{T,EE,1kW} = \sum_1^{n_{EE}} p_{t,EE,n} / P_{ges,inst,EE} \quad (13)$$

- Bestimmung der installierten Leistung und der Einspeisezeitreihe einer Anlage, die auf den Jahresenergiebedarf eines Fahrzeugs $E_{EFj,Jahr}$ ausgelegt ist, durch Multiplikation der installierten Leistung der Referenzanlage und der Zeitreihenwerte der Referenzanlage mit dem Anlagenfaktor $\alpha_{EFj,EE}$.

$$P_{EE,EFj,inst.} = P_{T,1kW,EE} \cdot \alpha_{EFj,EE} \quad (14)$$

$$\text{mit: } \alpha_{EFj,EE} = \frac{E_{EFj,Jahr}}{E_{EE,norm,Jahr}} = \frac{P_{EE,EFx}}{P_{T,1kW,EE}} \quad (15)$$

- $E_{EE,norm,Jahr}$ ist die Jahresenergieerzeugung der Referenz-Anlage.
- Bestimmung der gesamten erforderlichen installierten Leistung und der zugehörigen Zeitreihe durch Multiplikation mit der Anzahl gemeldeter Fahrzeuge n_{Typj} :

$$P_{EE,EFx,inst.,ges.} = P_{T,1kW,EE} \cdot \alpha_{Typj,EE} \cdot n_{Typj} \quad (16)$$

3.2.3 Ergebnisse

Für das betrachtete System der Elektrofahrzeuge sowie PV- und Windkraftanlagen innerhalb Deutschlands, führen die Analysen zu den nachfolgend dargestellten Ergebnissen.

Anlagenfaktor und notwendige installierte Leistung

Mit dem Jahresenergiebedarf eines Pkws mit 3.939 kWh und eines LNfzg mit 6.184 kWh, welche nach Schritt 1 für das Jahr 2014 berechnet wurden, ergeben sich die folgenden Anlagenfaktoren aus Tabelle 3-1. Dafür wurden die Einspeiseleistungen und installierten Leistungen von Wind und PV-Anlagen aller Anlagen des Tennet Netzes aus dem Jahr 2014 aus [60], [61] und [62] verwendet.

Tabelle 3-1: Anlagenfaktoren $\alpha_{EFj,EE}$ für Pkw und LNfzg

Fahrzeugtyp	$\alpha_{EFj,PV}$	$\alpha_{EFj,Wind}$
Pkw	4,83	2,75
LNfzg	7,50	4,30

Die notwendige installierte Leistung Gl. (16) zur energieautarken Versorgung aller Elektrofahrzeuge ist in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Installierte Leistung und Jahresenergiemenge zur Versorgung aller gewerblich gemeldeter Fahrzeuge in 2014

Fahrzeugtyp	n_{EFj}	$E_{EFj,ges.}$ [TWh]	$P_{EFj,ges.}$ [GW]	$P_{inst,PV}$ [MW]	$P_{inst,Wind}$ [MW]
Pkw	4.487.341	17,68	29,0	21.539	12.341
LNfzg	1.366.000 ⁹	8,56	14,0	8.155	4.644
Summe	5.389.000	26,24	-	27.586	15.708

Energiebilanzen, Speicherbedarf und Zusatzleistung

Da die eingespeisten Mengen im Jahres- und Tagesverlauf variieren, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, ist es nicht in jedem Zeitpunkt möglich die notwendige Energie bereitzustellen. Die Über- (schwarze Zahlen) und Unterdeckungen (rote Zahlen) mit einem Bilanzierungszeitraum der Energiemengen von je einem Monat sowie die resultierenden zusätzlichen Leistungsbedarfe sind in Abbildung 3-6 bis Abbildung 3-9 für beide Erzeugerarten und Fahrzeugtypen dargestellt.

Die Summe der Unterdeckungen liegt bei PV bei einem Drittel des Energiebedarfs der Fahrzeuge und bei Windkraft bei 12 % bei Pkw und 14 % bei LNfzg. Der Speicherbedarf entspricht diesen Anteilen. In Hinblick auf eine Reserveerzeugung liegt bei beiden Fahrzeuggruppen der maximale auftretende zusätzliche Leistungsbedarf bei einer Versorgung mit Windkraft annähernd bei dem Leistungsbedarf der Fahrzeuge von 29 GW bei Pkw und 14 GW bei LNfzg. Der Einspeiseverlauf der PV-Erzeugung führt zu einer Reduktion des zusätzlichen Leistungsbedarfs auf 25,75 GW bzw. 11,7 GW. Diese Höchstlasten treten bei beiden Fahrzeugtypen und Erzeugungsanlagen im April an einem Montag auf. Die weiteren notwendigen Zusatzleistungen, die im Verlauf des Jahres auftreten sind deutlich niedriger (vgl. Anhang B).

⁹ Bestandszahl aus 2010, für 2014 liegt keine Haltern differenzierte Anzahl der LNfzg vor, Gesamtanzahl Lkw bis 3,5 t gewerblicher und privater Halter liegt bei 2.099.835 am 01.Jan 2014.

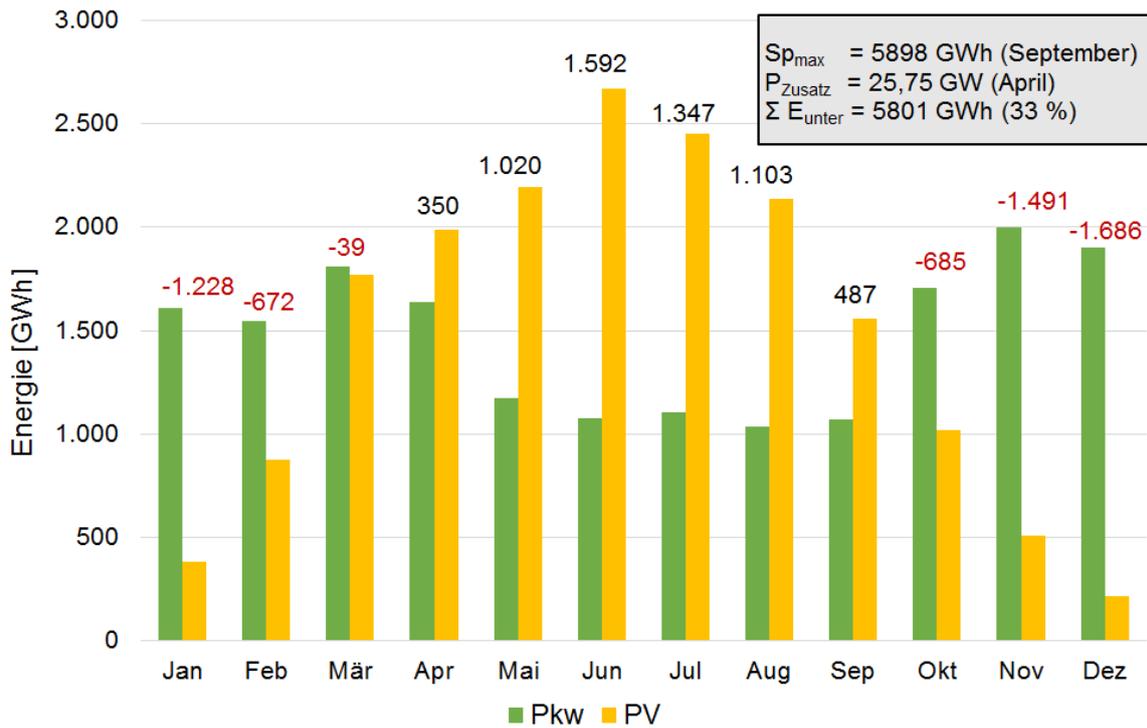


Abbildung 3-6: Energiebedarf, PV-Erzeugung und Bilanz im Jahresverlauf – gewerbl. Pkw

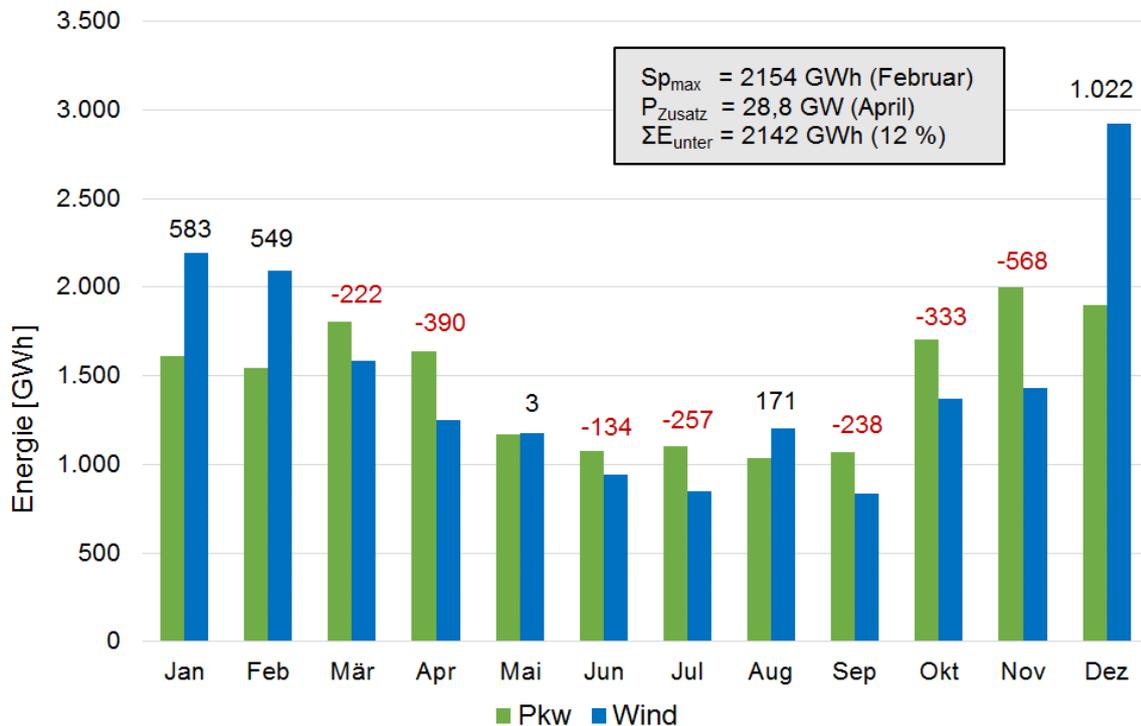


Abbildung 3-7: Energiebedarf, Wind-Erzeugung und ihre Bilanz im Jahresverlauf – gewerbl. Pkw

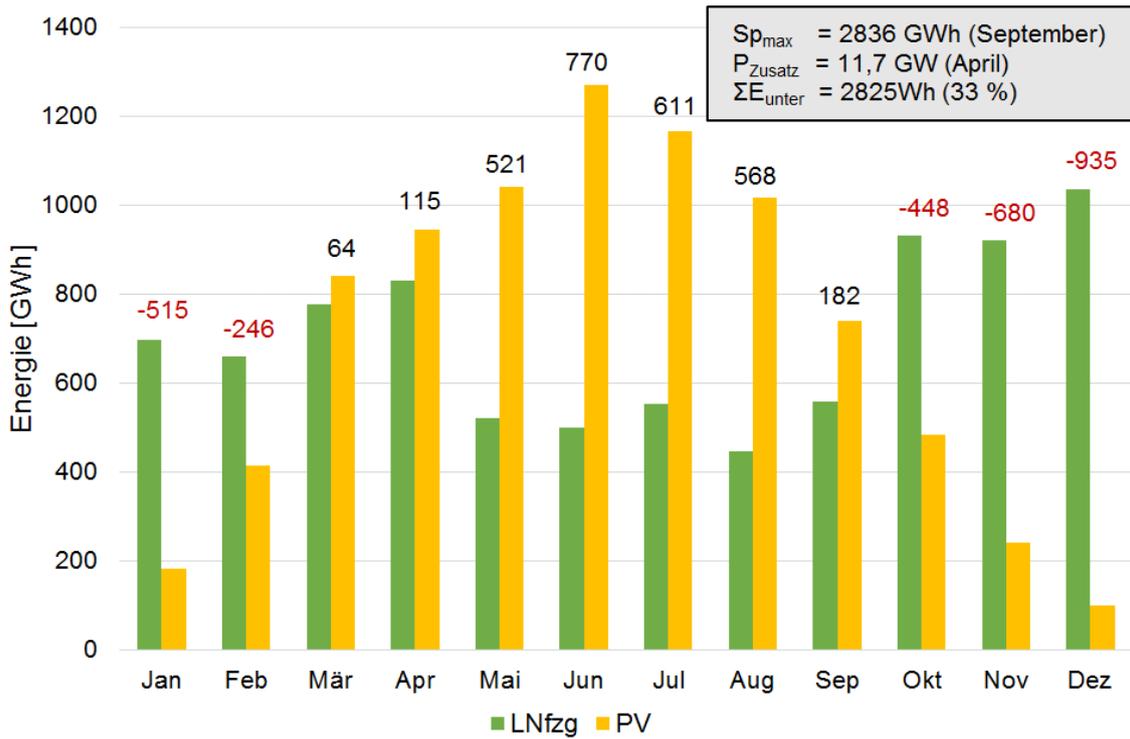


Abbildung 3-8: Energiebedarf, PV-Erzeugung und Bilanz im Jahresverlauf – gewerbl. LNfzg

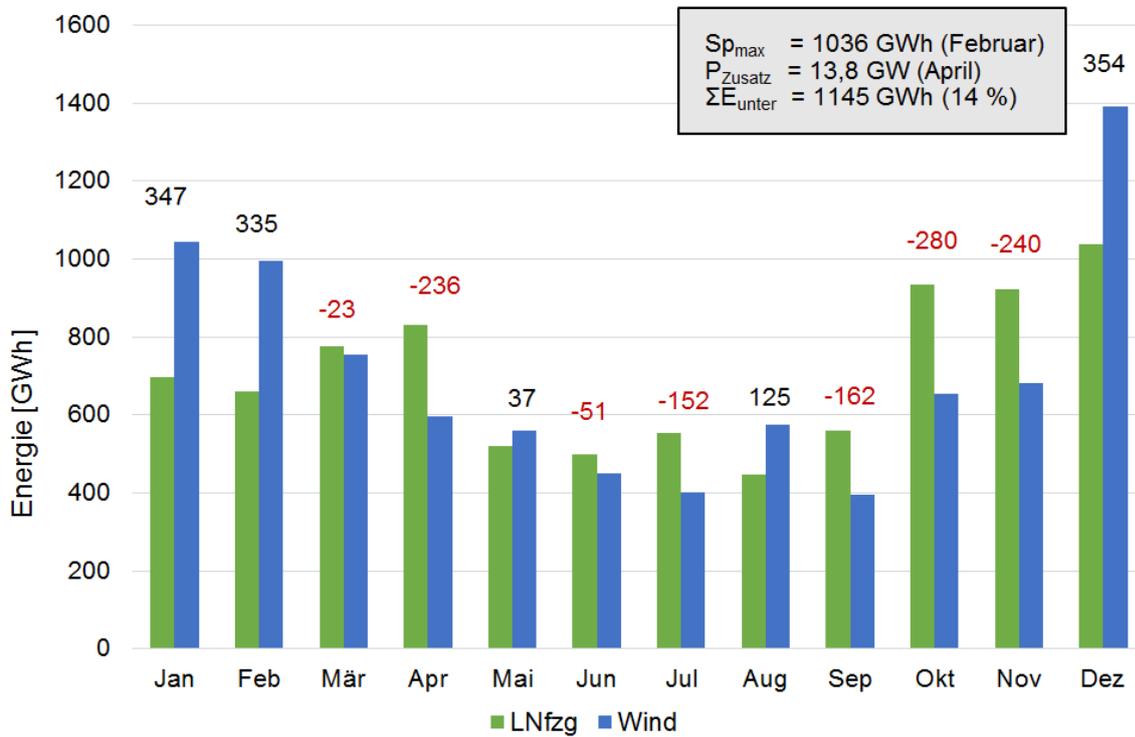


Abbildung 3-9: Energiebedarf, Wind-Erzeugung und Bilanz im Jahresverlauf – gewerbl. LNfzg

Autarkiegrade

Abbildung 3-10 zeigt die Autarkiegrade, die bei einer Versorgung der Fahrzeuge mit Wind- und PV-Energie sowie der kombinierten Versorgung erreicht werden können. Letzteres wird betrachtet, um mögliche ausgleichende Effekte zu berücksichtigen, die durch den gegensätzlichen Verlauf der Energieerzeugung im Jahresverlauf entstehen können und den Autarkiegrad somit steigern. Bei der kombinierten Versorgung stellen die beiden Erzeuger den Energiebedarf bei variablen Anteilen bereit. Die Ergebnisse sind für Ladung mit minimaler und maximaler Leistung dargestellt.

Bei der Versorgung mit reinem PV-Strom, ist der Autarkiegrad bei Ladung mit minimaler Ladeleistung höher als bei Ladung mit maximaler Ladeleistung und liegt bei 0,6 für Pkw und 0,56 für LNfzg. Bei einer Versorgung mit Windenergie ist die Ladung mit maximaler Ladeleistung für beide Fahrzeugtypen vorteilhafter, mit einem Autarkiegrad von 0,46 bzw. 0,47. Trotz der höheren Übereinstimmung der monatlichen Bilanzen, führt die untertägige Einspeisecharakteristik der Windenergie dazu, dass der Strom, der verstärkt nachts erzeugt wird, nur eingeschränkt zur Ladung der Fahrzeuge genutzt wird (vgl. dazu Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9).

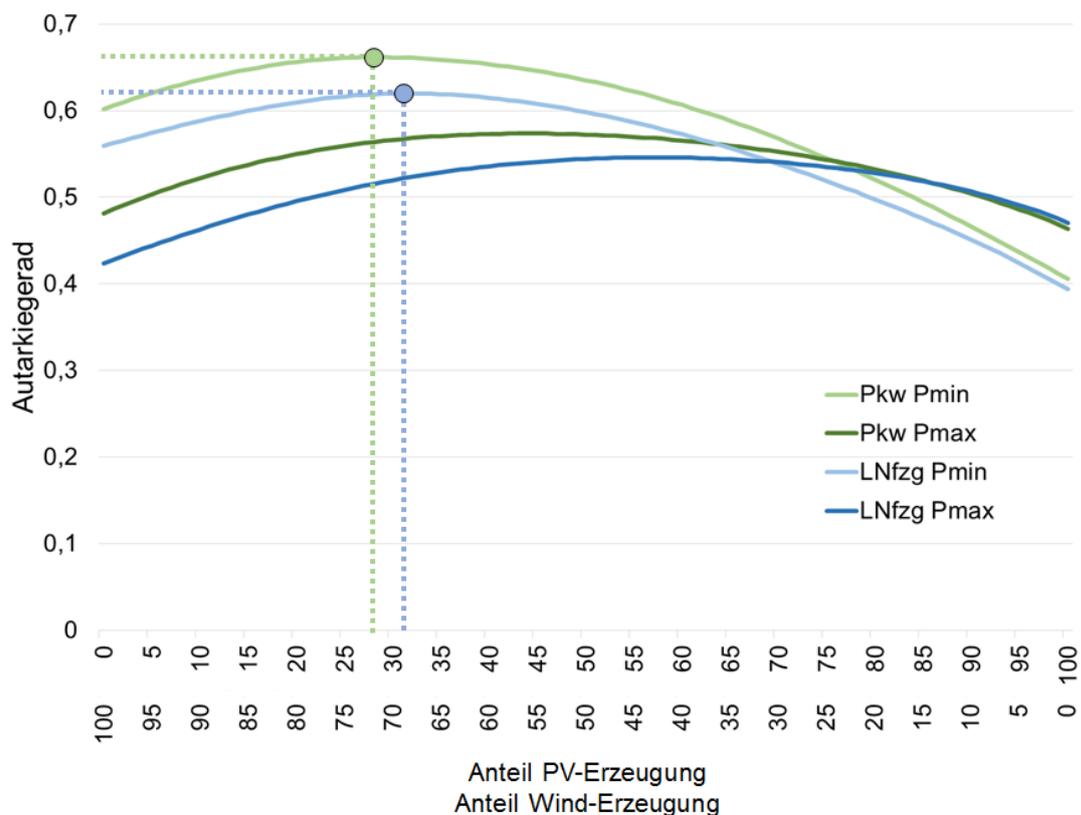


Abbildung 3-10: Autarkiegrade für die Versorgung von gewerblich gemeldeten Pkw und LNfzg in Abhängigkeit der Anteile der installierten Leistung von PV und Wind bei minimaler und maximaler Ladeleistung

Die kombinierte Versorgung erhöht die Autarkiegrade sowohl bei maximaler als auch bei minimaler Ladeleistung. Der höchste Autarkiegrad wird bei Pkw und LNfzg bei minimalen Ladeleistungen erreicht und liegt bei 66 % (grüner Punkt) bzw. 62 % (blauer Punkt) bei einem Anteil der PV-Energie von 28 % bzw. 31 %.

3.3 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Vor dem Hintergrund der Umgestaltung des Energiesystems zur Anpassung an die sich verändernde Erzeugungsstruktur wurden in diesem Kapitel Systemeigenschaften definiert und untersucht, mit denen sich die Interdependenzen einer Verbrauchergruppe mit dargebotsabhängigen Erzeugern beschreiben lassen. Darauf aufbauend können weitere Analysen zur zukünftigen Gestaltung des Energiesystems durchgeführt werden.

Zunächst erfolgte eine energetische Einordnung der dargebotsabhängigen Erzeuger PV und Wind in den Stromsektor. Etwa ein Drittel des Strombedarfs wird aktuell regenerativ erzeugt, wovon etwa zwei Drittel dargebotsabhängig bereitgestellt werden. Bis 2050 soll der Anteil der regenerativen Erzeugung auf 80 % anwachsen. Eine Darstellung der Erzeugungseigenschaften und der zukünftigen Entwicklung erfolgte anhand der Jahresnutzungsgrade, der installierten Leistung und der Einspeisecharakteristik im Jahres- und Tagesverlauf. Der Jahresnutzungsgrad wird bei der Winderzeugung onshore von etwa 1.800 h/a auf ca. 2.200 h/a Volllaststunden steigen, bei der offshore Erzeugung werden etwa 3.500 h/a erreicht. Bei der Photovoltaik verbleibt der Jahresnutzungsgrad auf heutigem Niveau und erreicht etwa 990 Volllaststunden. Die installierte Leistung wird nach NEP 2015 bei PV von heute ca. 40 GW auf ca. 60 GW in 2035, bei Wind onshore von ca. 40 GW auf 85 GW und bei Wind offshore auf ca. 20 GW steigen. Bzgl. der Einspeisecharakteristik sind keine wesentlichen Änderungen zu erwarten.

Die Interdependenzen wurden anhand verschiedener Kennwerte beschrieben. Diese sind die notwendige installierte Leistung der Erzeuger zur Deckung des Energiebedarfs der gewerblichen Fahrzeuge, die resultierenden monatlichen Energieüber- und Unterdeckungen bei ungesteuerter Ladung und der daraus resultierenden Speicherbedarf für einen bilanziellen monatlichen autarken Betrieb, die resultierende maximale Zusatzleistung eines Reserveerzeugers sowie der Autarkiegrad einer Viertelstundenbilanzierung bei einer minimalen und maximalen Ladeleistung. Die für die Untersuchungen notwendigen Energie- und Leistungszeitreihen wurden für die Fahrzeuge mithilfe der Energie- und Leistungsprofile aus Kapitel 2 erstellt. Für die Erzeuger wurde eine Leistungs-Zeitreihe mit den historischen Einspeiseleistungen aller Anlagen aus dem Netzgebiet des Tennet Netzes erzeugt. Dazu wurden die Einspeiseleistungen aufsummiert und auf die installierte Leistung aller Anlagen bezogen, so dass eine Durchmischung realisiert wurde.

Zur Versorgung eines gewerblichen Pkw ist eine Anlagenleistung von 4,83 kW bei PV und 2,75 kW bei Wind notwendig. Bei einem LNfzg sind es 7,5 kW bzw. 4,3 kW. Bei einer vollständigen Elektrifizierung der beiden Fahrzeuggruppen sind bei PV etwa 28 GW und bei Wind etwa 16 GW erforderlich. Die Übereinstimmung der Energiemengen im Jahresverlauf ist bei einer Versorgung mit Windkraft höher als mit PV. Die Summe der monatlichen Unterdeckungen liegt bei beiden Fahrzeugtypen und einer Versorgung mit Wind bei unter 14 % des Gesamtenergiebedarfs und bei PV bei etwa einem Drittel und entspricht jeweils den Anteilen des Speicherbedarfs. Die maximale notwendige Reserveenergie zur monatlichen Deckung des Bedarfs mit PV liegt bei Pkw bei ca. 1.512 GWh im Januar und bei LNfzg bei ca. 935 GWh im Dezember. Bei einer Versorgung mit Wind sind es bei Pkw ca. 500 GWh im November und bei LNfzg bei 280 GWh im Oktober. Im Jahresverlauf ist die Übereinstimmung des Energiebedarfs mit der Winderzeugung höher als mit PV-Erzeugung. Auf untertägiger Ebene zeigen Autarkiegrade jedoch, dass der Ladebedarf, der sich verstärkt über den Tag verteilt, eine höhere Korrelation mit dem Einspeiseverlauf der PV-Anlagen erreicht als mit der von Windkraftanlagen. Bei der Versorgung von Pkw werden Autarkiegrade von bis zu 60 % mit PV und ca. 46 % mit Wind erreicht. Bei LNfzg sind es ca. 56 % bzw. ca. 47 %. Eine kombinierte Versorgung mit PV und Wind führt zur Steigerung der Autarkiegrade bei Ladung mit minimaler Ladeleistung. Bei Pkw wird bei einem Anteil von 28 % PV-Energie der maximale Autarkiegrad von 66 % erreicht. Bei LNfzg liegt der höchste Autarkiegrad mit 62 % bei einem Anteil von 31 % PV-Energie.

4 Integration von E-Flotten aus betriebswirtschaftlicher Sicht unter Berücksichtigung von erneuerbaren Energien

Nach den Analysen zum technischen Potenzial der betrachteten Fahrzeuggruppen zur Elektrifizierung und Integration von erneuerbaren Energien auf Systemebene des deutschen Energiesystems, erfolgen im Folgenden Untersuchungen auf Betreiberebene. Die wirtschaftlichen und förderpolitischen Rahmenbedingungen der Betreiberebene beeinflussen maßgeblich die Hebung des technischen Potentials, da die Investitionsentscheidung des Fuhrparkbetreibers im Wesentlichen auf Grundlage der Wirtschaftlichkeit getroffen wird.

In diesem Kapitel werden dazu die energierechtlichen und –wirtschaftlichen Aspekte eines elektrischen Fuhrparks im Zusammenhang mit lokalen erneuerbaren Energien, hier einer PV-Anlage erarbeitet. Diese fließen in die Entwicklung einer Simulationsumgebung zur wirtschaftlichen Bewertung des Energiebezugs bei ungesteuertem und gesteuertem Laden in Kapitel 5 sowie in die Ausgestaltung eines Anwendungsfalls in Kapitel 6 ein.

Zunächst werden eine geeignete Methodik für eine Gegenüberstellung des konventionellen und elektrischen Fuhrparks dargestellt und die relevanten Kostenkomponenten diskutiert. Aufgrund des Fokus auf der Versorgung des elektrischen Fuhrparks mit lokalen erneuerbaren Energien, wird anschließend die Ermittlung eines Preises für die Direktbelieferung untersucht, da diese von den Kosten des Stromlieferanten abweichen.

Dazu wird die energierechtliche Gesetzgebung bei der Direktbelieferung mit erneuerbaren Energien betrachtet, um die finanziellen Förderungen und Vorteile im Zusammenhang mit lokalen erneuerbaren Energien zu identifizieren. Im Anschluss werden mögliche lokale Belieferungskonzepte vorgestellt und der gesetzliche und wirtschaftliche Kontext wird erarbeitet. Die untersuchten Aspekte sind dabei der Eigentümerstatus von Anlage und Fuhrpark, die Nutzung des öffentlichen Netzes und das Inbetriebnahmejahr der betrachteten Anlage. Mithilfe der Lieferkette des konventionellen und lokalen erneuerbaren Stromes und den Ergebnisse der Untersuchung der Gesetzgebung ist es möglich, die einzelnen Komponenten der Lieferketten zu bestimmen und zu bepreisen und einen resultierenden Strompreis für lokale erneuerbare Energien zu berechnen. Dies erfolgt abschließend für ausgewählte Beispiele.

4.1 Wirtschaftliche Bewertung eines elektrischen Fuhrparks anhand der Kapitalwertmethode

Eine finanzielle Gegenüberstellung eines elektrischen und eines konventionellen Fuhrparks kann mit den Instrumenten der dynamischen Investitionsrechnung erfolgen. Hierbei werden

die während des Nutzungszeitraumes in jeder Periode aufkommenden Zahlungsströme der ausgewählten Alternativen betrachtet. Bei der Kapitalwertmethode wird durch Abzinsung der Zahlungsströme auf einen gemeinsamen Zeitpunkt und anschließender Bildung ihrer Summe der Kapitalwert nach Gl. (17) gebildet. Die Alternative mit dem größeren Kapitalwert ist die finanziell vorteilhaftere Alternative.

$$K_0 = -I + \sum_{t=1}^T \frac{Z_t}{(1+i)^t} + L \cdot (1+i)^{-T} \quad (17)$$

Mit:

K_0 : Kapitalwert bezogen auf den Zeitpunkt $t=0$

i : Kalkulationszinssatz

Z_t : Zahlungsstrom in Periode t

I : Investitionskosten zum Zeitpunkt $t=0$ (auch Z_0)

L : Liquidationserlös/Resterlös zum Zeitpunkt $t=T$

T : Betrachtungsdauer (in Perioden)

Dient die Kapitalwertmethode lediglich der Entscheidungshilfe und nicht der Ermittlung der Gesamtkosten, ist es hinreichend, die Kostenpositionen zu betrachten, die sich voneinander unterscheiden. Vor diesem Hintergrund sollten die folgenden Kosten bei einer Gegenüberstellung berücksichtigt werden, wobei die Aspekte des elektrischen Fuhrparks beschrieben werden.

Investitionskosten:

Die Investitionen umfassen die Fahrzeuganschaffung sowie mögliche Aufwendungen für die Installation einer Ladeinfrastruktur. Je nach Erfordernissen und Wünschen des Flottenbetreibers können die Kosten K_{Inf} für die Anschaffung und Installation von Ladeinfrastruktur stark variieren. Die Kostenbandbreite einer Ladestation reicht von einigen Hundert bis einigen Zehntausend Euro. Kostentreiber sind dabei die Ladeleistung und Ladetechnologie (Versorgung mit Gleich- oder Wechselspannung), die Vandalismus-sicherheit (Bspw. verfahrbare Steckdosen) sowie der Installationsort (privat, öffentlich, Wand, Boden) und der Zugang zum Elektrizitätsnetz (privat, öffentlich). Daneben verursacht die Kommunikations- und Informationstechnik der Ladeinfrastruktur wesentliche Kosten. Dabei ist entscheidend, wie „intelligent“ die Ladeinfrastruktur gewünscht wird. Der Funktionsumfang reicht von Authentifizierung bestimmter Nutzer, der Übertragung von Nutzerdaten für Abrechnungszwecke, bis hin zur Steuerung des Ladevorgangs. [69]

Die Fahrzeuganschaffungskosten K_{Kfz_e} werden ebenfalls von der Ladetechnik beeinflusst. Obwohl Fahrzeuge mit AC-Ladeleistungen von bis zu 22 kW¹⁰ auf dem Markt verfügbar sind, werden diese üblicherweise mit einem Anschluss für AC-Ladung mit geringer Ladeleistung (bis 7,2 kW) und einem Anschluss für DC Ladung (≤ 50 kW) ausgestattet, um die Kosten durch den notwendigen Gleichrichter bei AC-Ladung auf der Fahrzeugseite zu minimieren. Neben den Kostentreibern, die auch bei konventionellen Fahrzeugen relevant sind (Klasse, Ausstattung, Leistung, etc.), ist hier außerdem die Batteriekapazität entscheidend. In dem Zusammenhang existieren Geschäftsmodelle, bei denen die Batterie geleast wird, so dass diese Kosten in die Betriebskosten fallen und den Anschaffungspreis des Fahrzeugs reduzieren.

Förderinstrumente:

Durch den Umweltbonus F_{Kfz_e} wird der Kauf und das Leasing eines förderfähigen Elektrofahrzeuges oder eines Plug-In Hybrids durch den Bund und die Industrie unterstützt (§ 2 EmuG). Die Förderung gilt bis maximal Ende 2019. Die Prämie liegt bei netto 4.000 € für ein vollelektrisches Batteriefahrzeug und 3.000 € für einen Plug-In Hybrid¹¹. Die KfW-Bank unterstützt den Kauf mit vergünstigten Krediten (Umweltprogramm 240/241), Einzelvorhaben bis 10 Mio. Euro werden gefördert. Der Zuschuss reduziert die Summe des Zahlungsstromes in $t=0$. Die vergünstigten Kredite reduzieren die Kapitalkosten, die durch den Kalkulationszinssatz i ausgedrückt werden.

Betriebskosten:

Anfallende Betriebskosten umfassen die Kosten für den Strombezug K_{Strom} , die Wartung und Instandhaltung der Ladeinfrastruktur K_{ISH_Inf} und der Elektrofahrzeuge $K_{ISH_Kfz_e}$, Versicherungsprämien K_{Vers_e} , Steuern K_{St_e} und eine etwaige Batteriemiete K_{Bat} . K_{Strom} variieren in Abhängigkeit des Lieferverhältnisses und der Lieferkette und werden im Abschnitt 4.2.2 näher untersucht. Dort werden auch mögliche Einnahmen im Zusammenhang mit der Nutzung von lokalen erneuerbaren Energien betrachtet, die die Betriebskosten reduzieren.

Aufgrund von unterschiedlichen Motortechnologien unterscheiden sich die Kosten innerhalb der Wartung- und Instandhaltung. Durchschnittlich liegen die Wartungskosten bis zu 35 % unter denen des konventionellen Kfz, da E-Fahrzeuge über einige wartungsintensive Bauteile, wie Getriebe, Kupplung, Katalysator, Kraftstofftank, Lichtmaschine und weitere Bauteile nicht verfügen. Jedoch kann die Batterie hohe Folgekosten verursachen, da sie einer zyklischen und kalendarischen Alterung unterliegt und getauscht werden sollte, wenn

¹⁰ Renault hat als einziger Anbieter eines Serienfahrzeuges eine Ausstattung mit 43 kW angeboten, diese jedoch wieder abgeschafft.

¹¹ Förderfähige Fahrzeuge sind in [33] gelistet.

sie eine vertretbare Restkapazitätsgrenze unterschreitet¹². Geschäftsmodelle mit Batterie-leasing übernehmen das Risiko einer vorzeitigen Batteriealterung. Die Austauschkosten sind in der Batteriemiete enthalten. Die private Ladeinfrastruktur kann unter Umständen ebenfalls relevante Wartungskosten durch eine vorgeschriebene regelmäßige Überprüfung der Funktionalität der Sicherheitsfunktionen als auch durch falsche Bedienung verursachen. [20]

Die Versicherung eines Elektrofahrzeugs verursacht tendenziell höhere Kosten. Fehlende Erfahrungswerte der Versicherungen zur Ermittlung der Versicherungsprämie, abweichende Versicherungsmodule (Bsp.: Batterieschutz, Abschleppdienst), aber auch die höheren Anschaffungskosten führen dazu, dass die Prämien aktuell im Schnitt höher ausfallen als bei vergleichbaren konventionellen Fahrzeugen.

In der Markthochlaufphase der Elektromobilität sind Elektrofahrzeuge für einen Zeitraum von zehn Jahren ab der Erstzulassung steuerbefreit. Die Steuerbefreiung gilt für die Erstzulassung zwischen dem 18. Mai 2011 und dem 31. Dezember 2020. Anschließend wird die Steuerlast um 50 % ermäßigt (§ 3, § 9 KraftStG).

Im Zusammenhang mit dem Betrieb einer Flotte können außerdem Kosten für das Fuhrparkmanagement (Software, Backend) entstehen. Die Kosten steigen dabei mit dem Aufwand für Kommunikation und in Abhängigkeit der Funktionalitäten, die beim konventionellen und elektrischen Fuhrpark abweichen können. Sie sollten in die Kostenbetrachtung einfließen, sofern wesentliche Unterschiede bestehen.

Restwert/Liquidationserlös:

Am Ende der Laufzeit haben die Fahrzeuge, Fahrzeugbatterien und die Ladeinfrastruktur noch einen Restwert bzw. erwirtschaften einen Liquidationserlös ($L_{Kfz_e}, L_{Bat}, L_{Inf}$) der den Kapitalwert erhöht. Bspw. müssen gealterte Batterien nicht entsorgt werden, sondern können in Second-Use Anwendungen zum Einsatz kommen [79], [80].

Eine Gegenüberstellung eines konventionellen und elektrischen Fuhrparks kann damit durch die Bildung des Kapitalwertes mit den Zahlungsströmen aus Tabelle 4-1 erfolgen.

¹² Ein Kapazitätsverlust von < 30 % wird von einigen Automobilherstellern in den ersten 5 Jahren oder über die ersten 100.000 km als vertretbar erachtet, so dass Verluste darüber in die Garantieleistung fallen [70].

Tabelle 4-1: Zahlungsströme zur Gegenüberstellung eines elektrischen und konventionellen Fuhrparks

Zahlungsstrom	Elektrischer Fuhrpark	Konventioneller Fuhrpark
I:	$K_{Kfz_e} + K_{Inf} - F_{Kfz_e}$	K_{Kfz}
Z_t:	$K_{ISH_{Kfz_e}} + K_{ISH_{Inf}} + K_{St_e}$ $+ K_{Vers_e} + K_{Bat} + K_{Strom}$	$K_{ISH_{Kfz}} + K_{St} + K_{Vers}$ $+ K_{Kraftstoff}$
L:	$L_{Kfz_e} + L_{Bat} + L_{Inf}$	L_{Kfz}

4.2 Energieversorgungskonzepte mit lokalen erneuerbaren Energien

Im lokalen Umfeld sind Belieferungskonzepte, wie in Abbildung 4-1 dargestellt, möglich. Die Konzepte unterscheiden sich durch den Eigentumsstatus der PV-Anlage sowie durch den Transportweg des regenerativen Stroms zum Fahrzeug. In den Fällen 1 und 2 wird der Strom, im Gegensatz zu den Fällen 3 und 4, nicht durch das öffentliche Stromnetz zum Ladepunkt durchgeleitet, PV-Anlage und Ladepunkte sind am Kundennetz angeschlossen. Der Übergang zwischen Kundennetz und öffentlichem Netz ist hier durch den Zählpunkt (ZP) gekennzeichnet. Im Hinblick auf den Eigentumsstatus liegen die PV-Anlagen in den Fällen 1 und 3 im Eigentum des Betreibers (Personenidentität zwischen Betreiber und Verbraucher), in den Fällen 2 und 4 hingegen im Eigentum von Dritten. Letzteres tritt auf, wenn Gebäude vom Flottenbetreiber gemietet werden und der Gebäudeeigentümer der Betreiber der Anlage ist bzw. wenn kein vorheriges Vertragsverhältnis durch eine Gebäudenutzung vorliegt und von einem beliebigen Betreiber einer PV-Anlage im lokalen Umfeld Strom bezogen werden soll. Eine Differenzierung ist erforderlich, da die unterschiedlichen Konzepte zu unterschiedlichen Energiekosten führen.

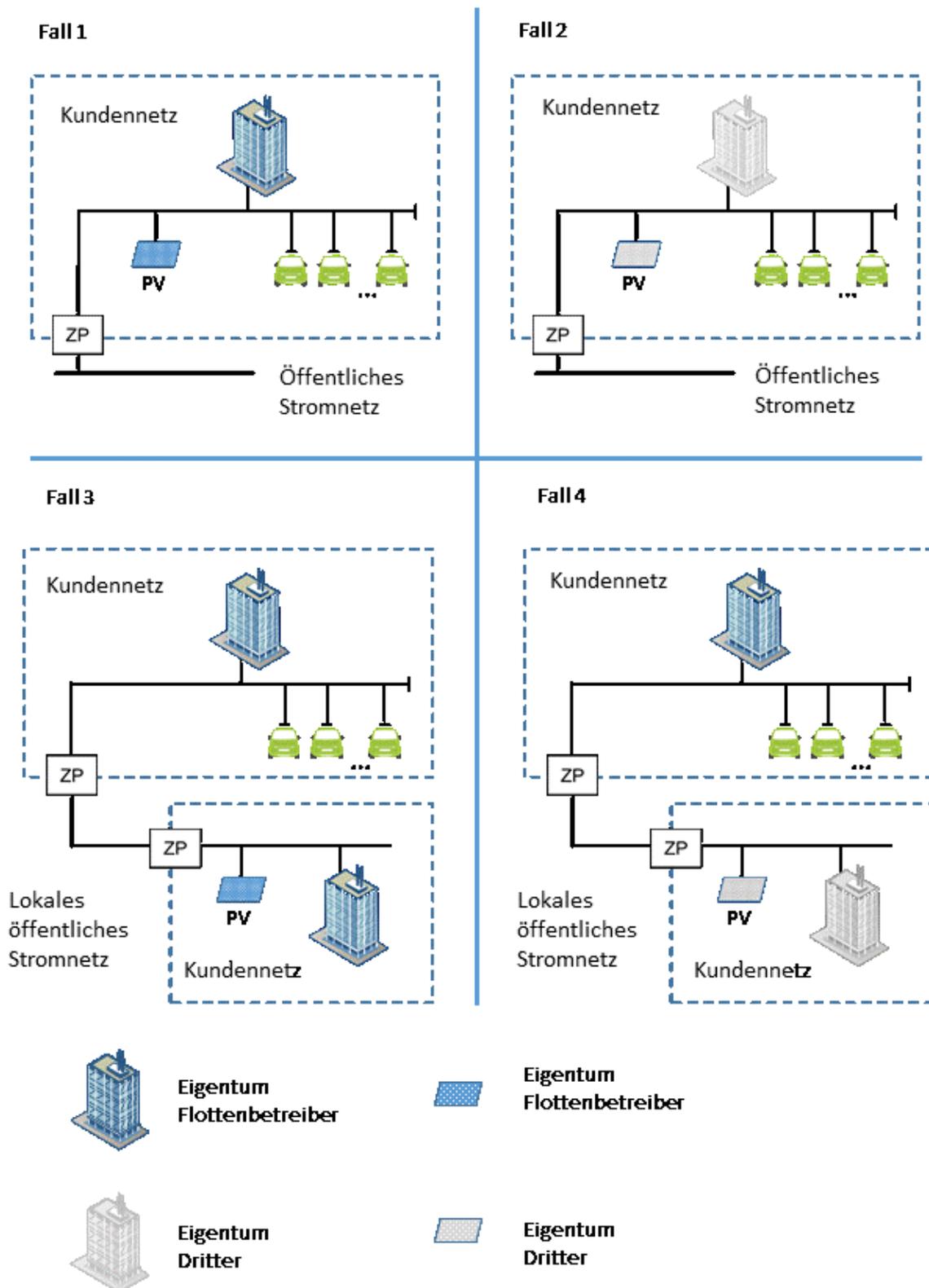


Abbildung 4-1: Belieferungskonzepte mit lokalen erneuerbaren Energien

4.2.1 Rechtlicher Rahmen bei der lokalen Bewirtschaftung von Elektrofahrzeugen

In diesem Kapitel werden Gesetze untersucht, die bei den Belieferungskonzepten und bei der Strompreisbestimmung zur Anwendung kommen.

Erneuerbare-Energien-Gesetz

Das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) regelt die energietechnische und energie-wirtschaftliche Integration von erneuerbaren Energieanlagen (EEA) in das Energiesystem. Es wurde im Jahr 2000 zur Förderung von EEA eingeführt, um die klimapolitischen Ziele zu erfüllen und ist ein Lenkungswerkzeug für den Anteil an erneuerbaren Energien an der gesamten Energieerzeugung in Deutschland [23]. Entsprechend wurde es seit seinem Inkrafttreten mehrmals überarbeitet, um sich den sich ändernden Gegebenheiten der Energiewirtschaft anzupassen. Diese Anpassungen und Neuregelungen betrafen im Wesentlichen die Höhe der Vergütungen des eingespeisten Stroms, die technischen Anschlussbedingungen und den Grad der Systemverantwortlichkeit, sowie den Grad der Marktintegration im Energiehandel. So gab es bei Inkrafttreten lediglich die Möglichkeit einer Vergütung bei Einspeisung in das Stromnetz, die Teilnahme am Energiehandelsmarkt wurde nicht gefördert und war aufgrund von u.a. hohen Anlagenkosten wirtschaftlich nicht sinnvoll. Der Betreiber hatte keine finanziellen Anreize zur eigenverantwortlichen Veräußerung des erzeugten Stroms. Die Entwicklung der Ziele, die die unterschiedlichen Fassungen verfolgen, lassen sich auch im Gesetzestitel erkennen: Das EEG hat sich vom Gesetz zum Vorrang Erneuerbaren Energien in 2014 zum Gesetz zum Ausbau von Erneuerbaren Energien entwickelt. Die vorrangige Integration liegt nicht mehr im Fokus. Vielmehr wird eine Heranführung der Erzeugung und Nutzung der Erneuerbaren Energien an den Markt verfolgt.

Die wesentlichen Änderungen des EEG sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst. Die verschiedenen Fassungen kommen in Abhängigkeit des Inbetriebnahmezeitpunktes einer Anlage zur Anwendung und haben Einfluss auf den resultierenden Strompreis. Der Fokus liegt auf PV-Anlagen mit kleinen und mittleren Anlagenleistungen < 100 kWp.

Im Dezember 2003 wurde aufgrund einer festgelegten Zielerreichung an installierter Leistung der Vergütungssatz für PV-Anlagen angepasst, so dass unterschiedliche Vergütungssätze in Abhängigkeit der Anlagengröße und von baulichen Aspekten eingeführt wurden.

In 2004 wurde das EEG neu geregelt. Im Wesentlichen wurden die Vergütungssätze weiter angepasst und in Abhängigkeit der Anlagengröße und Aufstellungsart differenziert, einhergehend mit einer Erhöhung der Vergütung für PV-Dachanlagen.

Tabelle 4-2: Wesentliche Änderungen des EEG seit der Einführung

Gesetz	Inkrafttreten	Änderungen
EEG 2000	1.04.2000	<ul style="list-style-type: none"> • Einführung einer festen Vergütung für Strom aus EEA für einen Zeitraum von 20 Jahren. Im Gegensatz zum Stromeinspeisegesetz ist der Vergütungssatz nicht an den Durchschnittserlös je kWh aus der Stromabgabe an Letztverbraucher gebunden.
	23.12.2003	<ul style="list-style-type: none"> • Neugestaltung der Vergütungsklassen und Größenklassen der Anlagen
	22.07.2004	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung der Vergütungssätze
EEG 2009	01.01.2009	<ul style="list-style-type: none"> • Einspeisemanagement: Einführung von technischen und betrieblichen Vorgaben zum Betrieb der EEA durch den Betreiber bei Neuanlagen mit einer installierten Leistung $P_{\text{ins}} > 100 \text{ kWp}$ (Altanlagen erst ab dem 01.01.2011). Die Vorgabe betrifft die Möglichkeit des ferngesteuerten Beeinflussung der Einspeiseleistung (§ 6 EEG 2009)
		<ul style="list-style-type: none"> • Einführung der Möglichkeit der Direktvermarktung (§ 17 EEG 2009) und der Vergütung des Eigenverbrauchs mit einem festen Vergütungssatz (§ 33 Abs. 4 (2) EEG 2009) für Neuanlagen mit $P_{\text{inst}} \leq 30 \text{ kW}$
EEG 2012	01.07.2010	<ul style="list-style-type: none"> • Einführung des vergüteten Eigenverbrauchs für Anlagen mit $P_{\text{inst}} \leq 500 \text{ kWp}$, die vor dem 01.01.2012 in Betrieb genommen wurden und Differenzierung der Vergütung nach Anteil des Eigenverbrauchs an der Gesamtstromerzeugung
		<ul style="list-style-type: none"> • Differenzierung der Möglichkeiten der Direktvermarktung zur Inanspruchnahme einer Marktprämie, des Grünstromprivilegs und in die sonstige Direktvermarktung (§ 33a EEG 2012) • Einbeziehung von Neuanlagen mit einer Leistung $P_{\text{ins}} > 30 \text{ kWp}$ in das Einspeisemanagement (§ 6 EEG 2012)

Tabelle 4-2 (Fortsetzung): Wesentliche Änderungen des EEG seit der Einführung

EEG 2012	01.04.2012	<ul style="list-style-type: none"> • Neugestaltung der Vergütungs- und Größenklassen der Anlagen • Reduzierung der vergütungsfähigen Energiemenge auf 90% der Gesamterzeugung ab dem 01.04.2012 für Neuanlagen mit $P_{ins} > 10$ kWp (§ 33 EEG 2012) • Abschaffung der Eigenverbrauchvergütung • Einbeziehung von allen Anlagengrößen in das Einspeisemanagement, bei Anlagen mit einer Leistung $P_{ins} \leq 30$ kWp kann alternativ die Einspeiseleistung auf 70 % begrenzt werden (§ 6 EEG 2012)
EEG 2014	01.08.2014	<ul style="list-style-type: none"> • Für Neuanlagen Pflicht zur Direktvermarktung für Anlagen mit $P_{ins} > 500$ kWp ab 01.08.2015, für Anlagen mit $P_{ins} > 100$ kWp ab 01.01.2016 (§ 37 EEG 2014) • Einführung der EEG-Umlage für Eigenverbrauch bei Anlagen mit $P_{ins} > 10$ kWp (§ 61 EEG 2014) • Ausschreibungsverfahren für Freiflächenanlagen (§ 55 EEG2014) • Abschaffung des Grünstromprivilegs • Einführung von Herkunftsnachweisen
EEG 2017	22.12.2016	<ul style="list-style-type: none"> • Wettbewerbliche Ermittlung des anzulegenden Wertes und der Marktprämie durch ein Ausschreibungsverfahren (§ 2; § 22 EEG2017) > 750 kWp • Einspeisevergütung für Anlagen ≤ 100 kW (§ 21, § 48 EEG2017) • Einspeisevergütung für Anlagen > 100 kW für maximal 6 Monate im Jahr (§ 21, § 48 EEG2017) (Ausfallvergütung) • Abhängigkeit der Einspeisevergütung vom anzulegenden Wert (§ 53 EEG2017) • Einführung von Regionalnachweisen (§ 53b und § 79a EEG2017)

Die ersten Schritte zur Integration von EE in den Energiemarkt erfolgten in der Neuregelung des EEG 2009 durch die Formulierung von Grundsätzen zur Direktvermarktung durch den Anlagenbetreiber an Dritte. Des Weiteren wurde eine Förderung des PV-Eigenverbrauchs eingeführt, und auch erstmalig Einschränkungen in der Abnahmeverpflichtung: Mit § 6 und § 11 wurde die rechtliche Grundlage für ein Einspeisemanagement für Anlagen mit einer installierten Leistung >100 kWp geschaffen.

Das im EEG 2012 verankerte Marktintegrationsmodell führte zusätzlich zwei Möglichkeiten einer geförderten Direktvermarktung ein: Einerseits zur Inanspruchnahme der Marktprämie und andererseits zur teilweisen oder vollständigen Befreiung von der EEG-Umlage (Grünstromprivileg). Diese Neugestaltung betrifft eine direkte finanzielle Unterstützung bei der Veräußerung der Energie durch den Betreiber. Gleichzeitig wurde die Einspeisemenge, die für eine Förderung durch die Einspeisevergütung angesetzt werden konnte, grundsätzlich auf 90 % der erzeugten Energie begrenzt. Eine Direktvermarktung oder der Eigenverbrauch für die restlichen 10 % wurde dadurch finanziell vorteilhaft. Die Vergütung des Eigenverbrauchs wurde abgeschafft, eine finanzielle Vorteilhaftigkeit war aufgrund der gestiegenen Stromkosten und der gesunkenen Fördersätze gegeben. Zur Steigerung der Systemverantwortlichkeit bzw. der Systemsicherheit wurde die Teilnahme am Einspeisemanagement für alle Anlagengrößen verpflichtend. Bei kleinen Anlagen ≤ 30 kWp darf alternativ die Einspeiseleistung auf 70 % der installierten Leistung begrenzt werden.

In der Neuregelung des EEG im Jahr 2014 wurde die Direktvermarktung für alle Anlagengrößen als Ziel für erneuerbare Energien eingeführt (§ 2 (2) EEG2014), die Einspeisevergütung gilt lediglich in Ausnahmen oder für kleine und mittlere Anlagengrößen (ab Januar 2016 ≤ 100 kWp). Die Befreiung von der Zahlung von der EEG-Umlage bei Eigen- bzw. Selbstverbrauch wurde für Besitzer von mittleren und großen Anlagen abgeschafft. Sie müssen sich ab dem EEG 2014 anteilig an der EEG-Umlage beteiligen (bis 40 %). Besitzer von kleinen Anlagen ≤ 10 kWp bleiben davon ausgenommen. In Hinblick auf die EEG-Umlage wurde auch das Grünstromprivileg abgeschafft. Damit wurden auch die Verbraucher von rein grüner Energie dazu verpflichtet, sich an der Finanzierung der gesetzlichen Förderungen zu beteiligen. Lediglich in den Fällen, wenn die Anlage keine mittelbare oder unmittelbare Anbindung zum öffentlichen Netz hat, oder wenn der Eigenversorger sich vollständig mit erneuerbaren Energien versorgt und keine Vergütung durch das EEG erhält, entfällt die Umlage komplett.

Durch den starken Zubau an Photovoltaik-Anlagen wurde dieser ab dem EEG 2014 nicht mehr ausschließlich indirekt über die Vergütungshöhe gelenkt, sondern auch durch die Einführung von Ausschreibungsverfahren. Betreiber von Freiflächenanlagen müssen sich ab April 2015 an Ausschreibungsverfahren zur Ermittlung einer Fördersumme pro kWh beteiligen. Die niedrigsten Angebote erhalten einen Zuschlag von der Bundesnetzagentur.

Die letzte Fassung des EEG (EEG 2017) führt dieses Verfahren noch weiter aus. Eine Verpflichtung zur Teilnahme an Ausschreibungsverfahren gilt für alle Anlagen > 750 kWp. Eine Einspeisevergütung ist für Anlagen mit einer Leistung ≤ 100 kWp möglich. Bei Leistungen darüber, wird eine Einspeisevergütung als Ausfallvergütung für maximal 6 Monate im Jahr gewährt. Dies gilt für den Fall, dass der Betreiber seine Energie nicht direkt vermarkten kann. Dabei ist der anzulegende Wert, anhand dessen sowohl die Einspeisevergütung als auch die Marktprämie bei Direktvermarktung ermittelt werden, um 20 % reduziert. Die Einspeisevergütung wird anders als im EEG 2012 eingeführt, wieder zu 100 % gefördert.

Für wirtschaftliche Untersuchungen sind jeweils die Vergütungssätze und Fördermöglichkeiten anzuwenden, die bei Inbetriebnahme der Anlage Gültigkeit besaßen. Davon ausgenommen ist das Grünstromprivileg, welches keine Anwendung mehr findet. Die Förderdauer der Anlagen umfasst jeweils 20 Jahre zusätzlich der Restjahresdauer der Inbetriebnahme.

Gültige Vergütungsmöglichkeiten bei der Direktvermarktung sind nachfolgend zusammengefasst:

1. Direktvermarktung zum Zweck der Inanspruchnahme der Marktprämie

Bei der geförderten Direktvermarktung nach §§ 33b (1), 33g EEG 2012, §§ 19 und 34 EEG 2014 und §§ 19, 20, 22 EEG 2017 erhalten Anlagenbetreiber, die sich am Energiemarkt beteiligen, Prämienzahlungen. Die Marktprämie ist an die Einspeisung in das öffentliche Netz gekoppelt. Sie wird gebildet als Differenz zwischen dem anzulegendem Wert und dem Marktwert. Der anzulegende Wert wird in Abhängigkeit der gültigen Fassung des EEG gebildet.

In EEG 2012 erhielten die Anlagenbetreiber zusätzlich zur Marktprämie eine Managementprämie, der anzulegende Wert entsprach dabei der Einspeisevergütung. Mit den Einnahmen aus Marktprämie und Marktpreis sind die Betreiber auf diesem Weg nicht schlechter gestellt, als bei Bezug der Einspeisevergütung, da der zusätzliche Aufwand und das zusätzliche Risiko¹³ von der Managementprämie gedeckt werden.

Ab dem EEG 2014 wird die Managementprämie nicht extra ausgewiesen, sie wird im anzulegenden Wert berücksichtigt, der höher ist als die Einspeisevergütung. Ab dem EEG

¹³ Zusätzlicher Aufwand bei der Direktvermarktung entsteht durch die Pflichten der Direktvermarktung, denen der Anlagenbetreiber nachkommen muss, wie bspw. der Bilanzierung der Energiemengen in einem Bilanzkreis, Einhaltung von Meldefristen ggü. dem Netzbetreiber (§ 33c EEG2012) [71], Erstellung von Leistungsprognosen, etc.. Risiken entstehen durch Abweichungen in den Prognosen, die dazu führen können, dass Ausgleichsenergie bezahlt werden muss. [97] Üblicherweise verpflichtet ein PV-Anlagenbetreiber ein Direktvermarktungsunternehmen zur Ausführung der Direktvermarktung [97].

2017 wird der anzulegende Wert für Anlagen ≥ 750 kWp in einem Ausschreibungsverfahren ermittelt, für kleinere Anlagen ist er gesetzlich festgelegt.

2. Sonstige Direktvermarktung

Im EEG ist für die sonstige Direktvermarktung keine direkte finanzielle Vergütung vorgesehen. Sie kommt maßgeblich zum Einsatz, wenn der Anlagenbetreiber seine Pflichten im Zusammenhang mit der Inanspruchnahme der Marktprämie nicht erfüllt hat und einer zeitlich begrenzten Sperrung der Förderung unterliegt [71]. In dieser Zeit kann er vermiedene Netzentgelte (vgl. nachfolgend StromNEV) in Anspruch nehmen und Herkunftsnachweise nach § 55 EEG 2012 und § 79 EEG 2014, 2017 oder Regionalnachweise nach § 79a EEG 2017 verlangen und diese veräußern. In diesem Zusammenhang kann auch eine Stromsteuerbefreiung (vgl. nachfolgend StromStg) in Anspruch genommen werden.

Einspeise- und Eigenverbrauchsvergütung des EEG

In Tabelle 4-3 sind die gültigen Vergütungssätze für Anlagen, die die Einspeisevergütung in Anspruch nehmen, in Abhängigkeit des Inbetriebnahmezeitpunktes und der Anlagengröße dargestellt. Diese finden bei der Ermittlung des Strompreises für die untersuchten Belieferungskonzepte Anwendung (vgl. Kap. 4.2.2). Die Vergütung des Eigenverbrauchs ist ab dem 01.07.2010 abhängig von der Menge der selbst verbrauchten Energie. Die ersten 30 % werden mit einem niedrigeren Satz gefördert als die restlichen 70%. Ab dem 01.04.2012 besteht eine monatliche Degression der Boni für Solaranlagen, die Vergütungssätze ab 2012 gelten jeweils für Dezember des dargestellten Jahres.

Energiewirtschaftsgesetz

Das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) enthält grundlegende Regelungen zum Energierecht der Europäischen Gemeinschaft und formuliert u.a. die Pflichten eines Energieversorgungsunternehmens. In Zusammenhang mit Ladestrategien von Elektrofahrzeugen als steuerbaren Verbrauchern kann § 14a zur Anwendung kommen. Es regelt die Pflicht zur Reduktion der anzusetzenden Netzentgelte durch den Netzbetreiber, sofern durch den Netzanschlussnehmer eine Möglichkeit eingerichtet wurde, Steuerungshandlungen zur Netzentlastung durch den Netzbetreiber durchzuführen.

Tabelle 4-3: Förderbeträge des EEG bei Einspeisung und Eigenverbrauch

Inbetriebnahme	Einspeisevergütung für Dachanlagen [€/kWh]					Eigenverbrauchsvergütung [€/kWh]	
	Anlagengrößen P [kWp]						
	P ≤ 10	10 < P ≤ 30	30 < P ≤ 40	40 < P ≤ 100	Fassadenzuschlag	P ≤ 30 (Anteil ≤ 30 % / Anteil > 30 %)	30 < P ≤ 100 (Anteil ≤ 30 % / Anteil > 30 %)
2000	50,62		50,62		0	0	0
2001	50,62		50,62		0	0	0
2002	48,10		48,10		0	0	0
2003	45,70		45,70		0	0	0
2004 ¹⁴	57,40		57,40		5	0	0
2005	54,53		51,70		5	0	0
2006	51,80		49,28		5	0	0
2007	49,21		46,82		5	0	0
2008	46,75		44,48		5	0	0
2009	43,01		40,91		0	25,01/25,01	0
2010 ¹⁵	33,03		31,42		0	16,65/21,03	15,04/19,42
2011	28,74		27,33		0	12,36/16,74	10,95/15,33
2012	17,45	16,56		14,77	0	8,05/12,43	6,85/11,23
2013	13,88	13,17		11,74	0	0	0
2014	12,59	12,25		10,95	0	0	0
2015	12,50	12,15		10,87	0	0	0
2016	12,31	11,96		10,71	0	0	0

Stromsteuergesetz

Das Stromsteuergesetz (StromStG) enthält Bestimmungen über die Festsetzung der Stromsteuer, die Entstehung und die Befreiung von der Steuerpflicht und reduzierte Steuersätze. Nach § 3 beträgt die Stromsteuer 20,50 €/MWh. Generell ist nach § 5 (1) ein Eigenerzeuger auch für den selbstverbrauchten Strom steuerpflichtig. Ausnahmen hiervon bildet § 9 (1). Dieser begründet die Steuerbefreiung für 1.) Strom aus EEG-Anlagen, sofern dieser aus einem Netz entnommen wird, das ausschließlich von erneuerbaren Energien gespeist wird und 2.) Strom aus Anlagen mit bis zu 2 MW Nennleistung und räumlichen Zusammenhang zwischen dem Einspeise- und Entnahmepunkt. Der räumliche

¹⁴ Der Vergütungssatz gilt bei Inbetriebnahme ab dem 01.08.2004.

¹⁵ Bei Inbetriebnahme ab dem 01.07.2010.

Zusammenhang bei der sog. regionalen Direktvermarktung darf nach § 12b (5) StromStV einen Radius von 4,5 km von der Erzeugungsstelle nicht überschreiten.

Stromnetzentgeltverordnung

Die Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) regelt die Bestimmung der Netzentgelte und der Entgelte für dezentrale Einspeisungen. Letzteres betrifft die vermiedenen Netzentgelte des Netzbetreibers an den Betreiber der höheren Netzebene, die durch dezentrale Einspeisung im eigenen Netz begründet liegen. Durch dezentrale Einspeisung wird weniger Energie aus dem überlagerten Netz bezogen und durchgeleitet. Nach § 18 (1) haben die Betreiber von EEG Anlagen die Möglichkeit, sich das durch ihre Anlage eingesparte Netzentgelt vom Netzbetreiber auszahlen zu lassen. Dies gilt bei volatiler Erzeugung bei Inbetriebnahme der Anlage vor dem 01.01.18. Die Auszahlung des eingesparten Netzentgeltes findet Anwendung in der sonstigen Direktvermarktung. Betreiber dezentraler Einspeisungen, die die Einspeisevergütung oder die Marktprämie erhalten, haben keinen Anspruch auf die Auszahlung der vermiedenen Netzentgelte. Die Höhe dieser Einsparungen richtet sich nach der Vermeidungsleistung, der Vermeidungsarbeit und den Netzkosten der vorgelagerten Netzebene.

Des Weiteren werden in § 19 individuelle Netzentgelte bei Sonderformen der Netznutzung geregelt. Der Belastungsausgleich für die entgangenen Zahlungen an den Netzbetreiber erfolgt als Aufschlag auf die Netzentgelte (§ 19 StromNEV-Umlage) und ist an diese gekoppelt.

Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

Das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) regelt die Integration von Strom aus Anlagen zur Kopplung von Strom und Wärme und ihre Vergütung. Die KWKG-Umlage zur Finanzierung der Vergütungen (Belastungsausgleich) ist als Aufschlag auf die Netzentgelte gestaltet und entfällt bei einem Lieferverhältnis, wenn das öffentliche Netz bei der Stromlieferung nicht genutzt wird. Des Weiteren regelt das KWKG den Belastungsausgleich für abschaltbare Lasten nach § 18 AbLaV (AbLaV-Umlage).

Konzessionsabgabeverordnung

Konzessionsabgaben werden auf Nutzung von öffentlichen Verkehrswegen für die Verlegung und den Betrieb von Leitungen zur Versorgung von Letztverbrauchern erhoben (§ 1 (2) KAV). Sie sind damit an die Netznutzung im öffentlichen Raum gekoppelt und entfallen, bei Eigen- und Selbstverbrauch.

4.2.2 Einordnung der Anwendungsfälle in den rechtlichen und wirtschaftlichen Kontext einer Direktbelieferung mit Strom aus erneuerbaren Energien

Die in diesem Kapitel behandelten Anwendungsfälle der Direktbelieferung werden nachfolgend im Einklang mit der anzuwendenden Gesetzgebung in den rechtlichen und wirtschaftlichen Kontext gebracht. Jedem Anwendungsfall lässt sich ein kWh-bezogener Produktpreis zuordnen, der abhängig ist von den anfallenden Einnahmen und Ausgaben im Zusammenhang mit der Nutzung aus EEG-Strom. Die Produktpreise finden in einer Wirtschaftlichkeitsberechnung Anwendung.

Rechtliche Einordnung der Anwendungsfälle und daraus resultierende Preisbestandteile

Fall 1: Direktbelieferung aus eigener Anlage ohne Netzdurchleitung

Dieser Fall wird aufgrund der Personenidentität zwischen Anlagenbetreiber und Verbraucher als Eigenversorgung bezeichnet. Dies gilt auch, wenn die Anlage auf einem benachbarten Grundstück installiert ist und der Strom über eine Direktleitung zum Verbraucher geleitet wird. Der Anspruch und die Ausgestaltung einer finanziellen Förderung sind abhängig vom Inbetriebnahmezeitpunkt (vgl. Tabelle 4-3).

Eine Vergütung für die Eigenversorgung können Anlagenbetreiber mit einer installierten Peakleistung von $P_{\text{inst}} \leq 30$ kWp in Anspruch nehmen, die ihre Anlage nach dem 01.01.2009, mit $P_{\text{inst}} \leq 500$ kWp nach dem 01.07.2010, und vor dem 01.04.2012 in Betrieb genommen haben (§ 33 EEG 2009; § 33a EEG 2012).

Ab dem 01.04.2012 wird der Eigenverbrauch nicht mehr finanziell gefördert.

Bei Inbetriebnahmezeitpunkt der Anlage nach dem 01.08.2014, wird die EEG-Umlage anteilig auf den selbst verbrauchten Strom für Anlagenleistungen $P_{\text{inst}} > 10$ kWp fällig. Der Anteil beträgt 40 % der EEG-Umlage (§ 61 EEG 2014, §§ 61).

Seit dem EEG 2017 wird bei Anlagen mit $P_{\text{inst}} > 10$ kWp die volle EEG-Umlage erhoben.

Fall 2: Direktbelieferung aus Anlage eines Dritten ohne Netzdurchleitung

Dieser Fall ist in Teilen analog zu Fall 1 und fällt in den Bereich des Eigenverbrauchs, wenn der erzeugte Strom in unmittelbarer räumlicher Nähe abgenommen wird und nicht durch das öffentliche Netz geleitet wird. Ab dem EEG 2009 ist dieser Fall im EEG explizit geregelt. Davor ist dieser Fall möglich, jedoch nur, wenn der Erzeuger seine Anlage im Anlagenregister erfasst und für den restlichen Strom, der nicht eingespeist wird, keine Vergütung verlangt und damit kein Bezug zum EEG besteht.

Eine finanzielle Förderung wird entrichtet bei Anlagen mit Inbetriebnahme ab dem 01.01.2009 und vor dem 01.04.2012 mit den Vergütungssätzen des Eigenverbrauchs (§ 33 (3) 2009).

Nach Einführung des Marktintegrationsziels durch das EEG 2014 für Anlagen mit $P_{\text{inst}} > 500$ bzw. 100 kW und Inbetriebnahme ab dem 01.08.2014 bzw. 01.01.2016, ist diese Art der Veräußerung an Dritte ohne Netzdurchleitung durch den § 20 (3) Satz 2 formuliert. Die EEG-Umlage fällt nach § 61 (1) Satz 3 in voller Höhe an, dies gilt unabhängig vom Inbetriebnahmezeitpunkt auch für Bestandsanlagen.

Stromsteuer fällt grundsätzlich nicht an, da der Strom aus einer Leitung entnommen wird, die ausschließlich von erneuerbaren Energien gespeist wird und außerdem räumlicher Zusammenhang zwischen Einspeise- und Entnahmepunkt herrscht. Alle weiteren Strompreisbestandteile, die an Netzentgelte gekoppelt sind, fallen ebenfalls nicht an.

Fall 3: Direktbelieferung aus eigener Anlage mit Netzdurchleitung

Dieser Fall gehört bei Personenidentität zwischen Anlagenbetreiber und Verbraucher im Falle von Bestandsanlagen, die vor dem 01. August 2014 in Betrieb genommen wurden, zur privilegierten Eigenerzeugung, sofern räumlicher Zusammenhang zwischen der Einspeise- und Entnahmestelle vorliegt. Der Begriff des räumlichen Zusammenhangs ist im EEG nicht definiert und muss unter Umständen in Einzelfallentscheidungen bestätigt werden. Inwieweit dies zutrifft, wird nach § 9 Abs. 1 Nr. 3a des StromStG, in Abhängigkeit der tatsächlichen Entfernung der Entnahmestelle zu der Anlage, nach der Anzahl der Entnahmestellen und ihre Verteilung in der Fläche sowie nach der Spannungsebene des Versorgungsnetzes, in das der Strom eingespeist wird, entschieden. [72]

Bei Vorliegen dieses Falles entfällt die EEG-Umlage, netzgebundene Komponenten (Konzessionen, Netzentgelte und weitere Umlagen) werden aufgrund der Netzdurchleitung fällig. Eine zeitgleiche Abnahme der erzeugten Energie muss durch den Anlagenbetreiber sichergestellt werden.

Anlagen die nach dem 01. August 2014 in Betrieb genommen werden, werden in diesem Fall durch das EEG nicht mehr finanziell gefördert. Die EEG-Umlage muss in vollem Umfang entrichtet werden. Ein finanzieller Vorteil entsteht durch Entfallen der Stromsteuer.

Fall 4: Direktbelieferung aus Anlage eines Dritten mit Netzdurchleitung

Ein Lieferverhältnis dieser Art wird durch das EEG in Form der Direktvermarktung seit der Fassung 2009 geregelt. Sofern dabei regionaler Zusammenhang zwischen Erzeuger und Verbraucher vorliegt, und zeitgleiche Erzeugung und Abnahme nachgewiesen wurden, liegt eine „regionale Direktvermarktung“ vor, bei der die Stromsteuer entfällt.

Dem Betreiber der Anlage wird zusätzlich zum Entgelt für die Stromnutzung die Marktprämie ausgezahlt¹⁶.

Bei Umsetzung dieser Direktbelieferung wird der Anlagenbetreiber zum Stromlieferanten und damit zum Energieversorgungsunternehmen mit seinen Pflichten nach dem Energiewirtschaftsrecht (Führung eines Bilanzkreises, Durchführung von Leistungsprognosen, etc.). In der Ausführung dieser Funktion könnte er durch ein Direktvermarktungsunternehmen unterstützt werden.

Energiekosten

Die in Abbildung 4-2 dargestellte Lieferkette der hier betrachteten Anwendungsfälle verdeutlicht die Produktkomponenten, die für die Bereitstellung des Endproduktes Strom notwendig sind.

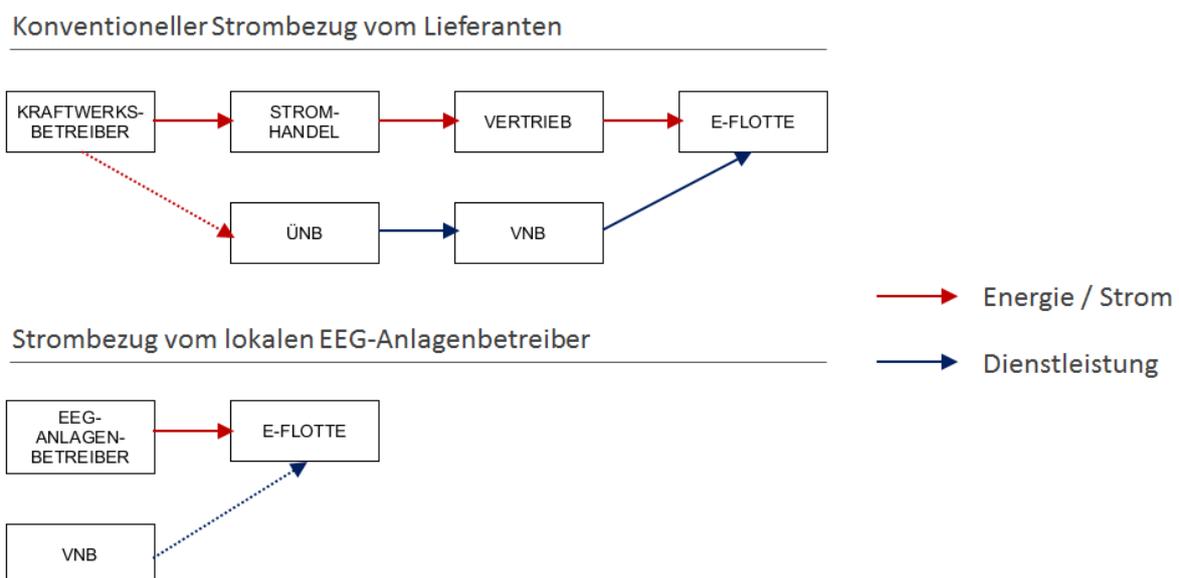


Abbildung 4-2: Lieferketten der Stromlieferung

Zu sehen ist eine vereinfachte Darstellung der Produkt- und Dienstleistungsflüsse der Stromlieferung. Beim konventionellen Strombezug vom Lieferanten bezieht der Endkunde Energie, die der Lieferant (Vertrieb) am Stromhandelsmarkt oder vom Kraftwerksbetreiber gekauft hat. Der Übertragungs- (ÜNB) und der Verteilnetzbetreiber (VNB) stellen als Dienstleistung ihre Netzinfrastruktur für die Lieferung des Stromes zur Verfügung und sorgen für einen sicheren Betrieb der Netze sowie für die Qualität der Versorgung. Der Energiefluss vom Kraftwerksbetreiber an den ÜNB ist gestrichelt dargestellt, zur Differenzierung zwischen der Energielieferung an den Endkunden und der Bereitstellung von Energie und Leistung für Netzbetriebszwecke, die in den Netzentgelten eingepreist sind.

¹⁶ Ab 2017 wird allerdings die Marktprämie bei Inanspruchnahme der Stromsteuerbefreiung, um die Stromsteuer reduziert [73], [73].

Bei der Direktbelieferung bezieht der Kunde die Energie vom Anlagenbetreiber. In den Fällen 1 und 2 entfällt die Nutzung der öffentlichen Netze, während in den Fällen 3 und 4 lediglich das Verteilnetz genutzt wird.

Tabelle 4-4 zeigt die Preisbestandteile für alle betrachteten Fälle und in Abhängigkeit des Inbetriebnahmezeitpunktes, welche sich aus den Lieferketten und den Förderinstrumenten des EEG ableiten lassen. Sie ermöglicht die Ermittlung der Energiekosten K_{Strom} (vgl. Tabelle 4-1) für den konventionellen und alternativen Strombezug. Im oberen Bereich ist die konventionelle Preiszusammensetzung abgebildet. Im unteren Bereich befinden sich die Komponenten, die aus der Direktnutzung des EEG-Stroms resultieren. Die Ermittlung der Strombeschaffungskosten $k_{E,PV}$ erfolgt in Abhängigkeit des Eigentümerstatus der PV-Anlage (siehe nachfolgendes Beispiel). Die Mess- und Abrechnungskosten sind für diese Bereiche differenziert dargestellt. Sie unterscheiden sich in ihrer Höhe, je nachdem, welches Messkonzept (mit oder ohne Lastgangmessung) zur Anwendung kommt. Mehr- bzw. Umsatzsteuern werden hier nicht betrachtet.

Beispiel für die Ermittlung des resultierenden Strompreises

Mithilfe von Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 wird der resultierende Strompreis bei konventionellem ($k_{Strom_{konv.}}$) und bei lokalem Bezug ($k_{Strom_{konv.}}$) aus einer 30 kWp und einer 50kWp PV-Anlage beispielhaft für Anwendungsfall 1 und 2 für verschiedene Inbetriebnahmezeitpunkte ermittelt. Die Berechnung erfolgt für einen Gewerbekunden mit Lastgangzählung und einem Jahresverbrauch von 300.000 kWh, einer Lastspitze von 100 kW und eigener Trafoanlage mit Entnahme aus dem Mittelspannungsnetz. Fixkosten werden auf die Jahresverbrauchsmenge umgelegt¹⁷. Es werden PV-Anlagen mit einem Inbetriebnahmezeitpunkt ab dem 01.01.2009 betrachtet, da die hohe Einspeisevergütung für PV in den Jahren davor und das Fehlen der Förderung der Eigenverbrauchs eine lokale Belieferung a priori unwirtschaftlich macht.

¹⁷ Beim Leistungspreis der Netzentgelte, der in Abhängigkeit der maximalen Bezugsleistung ermittelt wird, wird hier davon ausgegangen, dass die Lastspitze durch den Eigenverbrauch nicht reduziert wird.

Tabelle 4-4: Ausgaben- und Einnahmen bei Direktverbrauch in Abhängigkeit des Inbetriebnahmezeitpunktes (ohne Betrachtung der Mehrwert- / Umsatzsteuer)

	Fall 1			Fall 2			Fall 3			Fall 4			Konv. Strom-bezug	
	EEG 2009 ¹⁹	EEG 2012	EEG 2014	EEG 2009	EEG 2012	EEG 2014	EEG 2009	EEG 2012	EEG 2014	EEG 2009	EEG 2012	EEG 2014		
Ein- / Ausgaben	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Konventionelle Strompreisbestandteile														
Strombeschaffung konv. k_Z	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
Vertrieb k_{Ver}	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
Stromsteuer k_{St}	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
Netzentgelte k_{Netz}	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mess- und Abrechnungskosten konv. $k_{mess,kontv.}$	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
EEG-Umlage k_{EEG_Um}	x	x	✓ ²⁰	x	✓	✓	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
KWK-Umlage k_{KWK_Um}	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
§ 19-Umlage $k_{§19_Um}$	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓

¹⁸ Gilt für Fall 1 und Fall 2: Anlagen mit $P \leq 30$ kWp ab dem 01.09.2009, Anlagen mit $P \leq 500$ kWp ab dem 01.07.2010.

¹⁹ Es gilt ein reduzierter Satz in Höhe von 40 %.

Tabelle 4-4 (Fortsetzung): Ausgaben- und Einnahmen bei Direktverbrauch in Abhängigkeit des Inbetriebnahmezeitpunktes (ohne Betrachtung der Mehrwert- / Umsatzsteuer)

✓	✓	✓		✗	✗	✗	✗	✗
✓	✓	✓		✓	✓	✓	✗	✓
✓	✓	✓		✓	✓	✓	✗	✓
✓	✓	✓		✓	✓	✓	✗	✗
✓	✓	✓		✓	✗	✓	✗	✗
✓	✓	✓		✓	✗	✓	✗	✗
✓	✓	✓		✓	✗	✓	✗	✗
✗	✗	✗		✓	✗	✓	✗	✗
✗	✗	✗		✓	✗	✓	✗	✗
✗	✗	✗		✓	✗	✓	✓	✗
✗	✗	✗		✓	✗	✓	✗	✗
✗	✗	✗		✓	✗	✓	✗	✗
✗	✗	✗		✓	✗	✓	✗	✗
✗	✗	✗		✓	✗	✓	✓	✗
✗	✗	✗		✓	✗	✓	✗	✗
✗	✗	✗		✓	✗	✓	✗	✗
Offshore-Umlage $k_{off,Um}$	Umlage für abschaltbare Lasten $k_{Last,Um}$	Konzessionen k_{Konz}	Strompreisbestandteile bei Direktbelieferung	Strombeschaffung PV $k_{E,PV}$	Aufwand Direkt- vermarktung ²¹ k_{VerM}	Mess- und Abrechnungs- kosten (Nachweispflicht EV/Direktvermarktung) $k_{mess.a.it}$	Eigenverbrauchs- vergütung $p_{pv,Ev}$	Marktprämie ²² k_{pr}

²⁰ Die Aufgaben und Pflichten der Direktvermarktung (Führung eines Bilanzkreises, Messanforderungen, Darlegungs-, Mitteilungs-, und Veröffentlichungspflichten) können hier teilweise oder vollständig von einem Direktvermarkter übernommen, der über das erforderliche Know-how verfügt. Das Verhältnis zwischen Anlagenbetreiber und Direktvermarkter ist durch einen Vertrag über die Lieferung von Strom in den Bilanzkreis des Direktvermarktlers ausgestaltet [[97]

²¹ Zu beachten: der anzulegende Wert wird um die Stromsteuer reduziert, wenn diese entfällt.

Für die Beschaffungskosten $k_{E,PV}$ in Fall 1 können a) die Anschaffungs- und Betriebskosten der PV-Anlage oder b) die entgangene Einspeisevergütung $p_{pv,EV}$ des Betreibers angesetzt werden. Alternative a) ist geeignet, wenn der Betreiber die PV-Anlage im Zusammenhang mit dem elektrischen Fuhrpark anschafft und sie den Fuhrparkgesamtkosten zuordnet. Alternative b) ist geeignet, um die Auswirkungen auf den gesamten unternehmerischen Erfolg zu berücksichtigen, da die Anlage in b) eine Rendite erwirtschaftet kann, während sie in a) lediglich kostendeckend in die Betrachtung einfließt. In Fall 2 wird davon ausgegangen, dass der Betreiber der PV-Anlage durch den Verkauf des Stroms an den Fuhrparkbetreiber finanziell nicht schlechter gestellt wird als bei der Einspeisung ins Netz, so dass er durch seine Anlage mindestens die Einspeisevergütung erwirtschaftet. Seine Vertriebskosten werden hier vernachlässigt. Es wird davon ausgegangen, dass die anderen anfallenden Bestandteile, wie die EEG-Umlage durchgeleitet werden. Damit werden die Beschaffungskosten für die Fälle 1 und 2, nach den folgenden Gleichungen (18) und (19) ermittelt.

$$k_{E,PV,Fall1} = p_{pv,EV} \quad (18)$$

$$k_{E,PV,Fall2} = p_{pv,EV} - p_{pv,EVV} \quad (19)$$

Beim Vergleich der resultierenden Strompreise mit dem konventionellen Bezugspreis wird deutlich, dass ein lokaler Bezug aus wirtschaftlicher Sicht nur in bestimmten Fällen sinnvoll ist. Die resultierenden Preise, die in Tabelle 4-5 dargestellt sind, zeigen den Einfluss des Inbetriebnahmejahres der Anlage, ihrer Größe und des Eigentümerstatus. Ausschlaggebend sind ebenfalls die aktuellen konventionellen Strompreise. Im betrachteten Fall liegen diese bei etwa 17,8 ct/kWh und können in Abhängigkeit des Verbrauchs- und Lastprofils des Unternehmens sowie der Art des Gewerbes durchaus geringer ausfallen.

Tabelle 4-5: Resultierender variabler Strompreis für konventionellen und alternativen Strombezug

Alternative	Komponenten	Kosten [ct/kWh] bei 30 / 50 kWp	Strompreis [Ct/kWh] bei 30 / 50 kWp
Konventionell			
$k_{Strom_{konv}}$	$(k_E + k_{Ver} + k_{Netz} + k_{Mess})$ $+ k_{St} + k_{EEGUm} + k_{KWKUUm}$ $+ k_{§19Um} + k_{OffUm}$ $+ k_{LastUm} + k_{Konz}$	$= (7,95)^{22}$ $+2,05+6,88^{23}+0,438$ $+0,388+(-0,028)$ $+0,006+0,11$	17,80

²² Zusammenfassung von $(k_E + k_{Ver} + k_{Netz} + k_{Mess})$ [74]

²³ EEG-Umlage in 2017

Fall 1 INB 2009			
$k_{Strom,Fall1,30kWp}$	$k_{E,PV} - p_{pv,EVV} + k_{mess,alt}$	$= 43,01 - 25,01 + 0,0024^{24}$	18,00
$k_{Strom,Fall1,50kWp}$		$= 40,91 - 0,00 + 0,0024$	40,91
Fall 1 INB 2012			
$k_{Strom,Fall1,30kW}$	$p_{pv,EV} + k_{mess,alt}$	$= 16,56 + 0,0024$	16,56
$k_{Strom,Fall1,50kW}$		$= 14,77 + 0,0024$	14,77
Fall 1 INB 2014			
$k_{Strom,Fall1,30kW}$	$p_{pv,EV} + k_{EEG_Um} + k_{mess,alt}$	$= 12,25 + 0,4 \cdot 6,88 + 0,0024$	15,00
$k_{Strom,Fall1,50kW}$		$= 10,95 + 0,4 \cdot 6,88 + 0,0024$	13,70
Fall 2 INB 2009			
$k_{Strom,Fall2,30kW}$	$p_{pv,EV} + k_{mess,alt}$	$= 43,01 - 25,01 + 0,0024$	18,00
$k_{Strom,Fall2,50kW}$		$= 40,91 - 0,0 + 0,0024$	40,91
Fall 2 INB 2012			
$k_{Strom,Fall2,30kW}$	$= p_{pv,EV} + k_{EEG_Um} + k_{mess,alt}$	$= 16,56 + 6,88 + 0,0024$	23,44
$k_{Strom,Fall2,50kW}$		$= 14,77 + 6,88 + 0,0024$	21,65
Fall 2 INB 2014			
$k_{Strom,Fall2,30kW}$	$= p_{pv,EV} + k_{EEG_Um} + k_{mess,alt}$	$= 12,25 + 6,88 + 0,0024$	19,13
$k_{Strom,Fall2,50kW}$		$= 10,95 + 6,88 + 0,0024$	17,83

²⁴ Annahme basiert auf [75], [76].

4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für einen elektrischen Fuhrpark im Zusammenhang mit lokalen erneuerbaren Energien untersucht. Die Bildung eines Kapitalwertes als Entscheidungsgröße wurde dargestellt und es erfolgte die Auswahl der relevanten Zahlungsströme. In Bezug auf die Energiekosten des Fuhrparks wurden verschiedene Belieferungskonzepte betrachtet, die bei der lokalen Belieferung eines elektrischen Fuhrparks mit erneuerbaren Energien auftreten können. Die gesetzlichen Grundlagen wurden beleuchtet und Förderungen und finanzielle Vorteile identifiziert. Dies ermöglicht eine Bepreisung der Komponenten der Lieferkette der Stromlieferung und gesetzlicher Abgaben zur Berechnung eines Strombeschaffungspreises, welche beispielhaft für ausgewählte Anwendungsfälle erfolgte.

Anders als in privaten Haushalten, für die Strompreise in Höhe von bis zu 30 ct/kWh gelten und sich der lokale Bezug ohne Durchleitung des Stromes durch das öffentliche Netz bei Anlagen nach Inbetriebnahme in 2009 in der Regel rentiert, ist die genaue Konstellation aus Inbetriebnahmejahr, installierter Leistung und Eigentümerstatus der Anlage ausschlaggebend für die Vorteilhaftigkeit des lokalen Bezugs und muss fallspezifisch geprüft werden.

5 Bewertung der Kostensenkungspotentiale eines Lademanagements

Der Betreiber eines Fuhrparks ist ein wesentlicher Stakeholder in der Elektromobilität und wird mit seinen Entscheidungen den Integrationsprozess der Elektromobilität maßgeblich beeinflussen. Die Entscheidung für einen elektrischen Fuhrpark wird bei der Mehrheit der Fuhrparkbetreiber auf Basis der Wirtschaftlichkeit getroffen, die anhand der Kosten, wie in Kapitel 4.1 dargestellt, ermittelt werden kann.

Die Grundlagen für eine ausführliche Analyse der resultierenden Stromkosten und der Auswirkungen durch ein Lademanagement werden in diesem Kapitel erarbeitet. Damit wird zum einen dem Fuhrparkbetreiber eine fundierte Wissensbasis zu den aufkommenden Stromkosten bei einer Elektrifizierung bereitgestellt, die bereits in seine Planungsphase einfließen und damit die Risiken seiner Entscheidung minimieren kann. Zum anderen können die Ergebnisse in Maßnahmen zur gezielten Förderung der Elektromobilität einfließen.

Neben den Entscheidungen des Fuhrparkbetreibers fließen die technischen Restriktionen, die auf Ebene des Kundennetzes vorherrschen in die Elektrifizierbarkeit und die Integrationsfähigkeit der Erneuerbaren Energien ein. Durchmischungseffekte bei der Einspeisung und beim Energiebedarf, wie im ersten Teil der Arbeit liegen nicht vor. Das Integrationspotential von Erneuerbaren Energien kann sich dadurch auf Betreiberebene wesentlich von der Systemebene unterscheiden.

In diesem Kapitel wird zunächst die für diese Arbeit entwickelte Ladestrategie zur Senkung der Stromkosten vorgestellt und ihr Wirkungsmechanismus beschrieben. Anschließend wird die Bewertungsmethodik des Kostensenkungspotentials erläutert sowie die Funktionsweise und die Modelle der für die Analysen erstellten Software.

5.1 Lademanagement zur Senkung der Gesamtstromkosten eines Betreibers

Der Gesamtstrombedarf eines Unternehmens wird durch die Integration eines elektrischen Fuhrparks ansteigen. Durch ein gesteuertes Laden kann auf einige Kostenbestandteile des Strompreises Einfluss genommen werden und so der Kostenanstieg optimiert werden (vgl. Kapitel 4.2.2). Dabei können verschiedene Ansätze verfolgt werden, die sich in ihren Zielfunktionen und Managementaufwand unterscheiden können.

Ein rudimentäres Lademanagement kann bereits durch Auswahl des Ladezeitpunktes über eine Zeitschaltuhr und der Maximalleistung des Ladekabels oder der Ladestation umgesetzt werden. Technisch anspruchsvoller ist hingegen eine automatisierte Regelung oder Steuerung des Ladevorgangs, z.B. im Zusammenhang mit einem Energiemanagement des Energiesystems des Kunden. Für Letzteres ist die Kenntnis weiterer Energiedaten erforderlich. Bei der Gestaltung des Managementsystems kann davon ausgegangen werden, dass mit Zunahme der Kenntnis des Lastgangs von Verbrauchern und Erzeugern und mit Zunahme der Steuerbarkeit der Fahrzeugladung durch erhöhten IT- und Automatisierungsaufwand die individuellen Zielerreichungsgrade der Ladestrategien als auch der Kostenaufwand zunehmen.

Eine anwendungsspezifische Überprüfung des Einsatzes eines Lademanagements mit der Bestimmung von Machbarkeit, Kosten, Einsparungen und evtl. Einnahmen muss erfolgen, um eine wirtschaftliche Anwendung zu ermöglichen.

Gestaltung der ausgewählten Ladestrategie

Die Untersuchungen in dieser Arbeit erfolgen für Kunden mit Eigenerzeugung und einem elektrischen Fuhrpark welcher aus dem Kundennetz gespeist wird (Fall 1 in Kapitel 4). Es wird eine Ladestrategie untersucht, in der die in Abbildung 5-1 dargestellten, und nachfolgend erläuterten Mechanismen zur Senkung der Gesamtkosten verwendet werden. Sie basiert auf der Verschiebung von Ladezeitpunkten und damit unidirektionalem Laden²⁵.

Der obere Bereich der Abbildung zeigt für das ungesteuerte (links) und gesteuerte (rechts) Laden die Ausgaben (rot) und Einnahmen (grün) im Zusammenhang mit den Energieflüssen zur Deckung des Gesamtstrombedarfs $x_{Strom, ges.}$ aller Verbraucher und der Stromerzeugung durch eine Eigenerzeugungsanlage, im Folgenden eine PV-Anlage, $x_{pv, ges.}$ im Kundennetz. Die einzelnen Zahlungsflüsse für den konventionellen Strombezug K_{Netz} , der Eigenverbrauchsvergütung E_{EVV} und der Einspeisevergütung E_{ES} (sofern anwendbar)

²⁵ Ladestrategien, die bidirektionales Laden erfordern, werden hier nicht betrachtet, auch wenn die normativen (Chademo) und technischen Voraussetzungen gegeben sind. [77], [78]

entsprechen jeweils dem Produkt aus Strommenge x (Vertikalachse) und dem Produktpreis p (Horizontalachse). Unter der gestrichelten Linie ist die zugehörige Kostenbilanz KB_{Strom} dargestellt, für die gilt:

$$KB_{Strom} = x_{Netz} \cdot p_{Netz} + x_{pv,EV} \cdot p_{pv,EVV} + x_{pv,Ein} \cdot p_{pv,EV} \quad (20)$$

Mit:

x_{Netz} : Energiebezugsmenge aus dem öffentlichen Netz (vom Lieferanten)

$x_{pv,EV}$: Eigenverbrauchsmenge

$x_{pv,Ein}$: Einspeisemenge der Eigenerzeugung

p_{Netz} : Strompreis für den Energiebezug aus dem öffentlichen Netz (> 0 ct/kWh)

$p_{pv,EVV}$: Eigenverbrauchsvergütung (sofern anwendbar) (≤ 0 ct/kWh)

$p_{pv,EV}$: Einspeisevergütung (< 0 ct/kWh)

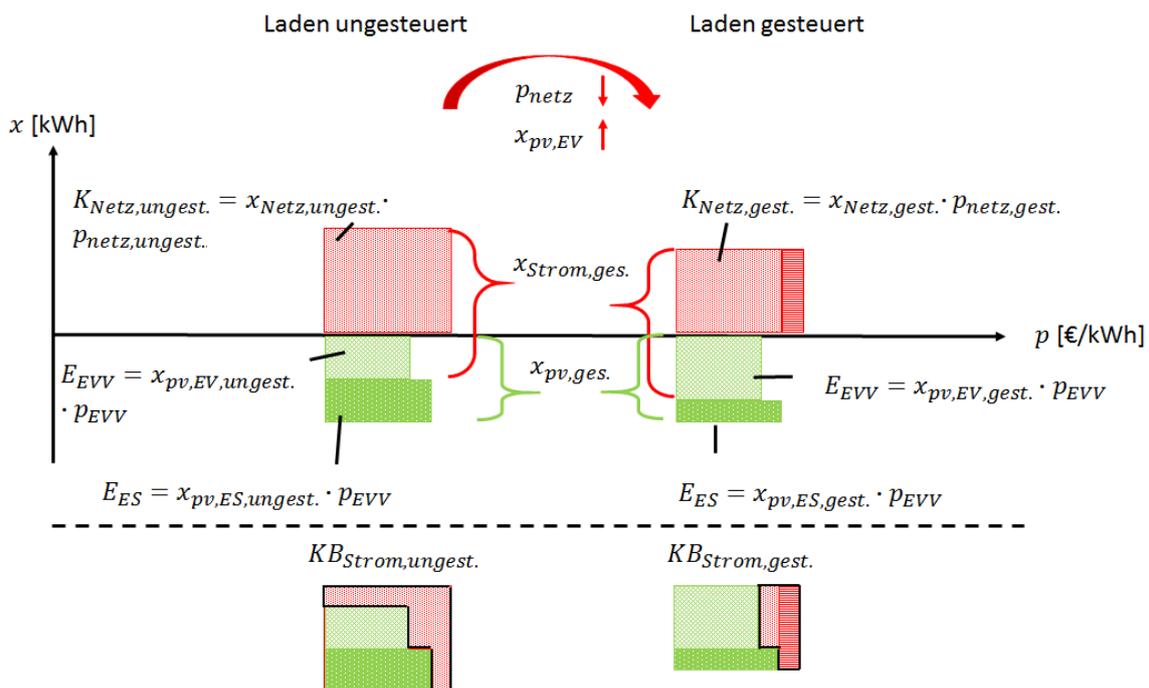


Abbildung 5-1: Auswirkungen des gesteuerten Ladens auf die Stromkostenbilanz

Die Kostenbilanz wird durch eine zeitliche Verschiebung der Ladung mit den folgenden Zielen optimiert:

1. Reduzierung des Strombezugspreises p_{netz} :
 - a. Der Kunde verschiebt die Fahrzeugladung in den Zeitbereich, in dem Nebentarife gelten.
 - b. Der Kunde lädt die Fahrzeuge außerhalb der Spitzenlastzeiten und vermeidet den Anstieg der Netznutzungsentgelte²⁶.
2. Erhöhung des Eigenverbrauchs $x_{pv,EV}$:
 - a. Bei Eigenerzeugungsanlagen, bei denen der Eigenverbrauch vorteilhafter ist, als die Netzeinspeisung der überschüssigen Leistung, verschiebt der Kunde die Fahrzeugladung in Zeiten, in denen sonst eine Netzeinspeisung erfolgt, so dass x_{Netz} und damit die Ausgaben sinken und die Eigenverbrauchsvergütung steigt, sofern sie ausgezahlt wird.

Zeitpunkte der Fahrzeugladung

Das ungesteuerte Laden wird in dieser Arbeit für einen Fuhrpark betrachtet, bei dem die Ladung zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgt. Zum einen werden die Fahrzeuge einmal täglich nach der letzten Fahrt geladen. Diese werden im Folgenden Betriebshoflader (BHL) genannt. Alternativ wird die untertägige Ladung für Unterwegslader (UWL) untersucht, die jede Möglichkeit der Ladung nutzen.

5.2 Methodik und Analysesoftware zur Ermittlung des Kostensenkungspotentials eines Lademanagements

In dieser Arbeit wird - unabhängig von der technischen Umsetzung des Lademanagements - das Potential untersucht, die Kosten für einen spezifischen elektrischen Fuhrpark zu senken. Es erfolgt keine Untersuchung der notwendigen Aufwendungen, die mit dem Lademanagement verbunden sind.

Das Kostensenkungspotential KSP wird mit Gl. (21) wie folgt bestimmt:

$$KSP = \frac{KB_{Strom,ungest.} - KB_{Strom,gest.}}{KB_{Strom,ungest.} - KB_{Strom,Kunde}} = \frac{\Delta KB_{gest.}}{K_{Zusatz}} \quad (21)$$

Es beschreibt die Differenz der Stromkostenbilanzen des Kunden bei ungesteuertem und gesteuertem Fuhrpark $\Delta KB_{gest.}$ bezogen auf die Zusatzkosten des Kunden K_{Zusatz} bei

²⁶ Unter Umständen wird dadurch auch ein Netzausbau vermieden, der Kosten für den Kunden verursacht.

ungesteuertem Laden. Die Differenz der Stromkostenbilanzen wird dem Lademanagement zugeordnet; auch wenn die Zusatzlast der Fahrzeuge ursächlich für eine mögliche Anhebung von p_{Netz} gewesen ist und damit auch die Stromkosten für die bestehenden Verbraucher erhöht haben kann (vgl. Abbildung 5-1). Der Fuhrpark wird dadurch zum Verursacher aller Zusatzkosten als auch der Einsparungen durch ein Lademanagement.

Die ungesteuerten und gesteuerten Ladelasten zur Ermittlung der Stromkosten werden mithilfe von historischen Nutzerdaten eines konventionellen Fuhrparks simuliert. Die Komponenten der Simulations- und Analyse-Software sowie die notwendigen Eingangsdaten sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Die Komponenten (1.) bis (3.) der Software wurden mit dem Softwareprogramm Matlab der Fa. MathWorks implementiert. Das gesteuerte Laden wird mit der Optimierungssoftware Cplex von IBM gelöst, welches in die Implementierung integriert worden ist. Die Kostenauswertung und Gegenüberstellung der Kosten erfolgen in Excel und Matlab.

Im analytischen Verbrauchsmodell (1.) werden km-abhängige Energiekennzahlen des Fahrzeugsystems ermittelt (vgl. Abbildung 5-3). Diese sind abhängig vom Fahrzeugtyp, Streckentyp und der zum Fahrtzeitpunkt vorherrschenden Witterung am Nutzerstandort. Mit ihnen werden in (2.) zum einen die Nutzerdaten um Fahrt-bezogene Ladestrombedarfe erweitert, und zum anderen anhand des resultierenden täglichen Batteriestrombedarfs für alle Fahrten, die nicht elektrifizierbaren Einsatztage der BHL, mithilfe der Nennkapazität der Batterie, bestimmt und herausgefiltert. Für UWL erfolgt dies unter Verwendung des Kapazitätsverlaufs (vgl. Kapitel 5.4). Außerdem wird der Batteriestrombedarf an (3.) übergeben, um gewährleisten zu können, dass die Batteriekapazität beim gesteuerten Laden und bei den UWL nicht unterschritten wird.

In (2.) werden außerdem zwei Zeitreihen für jedes Fahrzeug erstellt, die als Eingangsdaten für die Lastgangermittlung verwendet werden. Die Zeitreihe Ladeverfügbarkeit wird mithilfe der Abfahrts- und Ankunftszeiten berechnet und gibt an, ob ein Fahrzeug im betrachteten Zeitschritt für eine Ladung verfügbar ist. Die Zeitreihe Ladestrombedarf gibt an, wieviel Ladestrom pro Zeitschritt genutzt wird, um den Ladebedarf bei Ankunft am Ladepunkt zu berechnen.

In (3.) werden die Lastgänge für das ungesteuerte und gesteuerte Laden unter Angabe der maximalen Ladeleistung berechnet, und an (4.) übergeben. Dabei werden beim ungesteuerten Laden die Fahrzeuge nach Ankunft direkt mit der maximalen Ladeleistung geladen, wenn möglich, bis die maximale Batteriekapazität erreicht wird. Beim gesteuerten Laden erfolgt die Ladung nach einem Fahrplan und variablen Ladeleistungen. Der Ladefahrplan wird mit einem Optimierungsmodell zur Minimierung von KB_{Strom} unter Anwendung des Simplex-Algorithmus ermittelt (vgl. Kapitel 5.5).

Zuletzt werden in (4.) die Gesamtkosten des Kunden für die Alternativen BHL, UWL und ungesteuertes Laden und KSP bestimmt. Dafür wird zunächst der resultierende Gesamtlastgang aus dem vorherrschenden Kundenlastgangs zzgl. der Fahrzeuglast. Mit diesem und der Erzeugungsleistung der Eigenerzeugung werden die Eigenverbrauchs-, der Einspeise- und der Netzlastgang und die zugehörigen Energiemengen berechnet. Die Energiemengen und die betriebswirtschaftlichen Kennzahlen ermöglichen die Lösungen von Gl. (21).

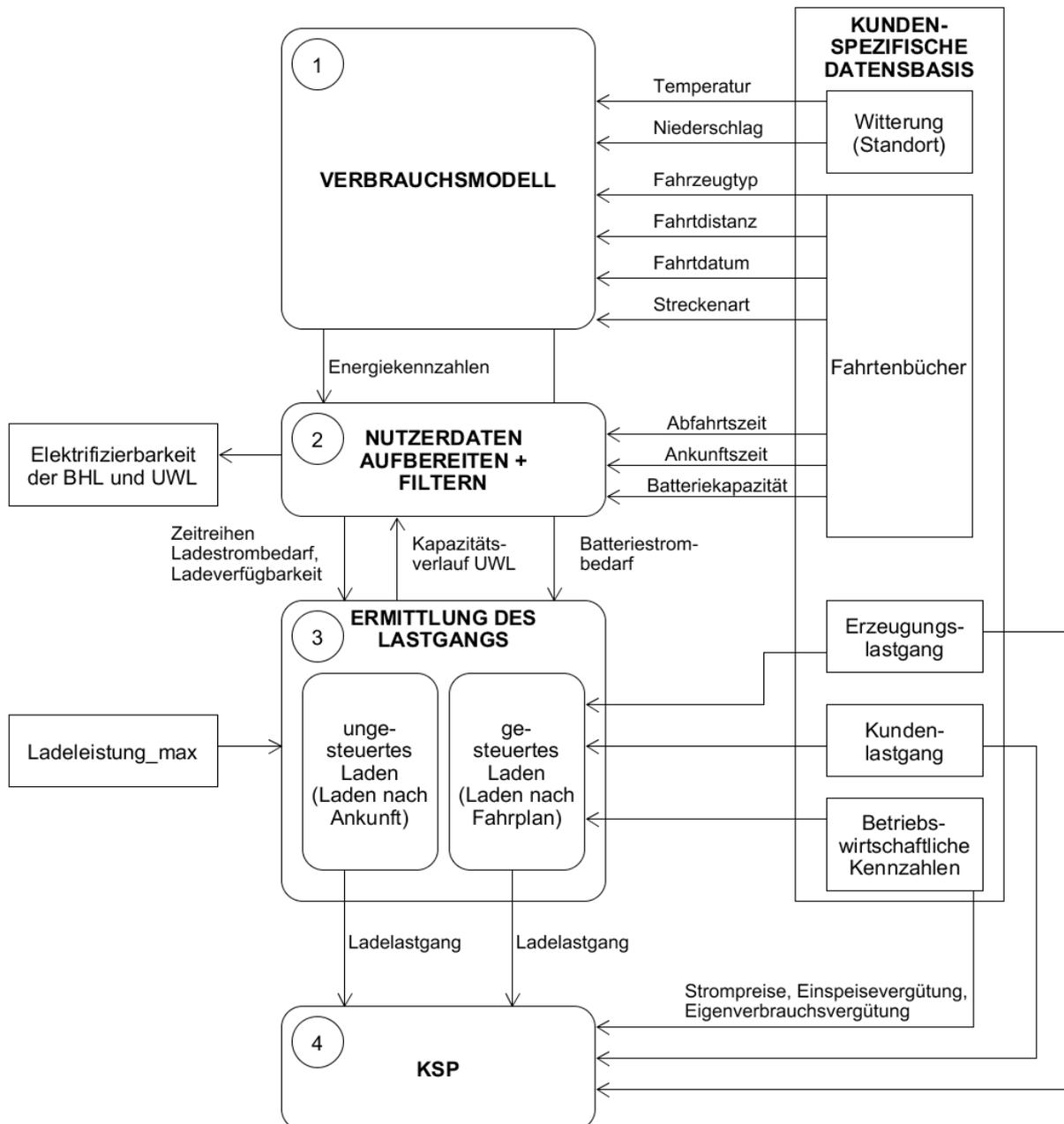


Abbildung 5-2: Komponenten der Analysesoftware

5.3 Verbrauchsmodell zur Bestimmung des Energiebedarfs einer Fahrt

Der fahrtspezifische Ladestrombedarf $LB_{Fahrt-spez.}$ kann in drei wesentliche Komponenten unterteilt werden, wie in der schematischen Darstellung in Abbildung 5-3 dargestellt. Dazu gehören die Energiebedarfe für die translatorische Bewegung des Fahrzeugs zzgl. der Motorverluste (η_{Motor}), die Nebenverbraucher $nb_{Zyk,Witt}$ und die Speicherverluste der Fahrzeugbatterie ($\eta_{Laden}, \eta_{Entladen}$).

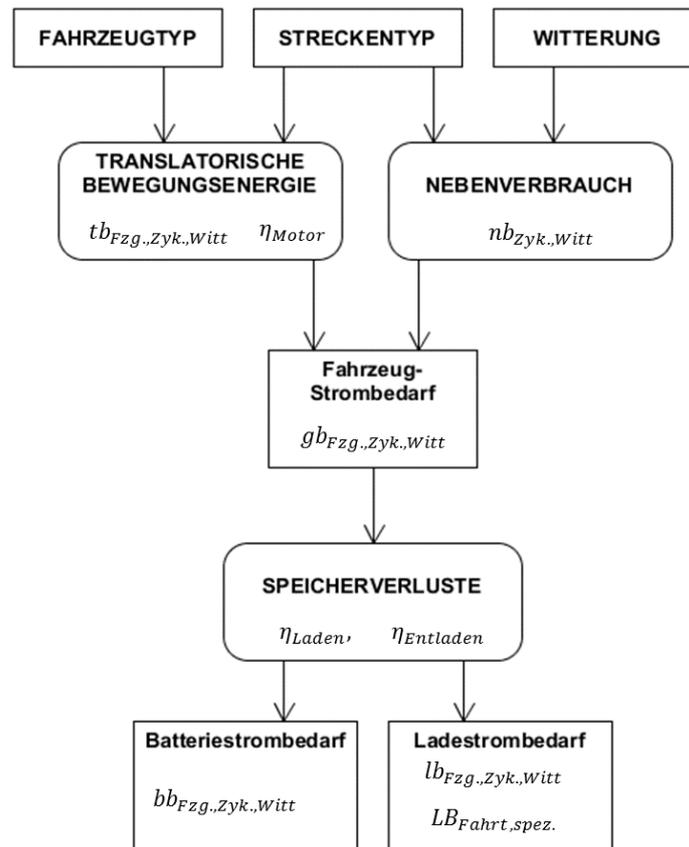


Abbildung 5-3: Verbrauchsmodell zur Bestimmung der Energiekennzahlen einer Fahrt

Die translatorische Bewegungsenergie ist fahrzeugtyp- und streckentypabhängig. Im Verbrauchsmodell wurden fünf Fahrzeugtypen (vgl. Kapitel 5.3.2) und drei verschiedene Streckentypen angelegt (vgl. Kapitel 5.3.1).

Die Energie für die Nebenverbraucher hängt von der Witterung und ebenfalls vom Streckentyp ab. Letzteres ist begründet durch die variable Fahrzeit pro Kilometer, die sich aus dem Fahrprofil ergibt, und damit der Nutzungszeit der Nebenverbraucher (vgl. Kapitel 5.3.3).

Damit gilt für den Fahrzeug-Grundenergiebedarf $gb_{Fzg,Zyk,Witt}$:

$$gb_{Fzg,Zyk,Witt} = tb_{Fzg,Zyk,Witt} \cdot \frac{1}{\eta_{Motor}} + nb_{Zyk,Witt} \quad (22)$$

Bei der Deckung von $gb_{Fzg,Zyk,Witt}$ durch die Batterie fallen Entladeverluste an, welche durch den Entladewirkungsgrad berücksichtigt werden. Die aus der Batterie bezogene Energie $bb_{Fzg,Zyk,Witt}$ resultiert zu:

$$bb_{Fzg,Zyk,Witt} = gb_{Fzg,Zyk,Witt} \cdot \frac{1}{\eta_{Entladung}} \quad (23)$$

Mit $bb_{Fzg,Zyk,Witt}$ kann die aktuelle Kapazität der Fahrzeugbatterie berechnet werden.

Der km-abhängige Ladebedarf $lb_{Fzg,Zyk,Witt}$ wird abschließend durch Berücksichtigung der Ladeverluste berechnet, so dass gilt:

$$lb_{Fzg,Zyk,Witt} = bb_{Fzg,Zyk,Witt} \cdot \frac{1}{\eta_{Ladung}} \quad (24)$$

Der Ladestrombedarf einer spezifischen Fahrt ergibt sich durch Multiplikation von $lb_{Fzg,Zyk,Witt}$ mit der Fahrdistanz:

$$LB_{Fahrt,spez.} = lb_{Fzg,Zyk,Witt} \cdot d_{Fahrt} \quad (25)$$

5.3.1 Ausgewählte Streckentypen

Die drei Streckentypen, die im Verbrauchsmodell berücksichtigt werden, bilden eine Überlandfahrt, den Stadtverkehr und eine Autobahnfahrt nach. Die erst genannten entsprechen dem EUCD (Extra Urban Driving Cycle, vgl. Abbildung 5-4) und dem ECE-15-Teilzyklus (Teilzyklus der United Nations Economic Commission for Europe Specification, vgl. Abbildung 5-5). Aus diesen wird der NEFZ (Neuer europäischer Fahrzyklus) nach der Richtlinie 70/220/EWG gebildet, mit dem Messversuche zum Fahrzeugverbrauch konzipiert werden. Der hier verwendete Autobahnfahrzyklus (ABF) wurde nach eigenen Annahmen entwickelt (vgl. Abbildung 5-6), mit dem Ziel das betrachtete Gebiet, bei dem das Modell Anwendung findet, genauer abzubilden.

Der EUCD-Zyklus für Überlandfahrten lässt sich durch ein gleichmäßiges Fahren mit Geschwindigkeiten im Bereich von 50 – 120 km/h charakterisieren, die nach dem Anfahrvorgang erreicht werden. Stopps werden nicht nachgebildet, da diese auf Landstraßen und Autobahnen in einem geringen Umfang stattfinden.

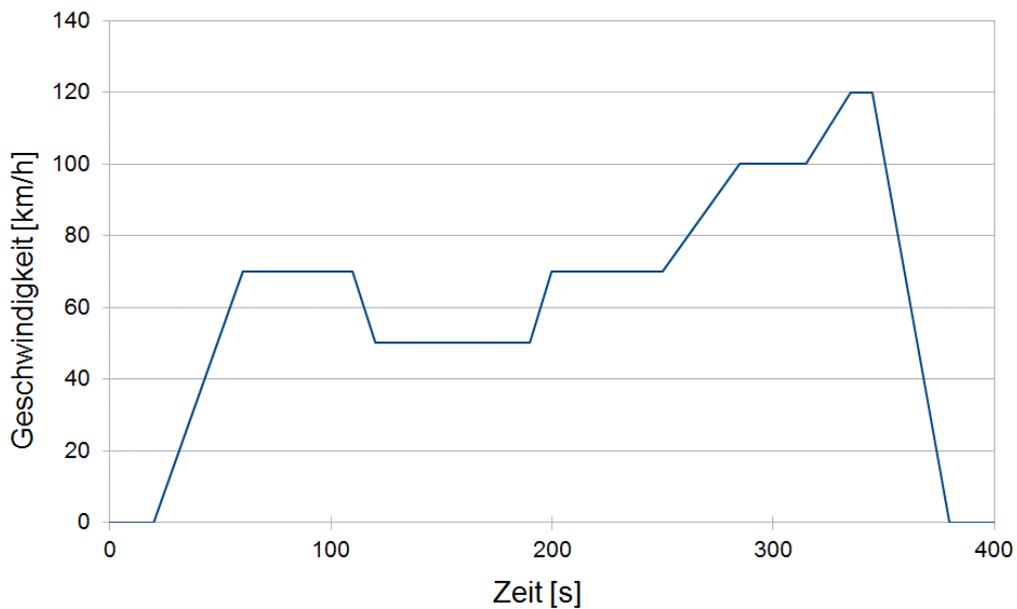


Abbildung 5-4: EUCD Fahrzyklus (Überlandfahrt)

Der ECE-15 Zyklus für den innerstädtischen Verkehr hingegen simuliert Halte an Ampeln oder Vorfahrtsstraßen, so dass der Zyklus von steileren Beschleunigungsvorgängen und geringeren maximalen Fahrgeschwindigkeiten geprägt ist.

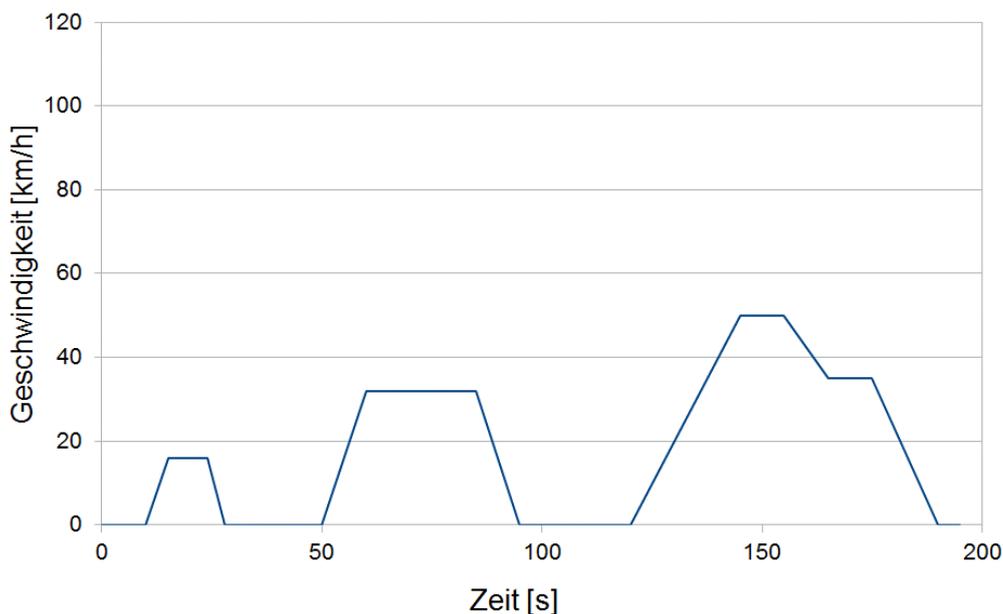


Abbildung 5-5: ECE-15 Fahrzyklus (Stadtverkehr)

Beim Autobahnzyklus werden typische Durchschnittsgeschwindigkeiten simuliert, die von der Autorin als energiesparend angesehen werden. Überholvorgänge werden durch den Wechsel zwischen 100 und 120 km/h simuliert. Baustellen und zähfließender Verkehr werden durch die Abbremsung auf 70 km/h berücksichtigt.

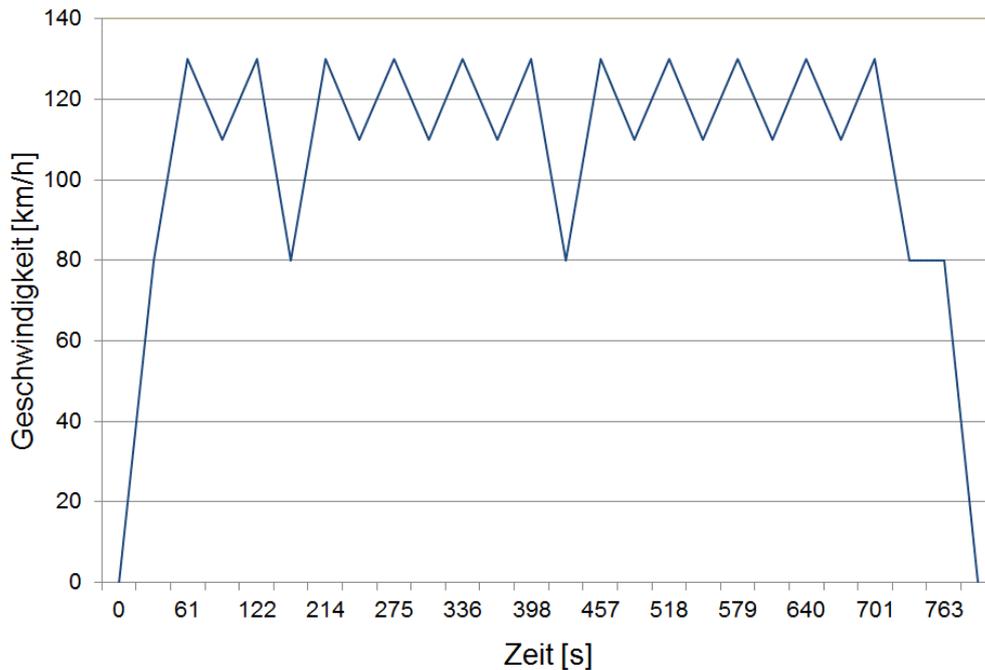


Abbildung 5-6: Verwendeter Zyklus zur Nachbildung einer Autobahnfahrt (ABF)

Einfluss der Streckenprofile auf den Nebenverbrauch

Für die Berechnung des Nebenverbrauchs im nachfolgenden Kapitel ist die tatsächliche Fahrtzeit t_{Fahrt} einer Fahrt erforderlich, um den zeitabhängigen Energieverbrauch zu berechnen. t_{Fahrt} ergibt sich durch Multiplikation der durchschnittlichen Zyklusfahrtzeit $t_{Zyklus,km}$ pro km und der zurückgelegten Strecke.

$t_{Zyklus,km}$ lässt sich aus der durchschnittlichen Zyklusgeschwindigkeit $v_{Zyklus,\emptyset}$ ableiten. Dafür wird zunächst die Gesamtstrecke eines Zyklus durch Integration des Geschwindigkeitsprofils über die Zykluszeit nach Gl. (26) berechnet.

$$D_{Zyklus} = \int_{t_1}^{t_2} v_{Zyklus} \cdot dt_{Zyklus} \quad (26)$$

Anschließend wird D_{Zyklus} durch die Zykluszeit dividiert, um $v_{Zyklus,\emptyset}$ zu erhalten. $v_{Zyklus,\emptyset}$ und $t_{Zyklus,km}$ sind für die betrachteten Fahrzyklen in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzyklen und zugehörige Fahrdauer pro km

Zyklus	Ø-Geschwindigkeit $v_{Zyklus,\phi}$ [km/h]	Ø-Fahrtzeit $t_{Zyklus,km}$ [min/km]
EUCD	61,40	0,98
ECE-15	17,94	3,34
ABF	98,70	0,61

5.3.2 Translatorische Bewegungsenergie eines Fahrzeugs

Die translatorische Bewegungsenergie, die vom Motor während der Fahrt zur Verfügung gestellt wird, wird mithilfe der Bewegungsgleichungen der Dynamik bestimmt. Nach [35] und [36] werden während der Fahrt verschiedenen Fahrwiderstandskräfte überwunden, die in Abbildung 5-7 dargestellt sind.

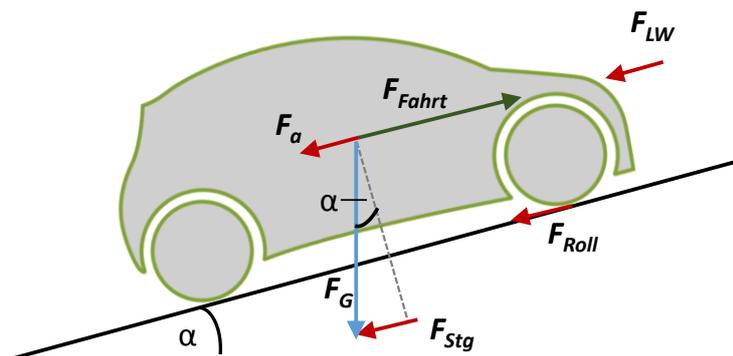


Abbildung 5-7: Fahrwiderstandskräfte während der Fahrt (eigene Darstellung nach [35])

Der erforderliche Kraftaufwand wird maßgeblich durch den Roll- (F_{Roll}), den Beschleunigungs- (F_a), den Luft- (F_{LW}) und den Steigungswiderstand (F_{Stg}) verursacht. In der Modellierung wird der Steigungswiderstand vernachlässigt, da das Gebiet, für die das Modell aufgestellt wird, tendenziell von einer flachen Topographie geprägt ist.

Die resultierende translatorische Bewegungsenergie, die mit den Fahrtwiderstandskräften durch die allgemeine Formel $E = F \cdot s$ in Beziehung steht, lässt sich demnach in drei Anteile unterteilen, die in den Gleichungen (27) - (29) dargestellt sind.

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot m_{EV} \cdot (v_{2,EV}^2 - v_{1,EV}^2) \quad (27)$$

$$E_{Roll} = c_r \cdot m_{EV} \cdot g \cdot s_{EV} \quad (28)$$

$$E_{LW} = c_w \cdot A_{EV} \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v_{rel}^2 \cdot s_{EV} \quad (29)$$

E_a ist die Beschleunigungsenergie, die von der Fahrzeugmasse m_{EV} und den Geschwindigkeiten vor ($v_{1,EV}$) und nach ($v_{2,EV}$) dem Beschleunigungsvorgang abhängt. Sie tritt sowohl bei positiver als auch bei negativer Beschleunigung auf. Bei letzteren, dem Bremsvorgang, können Anteile der Bremsenergie rekuperiert werden ($E_{Rekup} = E_a \cdot \eta_{Rekup}$), da der Motor des Elektrofahrzeugs in den Generatorbetrieb wechseln und die Batterie wieder aufladen kann. E_{Roll} ist die Energie zur Überwindung des Rollwiderstandes. Der Rollwiderstandsbeiwert c_r wird als konstant angenommen, so dass sich E_{Roll} mit m_{EV} , der Erdbeschleunigung g und der zurückgelegten Strecke s_{EV} bestimmen lässt. Die Energie zum Überwinden des Luftwiderstandes E_{LW} ist abhängig von der Stirnfläche des Fahrzeugs A_{EV} , s_{EV} und der Relativgeschwindigkeit v_{rel} . Dabei ist v_{rel} die Differenz aus Fahrzeuggeschwindigkeit und der dazu parallel angreifenden Windgeschwindigkeit. Die Windgeschwindigkeit wird im Modell vernachlässigt, so dass v_{rel} zu v_{EV} gesetzt wird. Der Luftwiderstandsbeiwert c_w und die Luftdichte ρ_L gehen als Konstanten in die Berechnung ein.

Die fahrzeugspezifischen Eingangsdaten der in der Modellierung betrachteten Fahrzeugtypen sind in Tabelle 5-2 dargestellt. Sie wurden mithilfe der technischen Datenblätter der Modellfahrzeuge bestimmt. Das Fahrgewicht ergibt sich aus dem Leergewicht des Fahrzeugs und einem Zusatzgewicht aus Personen- und Nutzlast²⁷.

Tabelle 5-2: Technische Daten der ausgewählten Fahrzeug-Modelle

Modell	Stirnfläche ²⁸ A_{EV} , [m ²]	Leergewicht [kg]	Fahrgewicht m_{EV} [kg]
Twizy (Quad)	1,52	560	660
Smart-e	2,16	900	1.000
e-Golf	2,22	1.585	1.785
Vito E-Cell (Ausführung	3,07	2.200	2.800

²⁷ Annahme der Autorin

²⁸ Stirnfläche = Fahrzeughöhe*Fahrzeugbreite*0,85; Nach [81] ist die Stirnfläche die projizierte Fläche, die der Schatten eines Körpers z. B. eines Pkw in Längsrichtung wirft. Aufgrund des Fahrzeugunterbodens und der Form der Karosserie werden 15 % von der Fläche aus Fahrzeughöhe und Fahrzeugbreite abgezogen (Annahme der Autorin).

als Kastenwagen)			
Vito E-Cell (Ausführung als Kombi)	3,05	2.430	3.000

Die folgende Tabelle 5-3 enthält weitere relevante, hier als fahrzeugunabhängig und konstant angenommene, Fahrzeugparameter.

Tabelle 5-3: Relevante Parameter bei der Berechnung der translatorischen Bewegungsenergie

Parameter	Wert
Luftwiderstandsbeiwert c_w	0,3
Rollwiderstandsbeiwert c_r	0,015
Wirkungsgrad E-Motor η_{Motor}	0,95
Wirkungsgrad Laden/Entladen $\eta_{Laden, \eta_{Entladen}}$	0,95
Wirkungsgrad d. Rekuperation η_{Rekup}²⁹	0,5 [82]

Mit den Werten der beiden Tabellen und den Geschwindigkeitsverläufen der Streckentypen, die im nachfolgenden Kapitel beschrieben werden, ergeben sich für die betrachteten Fahrzeugmodelle, die in Tabelle 5-4 dargestellten Energiebedarfe für die Bewegung der Fahrzeuge. Diese berücksichtigen die Rekuperation und enthalten die Entladeverluste.

Tabelle 5-4: Bewegungsenergiebedarf $tb_{Fzg.,Zyk.,Witt}$ bei Berücksichtigung der Rekuperation und zzgl. der Entladeverluste

Modell	E_{ECE-15} [kWh/100 km]	E_{EUCD} [kWh/100 km]	$E_{Autobahn}$ [kWh/100 km]
Twizy	5,7	8,5	11,9
Smart-e	8,1	12,1	17,0
e-Golf	13,7	17,1	22,5
Vito E-Cell (Ausführung als Kastenwagen)	21,3	25,6	33,2
Vito E-Cell (Ausführung als Kombi)	22,7	26,8	34,4

²⁹ Rekuperationsgrade sind abhängig von der Rekuperationsstrategie und den eingesetzten technischen Elementen im Fahrzeug und ihrer Auslegung. [37], [43], [83]

Der Stadtverkehr führt zu den geringsten Energiebedarfen. Je nach Fahrzeugparameter, ist der Energiebedarf des Überlandzyklus um ca. 20-50 % und der des Autobahnzyklus ca. 50 – 110 % höher als der des Stadtzyklus.

5.3.3 Nebenverbraucher

Der kilometerabhängige Energiebedarf der Nebenverbraucher wird für eine spezifische Fahrt wie folgt ermittelt.

$$nb_{Zyk.,Witt} = P_{Nebenverb.,aktiv} \cdot t_{Zyklus} \quad (30)$$

$P_{Nebenverb.,aktiv}$ in Abhängigkeit der Ausstattung, den eingesetzten Technologien und der Auslegung der technischen Komponenten wesentlich variieren und wird hier der Einfachheit halber als fahrzeugunabhängig betrachtet. Die Leistungen, die im Verbrauchsmodell verwendet werden, sind in Tabelle 5-5 dargestellt.

Tabelle 5-5: Leistungsabhängigkeit der Nebenverbraucher ([35], [38], [87])

Witterungsunabhängige Nebenverbraucher			
Scheinwerfer [kW]	0,3		
Infotainment [kW]	0,3		
Niederschlagsabhängige Nebenverbraucher			
	Regen/Schnee	Niederschlagsfrei	
Scheibenwischer [kW]	0,15	0	
Temperaturabhängige Nebenverbraucher			
Temperaturstufen [°C]	T < 0	0 ≤ T < 10	10 ≤ T < 15
Heizung [kW]	4,5	3	1,5
Temperaturstufen [°C]	T > 25		
Klimaanlage [kW]	1,5		
Temperaturstufen [°C]	T < -7	-7 ≤ T < -3	-3 ≤ T < 0
Batterieheizung [kW]	1,20	0,72	0,24

Die Heizung und die Klimaanlage (hier mit integrierter Lüftung) werden temperaturabhängig betrieben. Der Einsatz der Scheibenwischer ist abhängig vom Niederschlag. Mit 150 Watt erhöhen letztere den Verbrauch zwar nur geringfügig, bei kleinen Fahrzeugen mit einer geringen Batteriekapazität, kann diese Zusatzlast allerdings zu einer deutlichen Abnahme der verfügbaren Reichweite führen. [84] und [85] zeigen, dass die verfügbare Kapazität abhängig von der Umgebungstemperatur ist und bei niedrigen Temperaturen stark sinken kann. Dies wird durch eine Batteriezusatzheizung vermieden. Scheinwerfer und Infotainment, bestehend aus Soundsystem und Navigation, bleiben bei allen Fahrten durchgehend eingeschaltet.

In allen Fahrten gilt für $P_{Nebenverb.,aktiv}$ mit Tabelle 5-5:

$$0,3 \text{ kW} < P_{Nebenverb.,aktiv} < 6,45 \text{ kW} \quad (31)$$

5.3.4 Gesamtenergieverbrauch und resultierende Reichweite am Beispiel des e-Golf

Zur Veranschaulichung wird der geringste und höchste Ladebedarf einer Fahrt $lb_{Fzg.,Zyk.,Witt}$ für den e-Golf dargestellt. Der erste Summand in Tabelle 5-6 entspricht dem Ladebedarf für die translatorische Bewegung und der zweite Summand dem Ladebedarf der Nebenverbraucher. In beiden Anteilen wurde der Ladewirkungsgrad berücksichtigt. Die Fahrtdauer $t_{Fahrt,100km}$ auf 100 km verdeutlicht, die Höhe des Nebenverbrauchs. Bspw. führt die Fahrtdauer von 5,57 h/100 km im Stadtverkehr zu einem maximalen Ladebedarf für den Nebenverbrauch in Höhe von 37,9 kWh.

Tabelle 5-6: Gesamtenergiebedarf des e-Golf in Abhängigkeit des Fahrzyklus und der Witterung

Zyklus	$t_{Fahrt,100km}$ [h]	Maximaler Strombedarf $lb_{Fzg.,Zyk.,Witt}$ [kWh/ 100km]	Minimaler Strombedarf $lb_{Fzg.,Zyk.,Witt}$ [kWh/100 km]
EUCD	1,63	18,0 + 11,1 = 29,6	18,0 + 1,0 = 19,0
ECE-15	5,57	14,4 + 37,8 = 51,1	14,4 + 3,5 = 17,9
ABF	1,02	23,6 + 6,9 = 30,5	23,6 + 0,6 = 24,2

Der Strombedarf variiert damit zwischen mindestens 17,9 kWh/100km bei beispielsweise einer Temperatur von 15 °C ohne Niederschlag im Stadtverkehr und höchstens 51,1 kWh/100 km bei einer Temperatur von -7 °C mit Niederschlag im Stadtverkehr. Der Mindestverbrauch des e-Golfs wird damit im Grenzfall fast verdreifacht.

Die Auswirkung der unterschiedlichen Bedarfe auf die Reichweite ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Die Reichweiten werden jeweils für jeden Fahrzyklus bei drei verschiedenen Witterungszuständen dargestellt. Sie wurden unter Anwendung von $bb_{Fzg.,Zyk.,Witt}$ und einer verfügbaren Kapazität von 25 kWh ermittelt. Das Fahrzeug erreicht die höchste Reichweite mit über 150 km bei Temperaturen von 15 °C, ohne Niederschlag im Stadtverkehr. Die geringste Reichweite wird ebenfalls im Stadtverkehr erreicht. Sie beträgt bei Minusgraden und Niederschlag ca. 54 km.

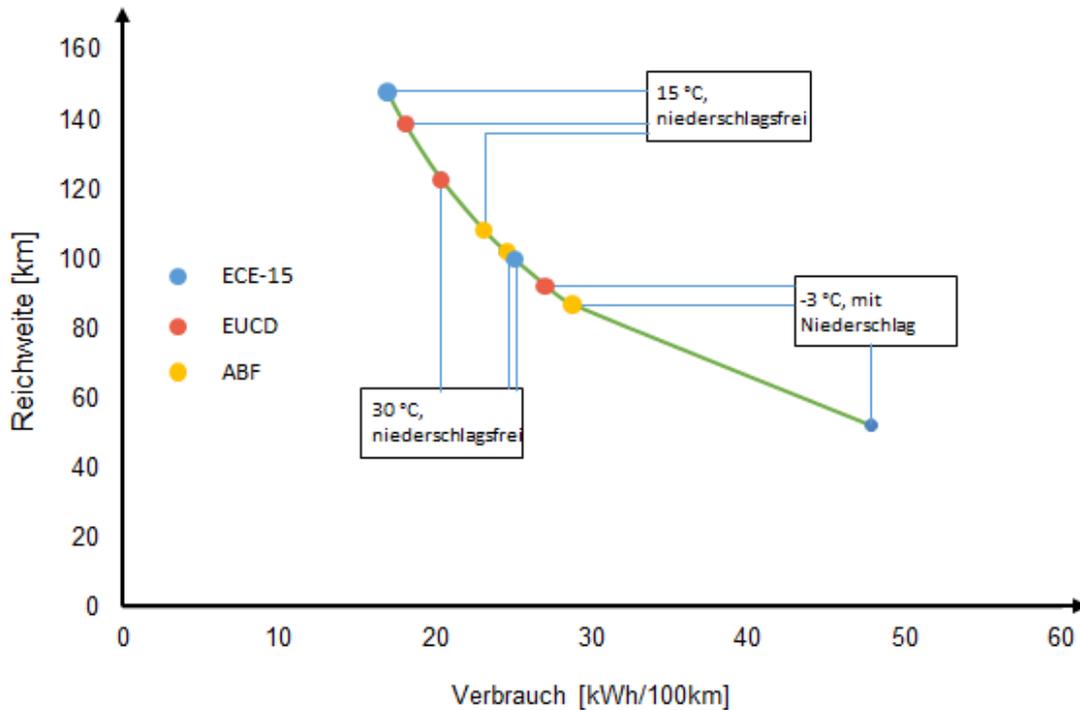


Abbildung 5-8: Reichweite in Abhängigkeit des Verbrauchs

5.3.5 Verifizierung und Bewertung des Verbrauchsmodells

Eine umfassende empirische Validierung des Verbrauchsmodells wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Jedoch decken sich die analytisch ermittelten Werte mit den Ergebnissen des Feldversuchs zur empirischen Erstellung eines Verbrauchsmodells, der im Rahmen von [84] durchgeführt wurde sowie mit den Angaben im Fahrzeug zu Momentanverbräuchen und Reichweiten, die im Fahrzeugdisplay dargestellt werden (Nissan Leaf und VW e-Golf). Des Weiteren gelangen andere Studien zu ähnlichen Ergebnissen bzgl. der Antriebsenergie, wie zum Beispiel in [26].

Der modellierte Nebenverbrauch fällt tendenziell höher aus, als der Realverbrauch, da die Bedingungen im Fahrgastraum und die Umgebungsbedingungen am Standort des Fahrzeugs nicht betrachtet werden. So werden die Einflüsse durch weitere Wärme- bzw. Kühlungsquellen vernachlässigt. Es wird zudem unterstellt, dass Heizung und Kühlung, wenn in Betrieb, während der gesamten Fahrt die in Tabelle 5-5 angegebenen Leistung

konstant erbringen, während sie im Realbetrieb abnehmen, sobald die gewünschte Temperatur im Fahrgastraum angenähert oder erreicht worden ist. Bspw. wurde in [27], [86] und [87] und gezeigt, dass die Komforttemperatur bei niedrigen Temperaturen ($< 0\text{ °C}$) innerhalb von ca. 5-15 Minuten erreicht wird und sich der Leistungsbedarf auf unter die Hälfte der Anfangsleistung reduziert. Der Abweichung im Nebenverbrauch steigen damit mit der Fahrdauer, das Verbrauchsmodell ist daher für kürzere Fahrten besser geeignet. Aus diesem Grund sollte die Eignung des Modells in Abhängigkeit des Anwendungsfalls geprüft werden. Eine Anpassung der Parametrierung kann in der Software erfolgen.

5.4 Aufbereiten und Filtern der Nutzerdaten

Die verwendeten Nutzerdaten verfügen über die nachfolgenden Informationen oder erlauben Rückschlüsse auf diese:

- Abfahrtsdatum und -zeit: Beginn einer Fahrt- oder Fahrtenkette am Betriebshof
- Ankunftsdatum und -zeit: Ende der Fahrtenkette am Betriebshof (oder an einem Ort mit Lademöglichkeit)
- Beginn, Ende und Ort eines Zwischenstopps
- Fahrzeugtyp
- Streckentyp
- Fahrdistanzen zwischen Halten

Aufbereitung des Datensatzes

Abbildung 5-9 zeigt das Ablaufdiagramm für die Aufbereitung und Filterung der Fahrtenbücher. Zunächst werden Uhrzeiten durch Aufrunden auf die Vielfachen einer einstellbaren Intervalldauer (hier 5 Minuten) überführt (Schritt 1). Dadurch kann es bei hinreichend kurzen Zwischenstopps eines Fahrzeugs zu Überschneidungen der Zeitpunkte der Ankunft und Abfahrt kommen. In diesem Fall werden die Zwischenstopps und ihre Fahrdistanzen in einem Datensatz zusammengefasst (Schritt 2). Anschließend wird eine Mindeststandzeit für eine Ladung angenommen. Die Zwischenstopps und zugehörige Fahrten, die kürzer sind als diese Standzeit, werden analog zu Schritt 2 zusammengefasst (Schritt 3).

In Schritt 4 werden die Datensätze anschließend mithilfe des Verbrauchsmodells um die Ladestrombedarfe und Batteriestrombedarfe der beschriebenen Fahrt ergänzt.

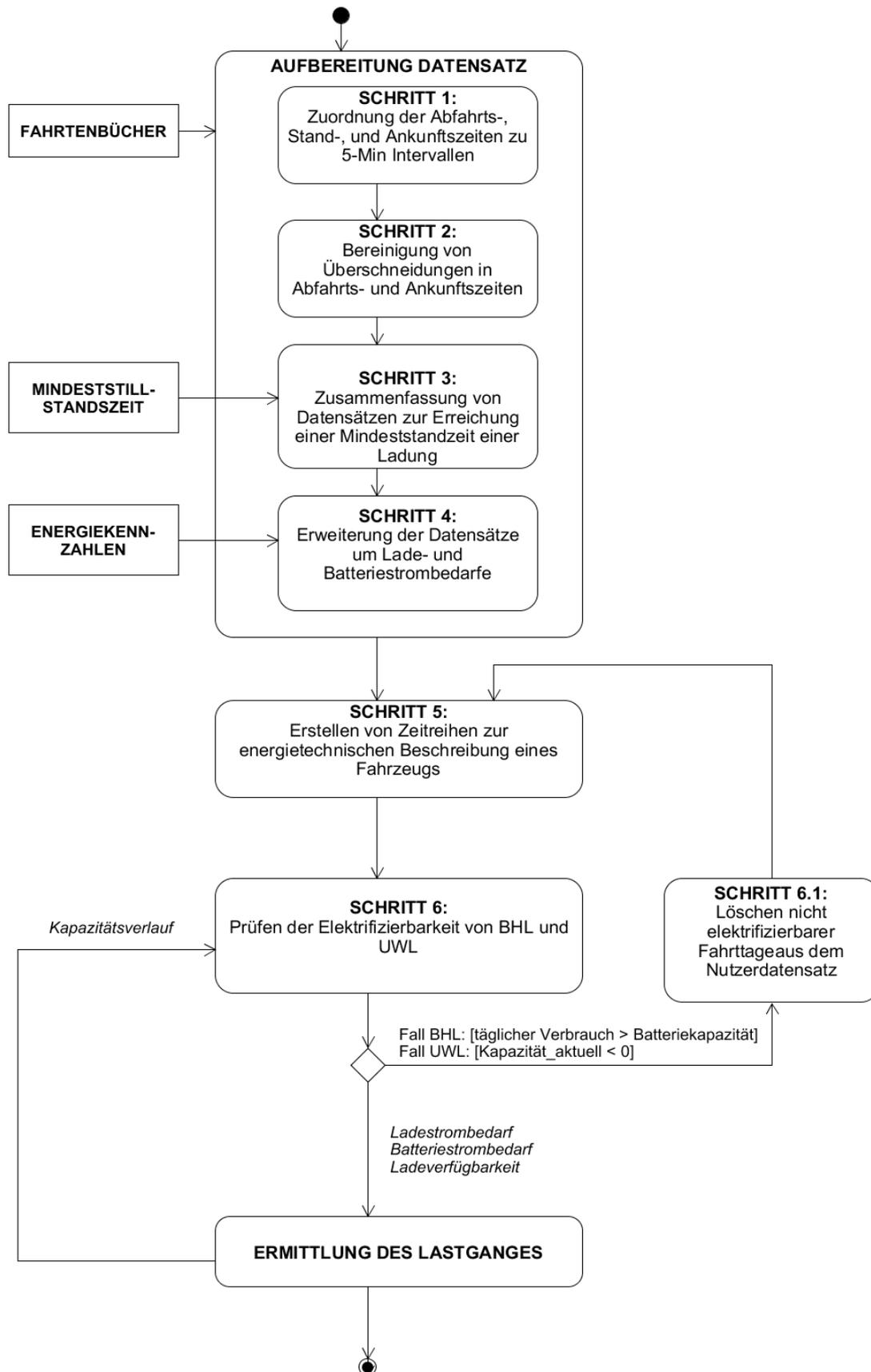


Abbildung 5-9: Aufbereitung der Fahrtenbücher und Filtern der nicht elektrifizierbaren Fahrttage

Erstellen von Zeitreihen

Die Informationen der Nutzerdaten werden für die Weiterverarbeitung in Zeitreihen dargestellt (Schritt 5), die es erlauben das Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt aus energietechnischer Sicht zu beschreiben. Die Information, ob das Fahrzeug ladebereit ist, wird durch die Zeitreihe Ladeverfügbarkeit LV wie folgt beschrieben:

$$LV = \sum_1^T lv_t \quad (32)$$

$$\text{Mit: } lv_t = \begin{cases} 0 & : \text{Fahrzeug nicht ladebereit} \\ 1 & : \text{Fahrzeug ladebereit} \end{cases} \quad (33)$$

LV unterscheidet sich für die BHL und UWL. Erstere nehmen in den Zeitschritten nach der letzten Ankunft bis zur ersten Abfahrt den Wert 1 an, während die UWL auch zwischendurch (für die Dauer des Zwischenstopps) 1 haben können. Für das gesteuerte Laden wird je nach Anwendungsfall und Möglichkeit der Ladung eine der beiden Zeitreihen verwendet. Bei diesem Vorgehen wird angenommen, dass jedes Fahrzeug über einen eigenen Ladeplatz verfügt und damit direkt bei Ankunft geladen werden kann.

Für die Zeitreihe des aufkommenden Ladestrombedarfs LSB gilt:

$$LSB = \sum_1^T lsb_t \quad (34)$$

$$lsb_t = \begin{cases} lsb_t > 0 & : \text{während der Fahrt} \\ lsb_t = 0 & : \text{Fahrzeug steht} \end{cases} \quad (35)$$

wenn $lsb_t \neq 0$,

$$\text{dann } lsb_t = \frac{LB_{\text{Fahrt, spez.}}}{n_{\text{Zeitschritte, Fahrt}}} \quad (36)$$

Die Zeitreihe des Batteriestrombedarfs wird mit Anwendung des Ladewirkungsgrades der Batterie zu:

$$BSB = \sum_1^T bsb_t = \sum_1^T lsb_t / \eta_{\text{Ladung}} \quad (37)$$

Prüfen der Elektrifizierbarkeit und Filtern der Daten

Die Prüfung der Elektrifizierbarkeit erfolgt für BHL und UWL unterschiedlich. Bei BHL wird die Summe von BSB_{BHL} für den Zeitraum eines Tages addiert. Überschreitet der resultierende Wert die Nennkapazität der Batterie, so werden alle Fahrten dieses Tages gelöscht. LV_{BHL}

wird an diesem Tag vollständig auf 1 gesetzt, da das Fahrzeug nicht genutzt wird. LSV_{BHL} und BSB_{BHL} werden in dem Zeitraum zu Null. Die Prüfung von UWL erfolgt mithilfe der Zeitreihe zur Beschreibung der Restkapazität, welche bei der Ermittlung des Lastganges berechnet wird (vgl. Kapitel 5.5). Sollte ein Wert im Zeitraum eines Tages dieser Zeitreihe unter Null fallen, wird entweder analog zum Vorgehen der BHL verfahren oder alternativ werden ausschließlich die nicht elektrifizierbaren Fahrten aus den Datensätzen entfernt. Die Anzahl der gelöschten Tage bei UWL fällt tendenziell niedriger aus, da die Restkapazität durch die Ladung zwischendurch erhöht wird.

5.5 Ermittlung des Ladeleistungsverlaufs der ungesteuerten und gesteuerten Ladung

Ungesteuerte Ladung

Die Lastgang-Zeitreihe $LG_{ungest.}$ des ungesteuerten Ladens ist wie folgt definiert:

$$LG_{ungest.} = \sum_1^T lg_{ungest.,t} \quad (38)$$

$$lg_{ungest.,t} = \begin{cases} lg_{ungest.,t} \geq 0, & \text{wenn } lv_t = 1 \\ lg_{ungest.,t} = 0, & \text{wenn } lv_t = 0 \end{cases} \quad (39)$$

Zur Bestimmung des Wertes von $lg_{ungest.,t} > 0$ wird die Zeitreihe des Kapazitätsverlaufs $KV_{ungest.}$ nach Gl. (40) erstellt:

$$KV_{ungest.} = \sum_1^T kv_{ungest.,t} = \sum_1^T kv_{ungest.,t-1} - bsb_{t-1} + \left(\frac{lg_{ungest.,t-1}}{\frac{n_{Stunde}}{1}} \right) \frac{1}{\eta_{Ladung}} \quad (40)$$

Der Klammerausdruck der Gleichung beschreibt die Energiemenge, um die die Energiemenge in der Batterie bei der Ladeleistung $lg_{ungest.,t-1}$ im betrachteten Zeitschritt erhöht wird. n_{Stunde} ist die Anzahl der Zeitschritte in einer Stunde.

Für alle $kv_{ungest.,t}$ gilt:

$$0 \leq kv_{ungest.,t} \leq K_{Bat,netto} \quad (41)$$

Für $lg_{ungest.,s}$ im Zeitintervall S gilt:

$$lg_{ungest.,s} = \begin{cases} lg_{ungest.,s} = l_{max}, & \text{wenn } kv_{s+1} \leq K_{Bat,netto} \\ lg_{ungest.,s} = \left(\frac{(K_{Bat,netto} - kv_s)}{n_{Stunde}} \right) \cdot \eta_{Ladung}, & \text{wenn } kv_{s+1} \geq K_{Bat,netto} \end{cases} \quad (42)$$

S steht hier für alle Zeitbereiche, in denen alle aufeinander folgenden $lv_t = 1$ sind und damit jeweils dem Zeitbereich vom Anschluss des Fahrzeugs am Netz bis zur Weiterfahrt. Gl. (42) sagt aus, dass die Ladung bis zum vorletzten Zeitpunkt vor der Vollladung (mit Erreichen von $K_{Bat,netto}$) mit der maximalen Ladeleistung l_{max} durchgeführt wird. Im Zeitschritt vor der Vollladung, wird die fehlende Leistung so angepasst, dass genau die fehlende Energie bis die Batteriekapazität erreicht wird, aufgenommen wird.

Gesteuerte Ladung

Die Lastgang-Zeitreihe $LG_{gest.}$ ist Entscheidungsvariable bei der Lösung eines linearen Optimierungsproblems. Nachfolgend ist die mathematische Formulierung des Optimierungsproblems dargestellt. Weitere Restriktionen, die bei der Programmierung in Cplex notwendig sind, werden hier nicht dargestellt.

Die Zielfunktion ist eine Minimierungsfunktion der Stromkosten des Kunden, wie in Kap. 5.1 beschrieben, ergänzt um Hilfsvariablen ($sl_{gl,t}$, $p_{gl,sl}$, $sl_{EF,t}$, $p_{EF,sl}$) die eine vollständige Lösung des mathematischen Problems ermöglichen.

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin} \sum_{t=1}^T KB_{Strom} \\ = x_{Netz,t} \cdot p_{Netz,t} + x_{EV,t} \cdot p_{pv,EVV} + x_{pv,Ein,t} \cdot p_{pv,EV} + sl_{gl,t} \cdot p_{gl,sl} \\ + \sum_{EF} sl_{EF,t} \cdot p_{EF,sl} \end{aligned} \quad (43)$$

Die Entscheidungsvariablen sind:

- Ladeleistungen der Fahrzeuge $lg_{gest.EF,t}$ mit $EF = 1$ bis n_{EF} in allen Zeitpunkten t des Betrachtungszeitraumes
- Lastgänge des Bezugs aus dem Netz $lg_{Netz,t}$, des Eigenverbrauchs $lg_{pv,EV,t}$ und der Netzeinspeisung $lg_{pv,Ein,t}$ in allen Zeitpunkten t des Betrachtungszeitraums
- Batteriekapazitäten $kv_{gest.,t}$ der Fahrzeug in allen Zeitpunkten t des Betrachtungszeitraumes

- Slack-Variable $sl_{EF,t}$ zur Ermöglichung einer nicht vollständigen Ladung vor der ersten Fahrt
- Slack-Variable $sl_{gl,t}$ zur Ermöglichung der Überschreitung der vorgegebenen maximalen Netzleistung

Die Lösung erfolgt unter Beachtung der nachfolgenden Restriktionen und Wertebereiche. In jedem Zeitschritt t des Optimierungshorizontes T wird die Systemlast aus den bestehenden Lasten des Kunden $lg_{Geb,t}$ und der Summe der Ladeleistungen aller Fahrzeuge $lg_{gest.,EF}$ durch $lg_{pv,EV,t}$ und $lg_{Netz,t}$ gedeckt:

$$\sum_{EF=1}^n lg_{gest.EF,t} + lg_{Geb,t} = lg_{pv,EV,t} + lg_{Netz,t} \quad (44)$$

Die Eigenverbrauchslast und die Netzeinspeisung sind durch den Einspeiseverlauf der PV-Erzeugung $lg_{pv,Erz,t}$ begrenzt:

$$lg_{pv,EV,t} + lg_{pv,Ein,t} = lg_{pv,Erz,t} \quad (45)$$

Die PV-Einspeisung erfolgt ausschließlich, wenn die PV-Erzeugung die Systemlast übersteigt:

$$0 \leq lg_{pv,Ein,t} \leq lg_{pv,Erz,t} \cdot b_{pv,t} \quad (46)$$

$$\text{mit } b_{pv,t} = \begin{cases} 0 & : x_{Netz,t} = 0 \\ 1 & : x_{Netz,t} > 0 \end{cases} \quad (47)$$

Die Ladeleistung jedes Elektrofahrzeugs liegt innerhalb einer unteren und oberen Grenze, $lg_{EF,min}$ und $lg_{EF,max}$, um die technischen Bedingungen des Fahrzeugs und der Ladeinfrastruktur zu berücksichtigen.

$$lg_{EF,min} \leq lg_{gest.,EF} \leq lg_{EF,max} \quad (48)$$

Für $lg_{gest.,EF,t}$ und $kv_{gest.,t}$ gelten, wie bei der ungesteuerten Ladung die Gleichungen (39) - (41).

Zu Beginn der ersten Fahrt des Tages sind die Fahrzeuge vollgeladen:

$$kv_{gest.Fahrt1} = K_{Bat,netto} + sl_{EF,Fahrt1} \quad (49)$$

$sl_{EF,Fahrt1}$ wird hier eingesetzt, um eine nicht mögliche Vollladung aufgrund von fehlender Ladezeit zu ermöglichen. In den anderen Fällen, bei einer möglichen Vollladung, wird mithilfe einer hohen Preiskomponente $p_{EF,sl}$ ein $sl_{EF,1.Fahrt} > 0$ vermieden (Gl. (43)).

Des Weiteren soll die Systemlast abzüglich der Eigenerzeugung die Jahreshöchstlast des Gebäudes $x_{Geb,max}$ nicht überschreiten, um höhere Netzentgelte oder einen Netzausbau zu vermeiden. An dieser Stelle wird ebenfalls eine Slack-Variable $sl_{gl,t}$ zur Ermöglichen der Lösung des Problems verwendet.

$$\sum_{EF=1}^J lg_{EF,t} + lg_{Geb,t} - lg_{pv,EV,t} - sl_{gl,t} \leq lg_{Geb,max} \quad (50)$$

Der Optimierungshorizont beginnt um 6.00 Uhr und endet um 8.00 Uhr des nächsten Tages, sodass jeweils der Wert der Batteriekapazität $kv_{gest.,6.00}$ um 6.00 Uhr an den nachfolgenden Optimierungszyklus übergeben wird. Hintergrund ist, dass die meisten Fahrzeuge (des Anwendungsfalls in Kapitel 6) ihre erste Fahrt in diesem Zeitraum antreten. Dadurch kann zum einen der späteste mögliche Zeitpunkt für eine Vollladung der Fahrzeuge berücksichtigt werden. Zum anderen kann der Ladevorgang gleichzeitig stärker an die PV-Erzeugung angepasst werden, da der Zeitraum zwischen 6.00 Uhr und 8.00 Uhr auf diese Weise mit den tagesaktuellen Werten optimiert werden kann.

5.6 Zusammenfassung und Bewertung

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Simulationsumgebung zur Ermittlung von ungesteuerten und gesteuerten Ladeleistungen bei der Elektrifizierung eines konventionellen Fuhrparks und zur Bewertung von Kostensenkungspotentialen durch das gesteuerte Laden entwickelt.

Zunächst wurde eine Ladestrategie konzeptioniert und ihr Wirkungsmechanismus zur Senkung der Stromkosten vorgestellt. Bei der hier eingesetzten Ladestrategie werden Kostenunterschiede in den HT/NT-Tarifen genutzt, der Eigenverbrauch erhöht und die leistungsabhängigen Netzentgelte minimiert.

Danach wurde die Methodik zur Bewertung des Kostensenkungspotentials erarbeitet und die dafür notwendigen Softwarekomponenten dargestellt und ihr Zusammenwirken beschrieben. Das Kostensenkungspotential wurde definiert als Differenz zwischen den Stromgesamtkosten des Kunden (für Fuhrpark- und Kundelast) bei gesteuertem und ungesteuertem Laden, bezogen auf die Zusatzkosten die der ungesteuerte Fuhrpark verursacht.

Anschließend erfolgte eine detaillierte Beschreibung der Einzelkomponenten und Modelle der Simulationsumgebung. Diese besteht aus vier Hauptkomponenten: dem Verbrauchsmodell, der Datenaufbereitung und Filterung, der Lastgangermittlung und zuletzt der Ermittlung des Kostensenkungspotentials.

Hervorzuheben ist hier das Verbrauchsmodell, welches den Energiebedarf für fünf verschiedene Fahrzeugtypen fahrtenspezifisch ermittelt, um den resultierenden Ladeenergiebedarf nach einer Fahrt zu erhalten und um die Elektrifizierbarkeit prüfen zu können. Das Modell beinhaltet zum einen die translatorische Bewegungsenergie des Fahrzeugs, welche mit dynamischen Bewegungsgleichungen bestimmt wird und die Rekuperationsenergie berücksichtigt. Die notwendigen Geschwindigkeitsverläufe für die Bewegungsgleichungen entstammen verschiedenen Streckentypen, die sich auf den km-abhängigen Grundbedarf einer Fahrt auswirken. Die verwendeten Streckentypen entsprechen Stadt-, Überland- und Autobahnfahrten. Zum anderen wurde im Modell der fahrtzeit- und witterungsabhängige Nebenverbrauch des Fahrzeugs implementiert. Die Zeitabhängigkeit des Nebenverbrauchs wurde mithilfe der durchschnittlichen Fahrtzeiten der drei Streckentypen in eine Distanzabhängigkeit überführt, um einen fahrtsspezifischen Gesamtenergiebedarf zu erhalten. Die Auswirkungen der Witterung und der Streckentypen auf den Energiebedarf wurden für einen Mittelklassewagen anhand der Reichweitenreduzierung veranschaulicht. Es wurde gezeigt, dass sich die Reichweite auf ein Drittel der maximalen Reichweite reduzieren kann, was maßgeblich durch hohen Nebenverbrauch bei langen Fahrtzeiten im Stadtverkehr und bei niedrigen Temperaturen verursacht wird.

Eine weitere wesentliche Komponente der Simulationsumgebung ist die Lastgangermittlung. Beim ungesteuerten Laden wird der resultierende Energiebedarf bei Netzanschluss direkt mit der maximal möglichen Ladeleistung bis zur Vollladung der Batterie geladen, sofern die Standzeit dies ermöglicht. Die Ladeleistungen des gesteuerten Ladens werden mithilfe eines Optimierungsalgorithmus ermittelt. Dieser berechnet die Ladeleistungen der Fahrzeuge so, dass die Stromkosten minimiert werden, bei Einhaltung von Restriktionen, die das Nutzerverhalten nicht einschränken.

Bewertung

Mit der entwickelten Simulationsumgebung ist ein Flottenbetreiber in der Lage seinen ungesteuerten und gesteuerten Lastgang (bei vollständiger Wissensbasis der Nutzerdaten) und die Stromkosten zu bestimmen, die sich bei einer Elektrifizierung des elektrifizierbaren Anteils eines konventionellen Fuhrparks ergeben würden. Durch die witterungsabhängige Komponente im Verbrauchsmodell, werden detaillierte Daten zum jahreszeitabhängigen Verbrauch und zu den Interdependenzen der Erzeugungsanlage generiert. Für den Betreiber ist die differenzierte Analyse für eine genaue wirtschaftliche Betrachtung von Bedeutung sowie für die kostenoptimale Planung des Fuhrparks. Letzteres hat den Hintergrund, dass der jahreszeitliche Mehrverbrauch die Fahrtweite wesentlich reduzieren kann und sich auf die Gesamtanzahl notwendiger Fahrzeuge auswirken kann, mit der Folge, dass keine eins-zu-eins Substitution des Fuhrparks durch elektrische Fahrzeuge stattfinden kann. Das Modell ermöglicht die nicht elektrifizierbaren Fahrten zu identifizieren.

Die Komponenten 1 - 3 (Verbrauchsmodell, Datenaufbereitung und Lastgangermittlung) der Simulationsumgebung sind in ihren Annahmen parametrierbar- und erweiterbar. Beispielsweise können die resultierenden Energiebedarfe durch Änderung des Reku-perationsgrades oder eines abweichenden Streckenprofils beeinflusst werden, und so auf Kundenanforderungen angepasst werden.

Die Nutzung von historischen Kunden- und Wetterdaten führt bei der Ermittlung des Fahrplans zu einer Vernachlässigung von Abweichungen im Kundenverhalten und der Einspeiseprognose. Das ermittelte Potential wird im Feld voraussichtlich nicht vollständig erreicht werden, da es von der Güte der Prognosen abhängt.

6 Anwendungsfall

Die Ermittlung des Kostensenkungspotentials wird für einen Kunden mit Lastgangmessung und einem Fuhrpark aus acht Fahrzeugen für einen Betrachtungszeitraum von einem Jahr durchgeführt. Der Kunde verfügt über eine Eigenversorgung durch eine PV-Anlage. Der Fuhrpark wird vollständig am Betriebshof des Kunden geladen.

Simulationsumfang

Die erforderlichen Lastgänge für die Kostengegenüberstellung werden für drei unterschiedliche maximale Ladeleistungen der Fahrzeuge erstellt. Bzgl. der Eigenversorgung werden zwei Anlagengrößen betrachtet, so dass insgesamt sechs Fälle untersucht werden, wie in Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Parameter der simulierten Fälle

Fall	Installierte PV-Leistung	Maximale Ladeleistung
1.1	30 kWp	3,7 kW
1.2	30 kWp	11 kW
1.3	30 kWp	22 kW
2.1	50 kWp	3,7 kW
2.2	50 kWp	11 kW
2.3	50 kWp	22 kW

Datenbasis und Datenaufbereitung

Der Anwendungsfall basiert auf einer Auswahl von Nutzerdaten, die in einem Feldversuch des Projektes metropol-E generiert worden sind. Im Feldversuch wurden im Zeitraum von ca. 1,5 Jahren die Fahrtdaten verschiedener Nutzer eines gewerblichen Fuhrparks protokolliert. Die Protokollierung der Fahrten erfolgte mithilfe einer Applikation, die im Projekt für die Anwendung auf Smart-Phones entwickelt wurde. Insgesamt waren bis zu 40 Smart Phones parallel im Einsatz. Ein Smart Phone wurde jeweils für einen ausgewählten Zeitraum einem Fahrzeug zugeordnet. Aus Datenschutzgründen erfolgte keine Protokollierung der Fahrzeugkenndaten. Die Auswahl der entsprechenden E-Fahrzeuge für die Simulation erfolgt anhand der beförderten Personen und des Transportgutes. Der aus diesen Daten ausgewählte Fuhrpark besteht aus 8 Fahrzeugen vom Typ e-Golf. Die verfügbare Netto-Kapazität der Fahrzeugbatterie wird in der Simulation mit 28 kWh angenommen.

Die Streckenarten werden in den Datensätzen nicht angegeben und eine Zuordnung erfolgt anhand der Fahrdistanz:

- $d_{\text{Fahrt}} > 10 \text{ km}$: -> EUCD
- $d_{\text{Fahrt}} \leq 10 \text{ km}$: -> ECE-15

Der ABF-Zyklus wird aufgrund der Randbedingungen des Anwendungsfalls nicht verwendet. Die Autorin ist davon ausgegangen, dass die meisten Fahrten in und durch städtische Bezirke stattfinden, da die Auslastung der Fahrzeuge gering ist und es sich um städtische Fahrzeuge handelt, die vorzugsweise für Kurierfahrten genutzt wurden.

Die Aufbereitung der Daten nach Abbildung 5-9 zur Ermittlung der erforderlichen Zeitreihen für die Simulationen der Lastgänge wird sowohl für die Nutzung der E-Fahrzeuge als Betriebshoflader als auch als Unterwegslader durchgeführt, um die Auswirkung der unterschiedlichen Ladezeitpunkte zu betrachten. Die Filterung der nicht-elektrifizierbaren Fahrten erfolgt in beiden Fällen mit der BHL-Methode, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Mindeststillstandzeit für eine Ladung soll 15 Minuten betragen. In Tabelle 6-2 sind die Jahresfahrleistungen der Fahrzeuge der originären Daten und nach der Elektrifizierung dargestellt. Lediglich ein Fahrzeug kann unter der angegebenen Nutzung nicht vollständig elektrifiziert werden. Insgesamt werden die Fahrzeuge im Vergleich zu den Durchschnittswerten von gewerblichen Fahrzeugen aus der KID (vgl. Kapitel 2) relativ wenig ausgelastet.

Tabelle 6-2: Jahresfahrleistung konventionell und elektrifiziert

Fzg. Kennz.	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
Jahresfahrleistung [km] konventionell	2.386	5.221	4.676	3.173	1.327	2.624	669	1.539
Jahresfahrleistung [km] elektrifiziert	2.386	5.221	4.565	3.173	1.327	2.624	669	1.539
Differenz [km]	0	0	111	0	0	0	0	0

Die Verteilung der ersten Abfahrten und der letzten Ankünfte an den Nutzungstagen der Fuhrparkfahrzeuge ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Die meisten Fahrzeuge fahren im Vormittagsbereich ab. Um 7.35 Uhr sind bereits 50 % aller Fahrzeuge unterwegs, 80 % werden bis 9.15 Uhr erreicht. Um 11.00 beenden 50 % der Fahrzeuge ihren Einsatz. Um

13.15 Uhr sind 80 % wieder am Betriebshof. D.h. dass ein Großteil der Fahrzeuge dann ladebereit ist, wenn die PV-Erzeugung im mittleren und oberen Leistungsbereich liegt, wie es anhand der beiden Einspeiseprofile³⁰ für Dezember und Juni zu erkennen ist.

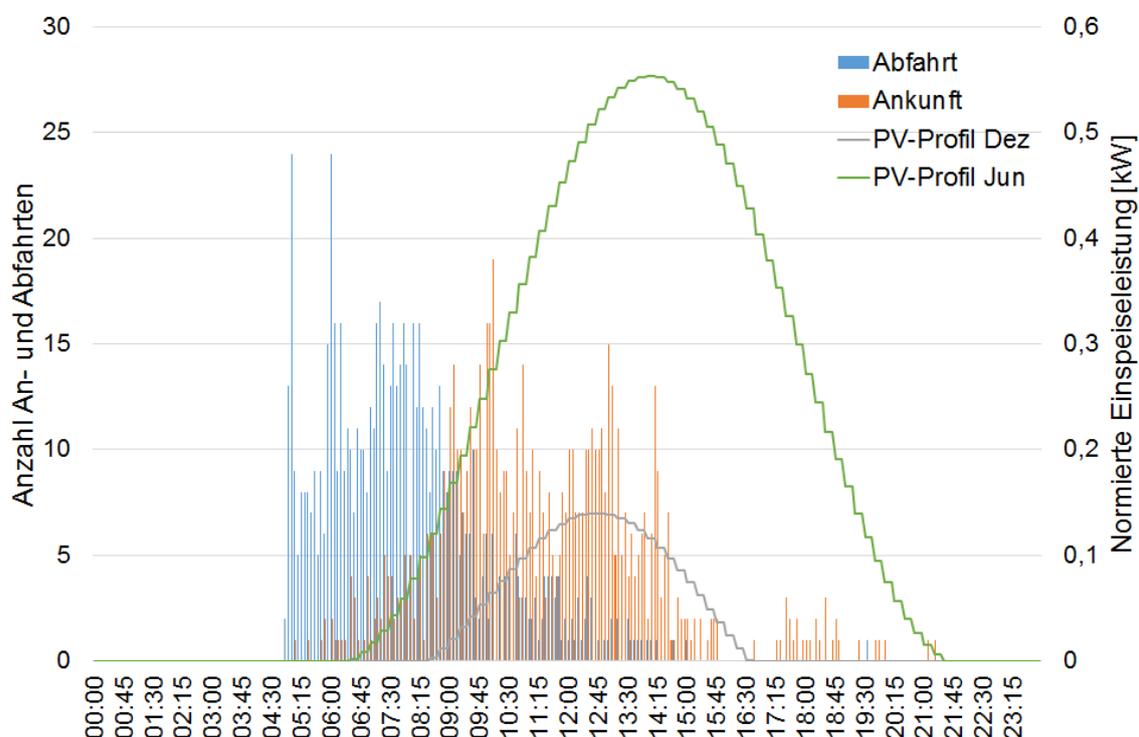


Abbildung 6-1: Absolute Häufigkeit der Uhrzeiten von Abfahrten und Ankünften

6.1 Eingangsdaten und Parameter

Kundenlastgang ohne Elektrofahrzeuge

Der verwendete Kundenlastgang ist der Lastgang eines Verwaltungsgebäudes aus dem Jahr 2011. Der Verlauf entspricht tendenziell dem allgemeinen Standardlastprofil eines Gewerbekunden G0 mit zwei Lastspitzen an den Werktagen. Die erste höhere Lastspitze liegt etwa bei 7.00 Uhr und die zweite niedrigere bei etwa 12.00 – 15.00 Uhr. Die Jahreslastspitze beträgt 101,6 kW und wird in den Wintermonaten erreicht, die Minimallast des Jahres liegt bei 10,4 kW. Die Tageslastspitze in den Sommermonaten liegt bei etwa 60 kW. An den Wochenenden liegt die Spitzenlast in den Sommermonaten etwa bei 20 - 25 kW, in den Wintermonaten bei etwa 40 kW. Der Jahresenergieverbrauch beträgt 285.936 kWh.

³⁰ Zur Veranschaulichung wurden die Einspeiseprofile der EnBW verwendet [98], welche auf eine Erzeugung von 1.000.000 kWh/a normiert sind.

Eigenerzeugung

Für die Simulation wurde ein Erzeugungslastgang mit einem lokalen Vorhersagemodell für PV-Erzeugung ermittelt, welches im Rahmen des Projektes entwickelt worden ist [89]. Das Modell arbeitet mit Solar-Einstrahlungsdaten des Deutschen Wetterdienstes, die mit dem Lokal-Modell Kurzzeitfrist COSMO-DE erzeugt werden [90]. COSMO-DE liefert Strahlungswerte in Deutschland für eine räumliche Auflösung von etwa 2,8 x 2,8 km und eine zeitliche Auflösung von 1 h.

Witterung

Stündliche Lufttemperatur- und Niederschlagswerte wurden für Dortmund aus dem Archiv des Portals METEOPROG aus dem Jahr 2011 bezogen [91], [92]. Niederschlagswerte werden in den Daten wie folgt differenziert:

- leichter Regen
- leichter Schnee
- Regen
- Schnee
- ohne wesentliche Niederschläge
- niederschlagsfrei

Die Scheibenwischer kommen bei den ersten vier Zuständen zum Einsatz.

Betriebswirtschaftliche Kennzahlen

In den betriebswirtschaftlichen Kennzahlen der Tabelle 6-3 werden die Einspeisevergütungen für PV aus Januar 2017 verwendet. Netzentgelte sind hier ausgewiesen, da die Steigerung des kWh-abhängigen Strompreises, welche durch die Erhöhung der Jahreslastspitze verursacht wird, nicht explizit ermittelt wird. Stattdessen werden die zusätzlichen Netzentgelte zu den Gesamtkosten hinzuaddiert.

Tabelle 6-3: Betriebswirtschaftliche Kennzahlen des Anwendungsfalls

Position	Kosten/Vergütung
Strompreis HT (Gesamtpreis) 6.00 – 20.00	25,75 [ct/kWh]
Strompreis NT (Gesamtpreis) 20.00 – 6.00	19,31 [ct/kWh]
Netzentgelte – Leistungspreis	83,16 [€/kW]
Einspeisevergütung 30 kWp	11,96 [ct/kWh]
Einspeisevergütung 50 kWp	10,71 [ct/kWh]
Eigenverbrauchsvergütung	0,00 [ct/kWh]

6.2 Ergebnisse

Tabelle 6-4 zeigt die Energiemengen des Kunden ohne elektrischen Fuhrpark und die resultierenden Kosten bei den gegebenen Annahmen.

Tabelle 6-4: Versorgung der Kundenanlage mit Eigenerzeugung ohne Elektrofahrzeuge

Installierte Leistung PV-Anlage	30 kWp	50 kWp
Energiemengen [kWh]		
Netzenergie x_{Netz}	251.590	233.133
Netzenergie HAT	148.514	130.161
Netzenergie NT	103.076	102.972
PV-Erzeugung	35.691	59.485
Eigenverbrauch $x_{\text{pv,EV}}$	34.346	52.802
Eigenverbrauchsanteil	0,9623	0,8877
Netzeinspeisung $x_{\text{pv,Ein}}$	1.345	6.683
Lastspitze Gebäude [kW]	101,60	101,60
Max.-Leistung PV-Anlage [kW]	25,60	42,60
Kosten [€]		
Netzenergiekosten HT	38.242,27	33.516,51
Netzenergiekosten NT	19.903,88	19.883,84
Einspeisevergütung	578,55	715,75
Eigenverbrauch	0,00	0,00
Kostenbilanz	57.567,60	52.684,60

Der Eigenverbrauchsanteil liegt bei beiden Alternativen im oberen Bereich von ca. 90 %. Die PV-Leistung führt nicht zu einer Reduzierung der Lastspitze, da diese um 7.00 Uhr im Februar auftritt, wenn die PV-Erzeugung bei Null liegt.

Der elektrische Fuhrpark führt zu einem Mehrverbrauch von 5.759 kWh, so dass der Gesamtenergiebedarf des Kunden 291.695 kWh beträgt. Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6 zeigen die Energiemengen und Kosten, die bei den beiden PV-Anlagengrößen im Zusammenspiel mit dem Fuhrpark resultieren. Das KSP der Ladesteuerung bezieht sich jeweils auf eine der beiden ungesteuerten Ladungen und steht in der zugehörigen Spalte.

Folgende Aussagen können anhand der Ergebnisse getroffen werden:

Ungesteuerte Ladung BHL und UWL

- BHL ist geringfügig besser eignet, um die PV-Energie aufzunehmen. Dies lässt sich mit den Nutzungszeiten der Fahrzeuge (vgl. Abbildung 6-1) erklären.
- Der Eigenverbrauchsanteil sinkt bei der ungesteuerten Ladung mit steigender Ladeleistung der Fahrzeuge, da mit steigender Ladeleistung die Ladedauern kürzer werden.
- UWL werden geringfügig häufiger in Zeiten mit NT-Tarifen geladen als BHL.
- Ab einer Ladeleistung von 11 kW ist ein wesentlicher Unterschied zwischen BHL und UWL zu erkennen, was in der Anhebung der Spitzenlast begründet liegt. K_{Zusatz} wächst um 75 % (BHL) bzw. um 100 % (UWL), wenn die Ladeleistung von 3,7 kW auf 22 kW erhöht wird.
- Bei der ungesteuerten Ladung wird der Energiebedarf der Fahrzeuge bei der 30 kWp PV-Anlage zu etwa 10 %, bei der 50 kWp PV-Anlage zu etwa 25 % aus der Eigenenerzeugung gedeckt.

Auswirkungen der optimierten Ladung:

- Das KSP steigt mit steigender Ladeleistung und kann bei 22 kW bis zu 70 % betragen.
- Die Erhöhung der Spitzenlast wird bei allen Ladeleistungen vermieden und begründet maßgeblich das KSP.
- Die Eigenverbrauchsanteile werden erhöht, bei der 30 kWp PV-Anlage werden die Fahrzeuge zu etwa 15 %, bei der 50kWp PV-Anlage zu etwa 40 % eigenversorgt.
- Höhere Anteile werden nicht erreicht, da die Fahrzeuge bei sonstiger Überdeckung des Gesamtenergiebedarfs durch die PV-Erzeugung nicht ladebereit sind, weil sie entweder bereits vollgeladen sind oder nicht am Netz angeschlossen sind.
- Der restliche Energiebedarf der Fahrzeuge wird hauptsächlich in Zeiten mit NT-Tarifen bezogen.

Zur Veranschaulichung der Wirkungsweise der Ladesteuerung werden in Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 die Lastgänge der PV-Erzeugung, des Gebäudes und der gesteuerten und ungesteuerten Ladung für Fall 1.3 und 2.3 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Verlagerung der Ladung in die Abendstunden zum Beginn des NT-Tarifs und in Zeiten mit höherer PV- als Gebäude-Leistung.

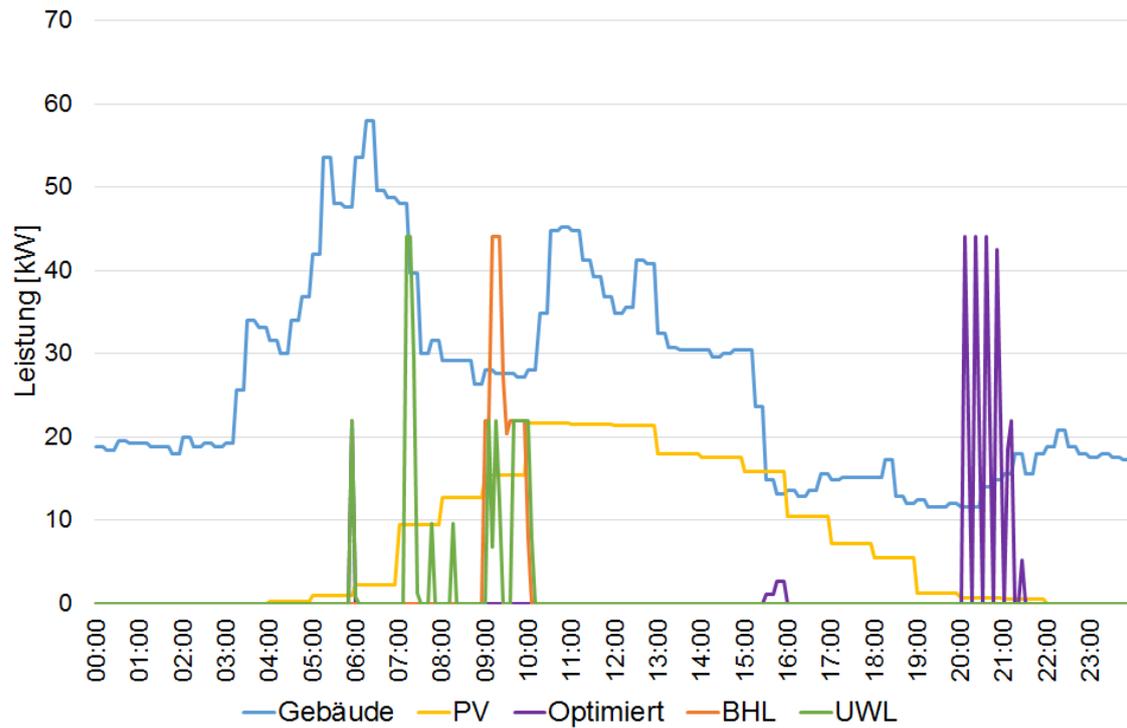


Abbildung 6-2: Lastverläufe am 16. Juni 2011 bei Fall 1.3

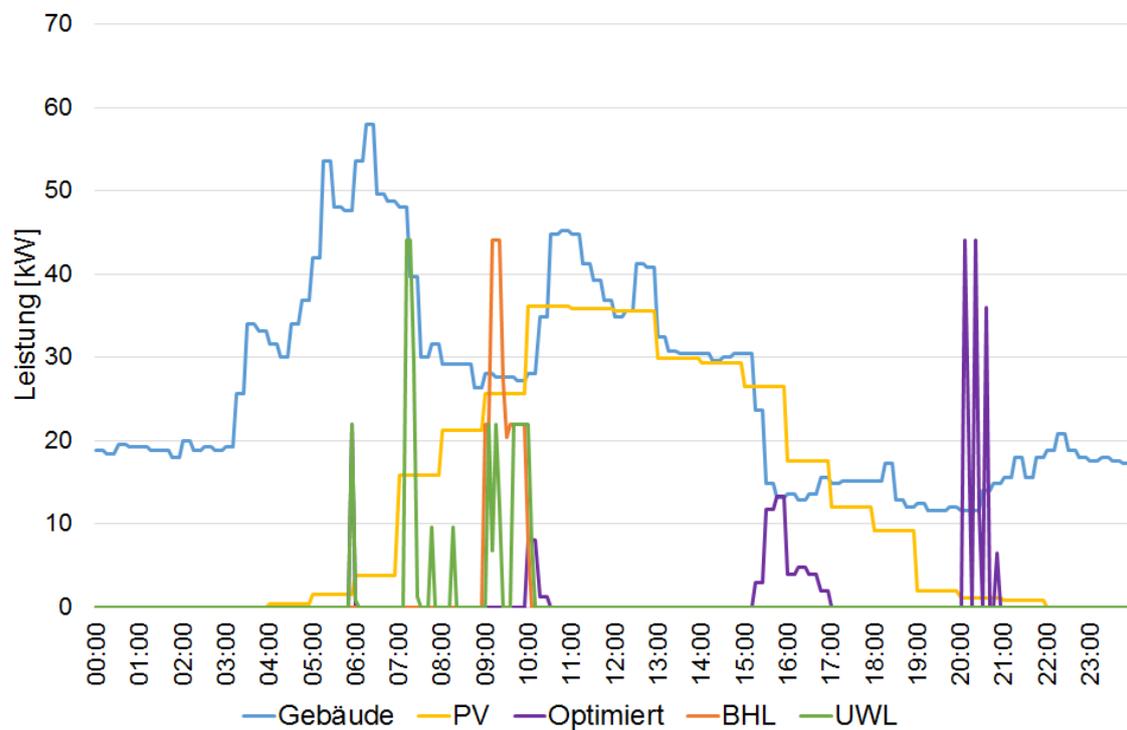


Abbildung 6-3: Lastverläufe am 16. Juni 2011 bei Fall 2.3

Bewertung und Zusammenfassung

Anhand der Ergebnisse lässt sich zusammenfassen, dass ein Fuhrparkbetreiber in jedem Fall den Einsatz einer Ladesteuerung prüfen sollte. Im betrachteten Anwendungsfall ist trotz geringer Fuhrparkauslastung ein deutlicher Kostenvorteil generiert worden. Insbesondere wenn hohe Ladeleistungen erforderlich sind, um hohe Elektrifizierungsgrade zu erreichen, ist mit einem Anstieg der Spitzenlast des Kunden zu rechnen, der die Zusatzkosten, die der Fuhrpark verursacht, wesentlich erhöht. Je nach Anschaffungs- und Betriebskosten des Lademanagements, kann sich die Implementierung auch ohne Eigenerzeugung bereits nach wenigen Jahren rentieren. Für eine wesentliche Steigerung des Eigenverbrauchs sollte der Optimierungshorizont auf mehrere Tage erhöht werden, so dass die Ladung nicht um 8.00 Uhr beendet sein muss. Dies bezieht sich auf eine Ladung an den Wochenenden, wenn die Fahrzeuge überwiegend am Betriebshof stehen und nicht ladebereit sind, weil die Batteriekapazität erreicht worden ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der erhöhten Attraktivität des Einsatzes von Elektrofahrzeugen im gewerblichen Bereich und durch ihren möglichen Beitrag, die energiepolitischen Ziele und die Marktintegration von Elektrofahrzeugen voranzutreiben, wurden in dieser Arbeit Untersuchungen zum Potential von gewerblich gehaltenen Pkw und leichten Nutzfahrzeugen durchgeführt. Diese beiden Fahrzeugtypen umfassen aktuell etwa sechs Millionen Fahrzeuge, was dem Zielbestand des Energiekonzepts an elektrischen Fahrzeugen in 2030 entspricht. Auf Ebene des elektrischen Energiesystems betreffen die Analysen zum einen die Auswirkungen einer vollständigen Elektrifizierung in Bezug auf Energie- und Leistungsbedarf und die Möglichkeit, Strom von dargebotsabhängigen Energieerzeugern ohne weitere Steuerungsmaßnahmen beim Ladevorgang zu integrieren. Auf Nutzerebene wurden zum anderen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für einen Fuhrparkbetreiber durchgeführt, da die Hebung der Potentiale auf Systemebene maßgeblich von der Investitionsentscheidung der Nutzer beeinflusst wird. Aufgrund der besonderen Eignung von Elektrofahrzeugen zum Einsatz in einem Fuhrpark dient dieser als Eintrittssegment und Katalysator für die Elektromobilität und bedarf besonderer Beachtung. Die Untersuchungen fokussieren den finanziellen Vorteil durch den Einsatz eines Lademanagements im Zusammenhang mit der Nutzung von lokalen erneuerbaren Erzeugungsanlagen. Dabei wurden die aktuelle Kostenstruktur beim Strombezug und die daraus resultierenden Mechanismen zur Kostenreduktion berücksichtigt.

Eine vollständige Elektrifizierung wurde mithilfe einer statistischen Auswertung der Verkehrsstudie „Kraftfahrzeuge in Deutschland 2010“ untersucht. Der zur Verfügung stehende Datensatz der beiden Fahrzeugtypen enthält mehr als 80.000 Fahrtdaten von ca. 50.000 Fahrzeugen, die in einem Zeitraum von einem Jahr erfasst worden sind. Damit wurden statistische Energiebedarfs- und Leistungsprofile für verschiedene Wochentagstypen und Monate erstellt, die das energietechnische Verhalten von Pkw und LNfzg beschreiben. Die Verbräuche wurden dabei nach Sommer- und Wintermonaten differenziert und es wurden Ladungen mit minimal möglichen Ladeleistungen angenommen, die sich nach jeder Fahrt aus dem nachzuladendem Energiebedarf und der maximalen Ladedauer ergeben. Eine vollständige Elektrifizierung bei Annahme der Verkehrszahlen aus der KID 2010 führt bei Pkw an den meisten Werktagen zu einem zusätzlichen Leistungsbedarf von etwa 5 - 15 GW im elektrischen Energiesystem, maximal werden ca. 25 GW benötigt. Die LNfzg verursachen einen Mehrbedarf von 2 - 6 GW, maximal jedoch etwa 14 GW. Die Lastspitzen treten zur Mittagszeit auf, zum Zeitpunkt der Spitzenlast in Deutschland mit ca. 85 GW im Winter [101]. Die resultierenden Ladeleistungen liegen in 90 % aller Ladevorgänge bei Pkw bei unter 10 kW und bei LNfzg bei unter 25 kW. Das Aufkommen von besonders hohen Ladeleistungen von über 300 kW liegt im Promillebereich. Der Jahresenergiebedarf beider Fahrzeugtypen beträgt etwa 26 TWh und entspricht damit ca. 5 % des aktuellen Strombedarfs in Deutschland [102].

Die Untersuchung der Interdependenz der ungesteuerten Ladung mit dem Stromangebot von dargebotsabhängigen Erzeugungsanlagen erfolgte für das Jahr 2014. Die Ergebnisse wurden anhand von ausgewählten Kennzahlen, wie der installierten Leistung der Erzeuger sowie dem notwendigen Speicherbedarf und der steuerbaren Zusatzerzeugung zur Erreichung eines autarken Betriebs dargestellt. Um die installierte Leistung der Erzeuger pro Fahrzeug zu bestimmen, wurde aus den Einspeisezeitreihen der Anlagen aus dem Versorgungsgebiet der Tennet TSO GmbH ein durchschnittlicher Referenzlastgang für PV und Windkraftanlagen ermittelt. Für die Bereitstellung der erforderlichen Energie zur Deckung des Jahresenergiebedarfs von 3.939 kWh bei Pkw, sind ca. 4,8 kW an installierter PV-Leistung und ca. 2,8 kW bei Windkraft erforderlich. Zur Deckung des Energiebedarfs der LNfzg in Höhe von 6.184 kWh liegen die installierten Leistungen bei ca. 7,5 kW bzw. ca. 4,3 kW. Für den Ausgleich der schwankenden monatlichen Energieerzeugung im Jahresverlauf entsteht ein Speicherbedarf bei einer Versorgung mit PV bei beiden Fahrzeugtypen von etwa einem Drittel der erzeugten Jahresenergie, was bei einem Pkw ca. 1.310 kWh und bei einem LNfzg ca. 2.070 kWh entspricht. Bei der Versorgung mit Windenergie sind die Speicher auf ca. ein Achtel der Jahresenergie auszulegen. Dies entspricht bei Pkw 480 kWh und bei LNfzg 760 kWh.

Soll die Energieautarkie ausschließlich mit einem zusätzlichen Erzeuger erreicht werden, muss dieser annähernd auf den Leistungsbedarf der Fahrzeuge ausgelegt werden. Daraus resultiert P_{Zusatz} bei Pkw zu 5,7 kW bei Versorgung mit PV und bei 6,4 kW mit Windkraft. Bei LNfzg resultiert P_{Zusatz} zu 8,6 kW bzw. 10 kW. Ohne zusätzliche Maßnahmen werden bei der Versorgung mit Strom aus PV Autarkiegrade von bis zu 60 % bei Pkw und 56 % bei LNfzg erreicht. Bei einer Versorgung aus Windkraftanlagen sind es bei beiden Fahrzeugtypen ca. 41 %.

Für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen auf Nutzerebene wurden zunächst die Strompreiskomponenten im Zusammenhang mit dem Strombezug vom lokalen Erzeuger, beispielhaft mit PV-Anlagen, identifiziert, um einen Preis zu bilden, der in die Kostenfunktion der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließt. Aufgrund der Fördermechanismen für EEG-Anlagen ist eine lokale Versorgung mit PV nicht immer vorteilhaft und sollte im Einzelfall geprüft werden.

Für die Kostengegenüberstellung des gesteuerten und ungesteuerten Fuhrparks wurde eine Software-Anwendung entwickelt, die die erforderlichen Lastgänge der Fahrzeuge auf Grundlage von Nutzerdaten simuliert. Dabei wurden witterungsbedingte und streckentypabhängige Unterschiede im elektrischen Energieverbrauch berücksichtigt, um einen möglichst hohen Praxisbezug herzustellen. Die Erzeugung der gesteuerten Lastgänge erfolgt durch das Lösen eines Optimierungsproblems mit der Zielfunktion der Kostensenkung der Gesamtstromkosten des Kunden. Eine mögliche Kostensenkung wurde dabei durch das Nutzen von HT/NT-Tarifen, die Minimierung der leistungsabhängigen Netznutzungsentgelte

und die Steigerung des Eigenverbrauchs umgesetzt. Die Ladeleistungen der Fahrzeuge fungieren dabei als Entscheidungsvariablen des Modells. In einem Anwendungsfall wurde die Wirksamkeit der Ladesteuerung gezeigt. Je nach installierter Ladeleistung, betrug die Kostensenkung bei maximaler Ladeleistung von 3,7 kW ca. 27 % bezogen auf die Stromzusatzkosten, die der elektrische Fuhrpark erzeugte. Bei 22 kW waren es bis zu ca. 70 %. Bei letzteren wurde die Kostensenkung wesentlich durch die Minimierung der Jahreslastspitze erreicht.

Mit der Erstellung der Energie- und Leistungsprofile für den gewerblichen Straßenverkehr, wurde eine Datenbasis geschaffen, mit denen in der weiterführenden Forschung Szenarien zur Komponentenauslegung und -optimierung im elektrischen Energiesystem mit verschiedenen Integrationsgraden der Elektromobilität untersucht werden können. Im Personenstraßenverkehr ist bzgl. der Gesamtverkehrsleistung kurz- und mittelfristig von keinen wesentlichen Änderungen auszugehen. Im Bereich des Güterverkehrs wird dagegen ein hoher Zuwachs prognostiziert. Die Entwicklung des Verkehrssektors mit neuen Mobilitätskonzepten sollte berücksichtigt werden. Diese können zu abweichenden Nutzungsweisen führen und damit die Ladezeiten beeinflussen. Lademanagementstrategien, die im Rahmen einer optimierten Umgestaltung des Energiesystems zur Anwendung kommen werden, können bei der Profilerstellung durch Implementierung von Sperrzeiten bei der Ladung ergänzt werden.

In der Simulationsumgebung für die Wirtschaftlichkeitsanalysen betrug der Optimierungshorizont der Ladesteuerung ca. einen Tag. Dieser Zeitraum führte dazu, dass der Strom der PV-Erzeugung am Wochenende nicht umfassend für die Ladung genutzt werden konnte, da Fahrzeuge, die am Wochenenden nicht bewegt wurden, bereits am Samstagmorgen vollgeladen waren. Eine Erweiterung des Optimierungshorizontes auf den nächsten Werktag würde den Eigenverbrauchsanteil weiter erhöhen. Ebenso sollte die Möglichkeit des bidirektionalen Ladens implementiert werden. Dieses wurde analytisch hinreichend untersucht und seitdem die erforderliche Ladeinfrastruktur jüngst verfügbar ist, auch in Praxistests erprobt. Beispielsweise wird beim Automobilhersteller Nissan am Werk in Cranfield die Rückspeisung ins Kundenetz mit dem Ziel der Spitzenlastreduktion erforscht oder bei Honda am Werk in Offenbach die Rückspeisung ins das öffentliche Netz zur Netzstabilisierung [99], [100]. In der entwickelten Software-Anwendung erfolgt die Umsetzung der Ladesteuerung durch Preisanreize. Der Freiheitsgrad des Fuhrparkbetreibers wird nicht durch Steuerungseingriffe durch Dritte eingeschränkt. Eine Ladung ist damit jederzeit möglich und die Bereitschaft zur Umsetzung eines Lademanagements ist beim Fuhrparkbetreiber tendenziell größer. Netzdienliche Maßnahmen durch den Netzbetreiber oder eine Energieeinkaufsoptimierung durch den Lieferanten werden aktuell durch HT-/NT Tarife umgesetzt. Hier können Sperrzeiten für die Ladung, ähnlich wie bei Wärmepumpen implementiert werden, und der Einfluss dieser auf Elektrifizierungsgrade

untersucht werden. Insgesamt können mit der Software-Anwendung Produkte für das zukünftige Energiesystem auf ihre Preisgestaltung hin erforscht werden, bei denen die Steuerungsmaßnahmen nicht durch aktives Eingreifen eines Dritten in den Ladevorgang umgesetzt werden.

Zwingend erforderlich für eine Investitionsentscheidung des Fuhrparkbetreibers ist die Analyse der Kostenseite des Lademanagements, um eine Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen. Zur Umsetzung gibt es verschiedene Systeme, die in sich in ihren Zielerreichungsgraden und dem Kostenaufwand unterscheiden. Die technischen Einschränkungen bei rudimentären Systemen können, soweit möglich, im Optimierungsmodell integriert werden.

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungsverzeichnis

AbLaV	Verordnung zu abschaltbaren Lasten
ABF	Autobahnfahrzyklus
ASW	Analyse-Software
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft Technologie
EEA	Erneuerbare Energieanlage
BHL	Betriebshoflader
ECE-15 Teilzyklus	Teilzyklus der United Nations Economic Commission for Europe Specification (Stadtverkehr)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EF	Elektrofahrzeuge
EmoG	Elektromobilitätsgesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EUCD	Extra Urban Driving Cycle (Überlandfahrtzyklus)
Fzg	Fahrzeug
Fzkm	Fahrzeug-Kilometer
HT	Hoch-Zeit-Tarif
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KAV	Konzessionenabgabeverordnung
KBA	Kraftfahrzeugbundesamt
LNfzg	Leichtes Nutzfahrzeug (Lkw < 3,5 t)
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
NT	Niedrig-Zeit-Tarif
Pkw	Personenkraftfahrzeug
KraftStG	Kraftfahrzeugsteuergesetz
KID	Kraftfahrzeuge in Deutschland (Verkehrsstudie)
KiT	Kraftfahrzeuge in Tabellen (Anwendungstool für Analysen der KID)
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
StromStG	Stromsteuergesetz
StromStV	Stromsteuerverordnung
UNB	Übertragungsnetzbetreiber
UWL	Unterwegslader
VNB	Verteilnetzbetreiber
WTT	Wochentagstyp
WTT1	Wochentagstyp 1: Montage
WTT2	Wochentagstyp 2: Dienstage, Mittwoch und Donnerstag
WTT3	Wochentagstyp 3: Freitage
WTT4	Wochentagstyp 4: Samstag
WTT5	Wochentagstyp 5: Sonn- und Feiertage
ZP	Zählpunkt (Hausanschlusskasten)

Formelzeichen

$\Delta KB_{gest.}$	Differenz der Kostenbilanzen bei gesteuertem und ungesteuertem Laden
$\alpha_{EFj,EE}$	Anlagenfaktor zur Dimensionierung der installierten Leistung bei bilanziell autarkem Betrieb eines Fahrzeugs
$\alpha_{E,prim,j}$	Anteil der Primärenergie des Fahrzeugtyps j am Primärenergiebedarf des Straßenverkehrs
$\alpha_{E,prim,j,Stra\beta e}$	Primärenergiebedarf des Straßenverkehrs
$\eta_{Entladen}$	Entladewirkungsgrad
η_{Laden}	Ladewirkungsgrad
η_{Motor}	Motorwirkungsgrad
η_{Rekup}	Wirkungsgrad der Rekuperation
ρ_L	Luftdichte
A_{EV}	Stirnfläche eines Fahrzeugs
AG	Autarkiegrad
$b_{pv,t}$	Boolean zur Darstellung der Einspeisemöglichkeit im Zeitpunkt t
$bb_{Fzg.,Zyk.,Witt}$	Zyklus- und Witterungs-abhängiger Energiebedarf einer Batterie eines Fahrzeugtyps

BSB	Zeitreihe des Ladestrombedarfs
bsb_t	Zeitreihenwert des Ladestrombedarfs im Zeitpunkt t
c_r	Rollwiderstandsbeiwert
$c_{Straßenverkehr}$	Anteil Primärenergiebedarf des Straßenverkehrs am Gesamtprimär-energiebedarf des Verkehrssektors
c_W	Luftwiderstandsbeiwert
$d_{Fahrt,j}$	Distanz einer Fahrt aus dem Fahrtendatensatz der KID
$d_{Fzg,j}$	Fahrzeugfahrleistung aller Fahrzeuge vom Fahrzeugtyp j
d_{Tag}	Tagesfahrleistung eines Fahrzeugs
D_{Zyklus}	Distanz eines Fahrzyklus
E_a	Beschleunigungsenergie
$E_{Fahrt,j}$	Energiebedarf für eine Fahrt aus dem Fahrtendatensatz der KID (fahrzeugtypspezifisch)
$E_{Fzg,\emptyset}$	Elektrischer Grundverbrauch einer Fahrt
$E_{EFj,Jahr}$	Durchschnittlicher Jahresenergiebedarf eines Fahrzeugs aus der KID
$E_{EE,norm,Jahr}$	Jahresenergieerzeugung der EEA-Referenz-Anlage
$E_{LNfzg,\emptyset}$	Elektrischer Grundverbrauch einer Fahrt eines LNfzg
E_{LW}	Energiebedarf zum Überwinden des Luftwiderstandes
$E_{Pkw,\emptyset}$	Elektrischer Grundverbrauch einer Fahrt eines Pkw
$E_{T,j}$	Energiezeitreihe eines Fahrzeugs aus der Fahrten-Datei
$e_{t,j}$	Energiewert der Energiezeitreihe im Zeitpunkt t
$E_{T,Fahrt-DS}$	Durchschnittliche Energiezeitreihe eines Fahrzeugs aus der Fahrten-Datei
$E_{T,Mo}$	Durchschnittliche Energiezeitreihe eines Fahrzeugs aus der Fahrten-Datei an einem Montag
$E_{T,Di}$	Durchschnittliche Energiezeitreihe eines Fahrzeugs aus der Fahrten-Datei an einem Dienstag
$E_{T,Di,Profil}$	Energieprofil eines Fahrzeugs des gleichen Typs aus der Fahrzeug-Datei an einem Dienstag
E_{Rekup}	Rekuperationsenergie
E_{Roll}	Energiebedarf zum Überwinden des Rollwiderstandes
E_{unter}	Unterdeckung des monatlichen Energiebedarfs ausgewählter

	Fahrzeuge
$E_{Zusatz,max}$	Maximale Zusatzenergie durch einen Reserveerzeuger für einen autarken Betrieb
$F_{Kfz,e}$	Umweltbonus beim Kauf eines EF
$gb_{Fzg.,Zyk.,Witt}$	Zyklus- und Witterungs-abhängiger Grundenergiebedarf eines Fahrzeugtyps
I	Investitionskosten
i	Kalkulationszinssatz
K_{Bat}	Batteriemiete
$K_{Bat,netto}$	Nutzbare Kapazität einer Fahrzeugbatterie
k_E	kWh-bezogene Strombeschaffungskosten des Lieferanten
k_{EEG_Um}	kWh-bezogene EEG-Umlage
$k_{E,PV,Fall1}$	Strombeschaffungskosten bei Nutzung einer PV Anlage im Fall 1
k_{EV}	kWh-bezogene Einspeisevergütung
k_{EVV}	kWh-bezogene Eigenverbrauchsvergütung
K_{ISH_Inf}	Wartung- und Instandhaltungskosten der Ladeinfrastruktur
$K_{ISH_Kfz,e}$	Wartung- und Instandhaltungskosten der EF
k_j	Relative Verbrauchskennzahl eines Fahrzeugtyps
$K_{Kfz,e}$	Anschaffungskosten für ein EF
$k_{Konz.}$	kWh-bezogene Konzessionen
$K_{Kraftstoff}$	Kosten für Kraftstoff von konventionellen Fahrzeugen pro Periode
k_{KWK_Um}	kWh-bezogene KWK-Umlage
k_{Last_Um}	kWh-bezogene Umlage für abschaltbare Lasten
$k_{mess,alt}$	kWh-bezogene alternative Messkosten
$k_{mess,konv.}$	kWh-bezogene konventionelle Messkosten
k_{Netz}	kWh-bezogene Netzkosten
k_{Off_Um}	kWh-bezogene Offshore-Umlage
k_{pr}	kWh-bezogene Marktprämie für Direktvermarktung
K_{St_e}	Steuern für EF pro Periode
k_{St}	kWh-bezogene Stromsteuer

K_{Strom}	Kosten für den Strombezug pro Periode
k_{Verm}	kWh-bezogener Aufwand für Direktvermarktung
K_{Vers_e}	Versicherungsprämie der EF pro Periode
k_{Ver}	kWh-bezogene Vertriebskosten des Stromlieferanten
K_{Zusatz}	Zusatzkosten des Kunden für Strom bei einem elektrischem Fuhrpark
K_0	Kapitalwert im Zeitpunkt $t=0$
KB_{Strom}	Kostenbilanz aus Einnahmen und Ausgaben für eingespeisten, selbst verbrauchten und aus dem Netz bezogenen Strom
KSP	Kostensenkungspotential
$kv_{gest,t}$	Zeitreihenwert des Kapazitätsverlaufs im Zeitpunkt t bei gesteuerter Ladung
$KV_{ungest.}$	Zeitreihe des Kapazitätsverlaufs
$kv_{ungest,t}$	Zeitreihenwert des Kapazitätsverlaufs im Zeitpunkt t bei ungesteuerter Ladung
kv_{s+1}	Zeitreihenwert des Kapazitätsverlaufs im Zeitpunkt nach dem Ladeende
$k_{§19_Um}$	kWh-bezogene Umlage für individuelle Netzentgelte
L	Liquidationserlös
L_{Bat}	Liquidationserlös für Batterien
L_{Inf}	Liquidationserlös der Ladeinfrastruktur
L_{Kfz_e}	Liquidationserlös für EF
$LB_{Fahrt,spez.}$	Fahrtspezifischer Ladestrombedarf
$lb_{Fzg,Zyk,Witt}$	Zyklus- und Witterungs-abhängiger Ladestrombedarf
$lg_{EF,max}$	Maximale Ladeleistung eines Fahrzeugs
$lg_{EF,min}$	Minimale Ladeleistung eines Fahrzeugs
$lg_{Geb,t}$	Zeitreihenwert des Gebäudelastgangs im Zeitpunkt t
$lg_{Geb,max}$	Jahreslastspitze der Gebäudeleistung
$LG_{gest.}$	Zeitreihe des Lastgangs beim gesteuerten Laden
$lg_{gest.EF,t}$	Zeitreihenwert des Lastgangs eines Fahrzeugs EF im Zeitpunkt t
$lg_{Netz,t}$	Zeitreihenwert des Leistungsbezugs aus dem Netz in Zeitpunkt t
$lg_{pv,Ein,t}$	Zeitreihenwert des PV-Einspeise-Lastgangs im Zeitpunkt t

$lg_{pv,Erz,t}$	Zeitreihenwert der Erzeugungsleistung im Zeitpunkt t
$lg_{pv,EV,t}$	Zeitreihenwert des PV-Eigenverbrauchs-Lastgangs im Zeitpunkt t
$LG_{ungest.}$	Zeitreihe des Lastgangs beim ungesteuerten Laden
$lg_{ungest.,t}$	Zeitreihenwert des ungesteuerten Lastgangs im Zeitpunkt t
$lg_{ungest.,s}$	Zeitreihenwert des ungesteuerten Lastgangs im Zeitpunkt s des Ladeintervalls
LV	Zeitreihe der Ladeverfügbarkeit
lv_t	Zeitreihenwert der Ladeverfügbarkeit im Zeitpunkt t
LSB	Zeitreihe des Ladestrombedarfs
lsb_t	Zeitreihenwerte des Ladestrombedarfs im Zeitpunkt t
m	Mobilitätsfaktor, Anteil mobiler Fahrzeug an der Gesamtheit aller Fahrzeuge
m_{EV}	Fahrzeugmasse des EF
$n_{Fahrt-DS}$	Anzahl Fahrzeug in der Fahrten-Datei
n_{EE}	Anzahl der EEA an einem Standort
n_{EE}	Anzahl Elektrofahrzeuge in einem Fuhrpark
n_{Typj}	Anzahl gemeldeter Fahrzeuge vom Typ j
$nb_{Zyk,Witt}$	Zyklus- und Witterungs-abhängiger Energiebedarf für Fahrzeug-Nebenverbraucher
$P_{Bat,j}$	Ladeleistung der Batterie an einer Batteriewechselstation
$P_{EE,EFx}$	Installierter Leistung eines EEA zur bilanziellen Deckung des Energiebedarfs eines Elektrofahrzeugs
$P_{Fahrt,j}$	Minimale notwendige Ladeleistung eines Fahrzeugs nach einer Fahrt
$p_{EF,sl}$	Strafkosten für Unterschreitung der Netto-Kapazität
$p_{gl,sl}$	Strafkosten für Überschreitung der Gebäudelast
P_{max}	Maximale Ladeleistung
p_{Netz}	Strompreis für den Energiebezug aus dem öffentlichen Netz
$p_{pv,EV}$	kWh-bezogene Einspeisevergütung
$p_{pv,EVV}$	kWh-bezogene Eigenverbrauchsvergütung
$P_{T,j}$	Leistungszeitreihe eines Fahrzeugs aus der Fahrten-Datei
$P_{T,EE,1kW}$	Leistungs-Zeitreihe der normierten EEA-Referenzanlage

$p_{t,j}$	Leistungswert der Leistungszeitreihe im Zeitpunkt t
$P_{T,Fahrt-DS}$	Durchschnittliche Leistungszeitreihe eines Fahrzeugs aus der Fahrten-Datei
$P_{Nebenverb.,aktiv}$	Gesamtleistung aller aktiven Nebenverbraucher einer Fahrt
s_{EV}	Zurückgelegte Strecke eines Fahrzeugs
$sl_{EF,t}$	Slackvariable zur Unterschreitung der Netto-Kapazität
$sl_{gl,t}$	Slackvariable zur Überschreitung der maximalen Gebäudelast
Sp_{max}	Speicherbedarf für einen autarken Betrieb
T	Betrachtungsdauer in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
$t_{an,j}$	Ankunftszeit eines Fahrzeugs nach einer Fahrt
$t_{ab,j+1}$	Abfahrtszeit der nächsten Fahrt eines Fahrzeugs nach einer Fahrt
t_B	Ladedauer einer Batterie an einer Batteriewechselstation
$t_{Bat,anf}$	Ladebeginn einer Batterie an einer Batteriewechselstation
$t_{Bat,end}$	Ladeendzeit einer Batterie an einer Batteriewechselstation
t_{Fahrt}	Fahrtzeit einer Fahrt
$t_{Ladeende}$	Ladeendzeit eines Fahrzeugs
$t_{Stand,j}$	Ladezeit eines Fahrzeugs nach einer Fahrt (entspricht der Standzeit)
$t_{Stand,min}$	Minimale Haltezeit für eine Ladung
$t_{Zyklus,km}$	Km-bezogene Fahrtzeit eines Fahrzyklus
$tb_{Fzg.,Zyk.,Witt}$	Zyklus- und Witterungsbezogener Energiebedarf eines Fahrzeugs für die translatorische Bewegungsenergie inkl. Motorverlusten
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit aus Fahrzeuggeschwindigkeit und parallel angreifender Luftgeschwindigkeit
$v_{Zyklus,\emptyset}$	Km-bezogene durchschnittliche Geschwindigkeit eines Fahrzyklus
x_{Netz}	Energiebezugsmenge aus dem öffentlichen Netz in einem Bilanzierungsintervall
$x_{pv,Ein}$	Einspeisemenge der Eigenerzeugung in einem Bilanzierungsintervall
$x_{pv,EV}$	Eigenverbrauchsmenge in einem Bilanzierungsintervall

$x_{pv, ges.}$	Energiemenge einer PV-Anlage in einem Bilanzierungsintervall
$x_{Strom, ges.}$	Gesamtstrombedarf eines Kunden in einem Bilanzierungsintervall
Z_t	Zahlungsstrom in Periode t

Literaturverzeichnis

- [1] BMWi: Gesetz zum Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG), Gesetzesfassung vom 17. August 2012
- [2] Presse und Informationsamt der Bundesregierung: Energiewende – Fragen und Antworten, [vhttps://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende,Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.htmlv](https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende,Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.htmlv), abgerufen am 18.05.2018
- [3] BDEW: Erneuerbaren-Anteil liegt 2017 bei über 36 Prozent, Pressemitteilung, 20.12.2017, <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/erneuerbaren-anteil-liegt-2017-bei-ueber-36-prozent/>, abgerufen am 20.05.2018
- [4] BMWi: Bundesbericht Energieforschung 2017, Berlin, März 2017
- [5] Volker Quaschnig: Sektorkopplung durch die Energiewende – Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zur Erreichung der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung, Berlin, 20.06.2016
- [6] BMWi: Derzeit unverzichtbar für eine verlässliche Energieversorgung, Dossier, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/konventionelle-energietraeger.html>, abgerufen am 18.06.2018
- [7] Umweltbundesamt: Energieverbrauch nach Verkehrsträgern, <http://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/energieverbrauch-nach-verkehrstraegern>, abgerufen am 05.12.15,
- [8] Umweltbundesamt: Energieverbrauch 2014 nach Sektoren und Energieträgern, <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren>, abgerufen am 04.02.2017
- [9] Umweltbundesamt: Daten zum Verkehr, Ausgabe 2012, , Berlin, Oktober 2012
- [10] BMWi: Die Energie der Zukunft – Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende, Berlin, November 2015
- [11] Michael Agsten: Einfluss gesteuerten Ladens von Elektrofahrzeugen auf die Netzbetriebsführung bei volatiler Windeinspeisung, Dissertation, ISBN: 978-3-86360-023-5, Ilmenau, 2011
- [12] W.-H. Arndt, N. Döge, S. Marker: Elektrifizierungspotential kommerzieller Kraftfahrzeug-Flotten im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource in städtischen Verteilnetzen – komDRIVE, ISBN-10: 3798328013, Berlin, Dezember 2016
- [13] Droste-Franke, B.; Paal, B.P.; Rehtanz, C.; Sauer, D.U.; Scheider, J.-P.; Schreuers, M.; Ziesemer, T.: Balancing Renewable Electricity – Energy Storage, Demand Side

- Management and Network Extension from an Interdisciplinary Perspective, Ethics of Science and Technology Assessment, Springer-Verlag, Vol. 40, 2012
- [14] Ralf Simon, Babett Hanke, Joachim Walter: Elektrofahrzeuge in lokalen regenerativen Energienetzen - Abschlussbericht zum Modul 7a, August 2014
- [15] M. Dronia, M. Gallet: Field test of charging management system for electric vehicle – State of the art charging management using ISO 61851 with EV from different OEMs, 5th Conference on Future Automotive Technology, Fürstfeldbruck, Mai 2016
- [16] BMVI: Handlungsempfehlungen zur Integration von Elektromobilität in Flotten für Fuhrparkbetreiber, Berlin , Juni 2015
- [17] BMU: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Berlin, März 2012
- [18] Kraftfahrzeugbundesamt: Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 01.01.2018, https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html, abgerufen am 26.05.2018
- [19] BMVI: Kraftfahrzeuge in Deutschland 2010 (KID 2010) – Schlussbericht, Braunschweig, April 2012
- [20] W. Diez: Auswirkungen der Elektromobilität auf das Servicegeschäft vertragsgebundener Autohäuser, Arbeitspapier Nr.06/2012, Institut für Automobil-wirtschaft, Nürtingen-Geislingen, 2016
- [21] T. Gnann et al., Fraunhofer ISI: Elektromobilität im Personenwirtschaftsverkehr – eine Potentialanalyse, Working Paper Sustainability and Innovation, S7/2012, Karlsruhe, 2012
- [22] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, Berlin, Mai 2011
- [23] Börner, Kira: Die Folgen der Strommarktliberalisierung für regenerative Energiequellen, Wirtschaftsdienst, ISSN 0043-6275, Vol. 82, Iss. 1, pp. 33-39, 2002
- [24] BMBF: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität, August 2009
- [25] Nagl, S., Paulus, S. & Lindenberger, D.: Mögliche Entwicklung der Umlage zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz bis 2018, Zeitschrift für Energiewirtschaft (2013) Volume 37, Dezember 2012

- [26] Verband der Automobilindustrie, Forschungsvereinigung der Automobiltechnik: Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystemelektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, FAT-Schriftenreihe 233, 2011
- [27] Verband der Automobilindustrie, Forschungsvereinigung der Automobiltechnik: Heizleistung in Pkw mit verbrauchoptimierten Motoren, FAT-Schriftenreihe 155, 2000
- [28] J. Deffner, et al.: Elektrofahrzeuge in betrieblichen Fahrzeugflotten – , Attraktivität und Nutzungsverhalten, Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts Future Fleet, ISOE Studentexte, Nr. 17, Frankfurt am Main 2012
- [29] Bundesregierung, Energiekonzept – für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin, 2010,
- [30] Verband der Übertragungsnetzbetreiber: Szenariorahmen für die Netzentwicklungspläne Strom 2015 – Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, April 2014, abgerufen am 14.03.2016
- [31] BMWi: Gesetz zur Weiterentwicklung des Strommarktes (Strommarktgesetz), Gesetzesfassung vom 26.07.2016
- [32] VDE: Demand Side Integration Lastverschiebungspotenziale in Deutschland, Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG), Frankfurt am Main, Juni 2012
- [33] BAFA: Liste der förderfähigen Elektrofahrzeuge, http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/emob_liste_foerderfaehige_fahrzeuge.html, abgerufen am 28.05.18
- [34] Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation Elektrofahrzeuge im Geschäftsumfeld – Potentiale der gemeinsamen Nutzung, ISBN: 978-3-8396-0580-6, 2013
- [35] Hochschule Regensburg, Combustion Engines & Emission Control Laboratory: Spritsparendes Autofahren, Wissenschaftszentrum Straubing, 8. Dezember 2008
- [36] B. Heissing, M. Ersoy, and S. Gies: Fahrwerkhandbuch, Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden:, 2011.
- [37] P. Thiebes, M. Geimer: Hybridantriebe für Mobile Arbeitsmaschinen, O+P Zeitschrift für Fluidtechnik - Aktorik, Steuerelektronik und Sensorik, 51 (2007) Nr. 11-12, S. 630-635, November 2007
- [38] F. Dudenhöffer, E. John, Ökoglobus Institut, Universität Duisburg-Essen: Warum der offizielle Kraftstoffverbrauch von Neuwagen erheblich von der Realität abweicht, Juli 2009

- [39] M. Gonzalez Vaya, G. Andersson, S. Boyd: Decentralized control of plug-in electric vehicles under driving uncertainty, Proceedings of the IEEE PES conference on innovative smart grid technologies (ISGT) Istanbul, Oct 2014
- [40] V. NGUYEN, et al.: Charging Strategies to Minimize the Energy Cost for an Electric Vehicle Fleet, Proceedings of the IEEE PES conference on innovative smart grid technologies (ISGT) Istanbul, Oct 2014
- [41] M. Maier, Agentur für Erneuerbare Energien e. V.: Eigenverbrauch und regionale Direktvermarktung, Renewes Spezial, Ausgabe 70, Berlin, Februar 2014
- [42] F. Klausmann, F. Kötter, F. Rothfuss: Softwaregestützte Potentialanalyse für die Integration von Elektrofahrzeugen im Fuhrpark der Stadtverwaltung Ludwigsburg, In: H. Proff et al.: „Schritte in die zukünftige Mobilität“, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2013
- [43] P. Spichartz, P. Dost and C. Sourkounis: Examination and Measurement of Range Extension Using Different Recuperation Modes in Electric Vehicles, IEEE Industry Application Society, Annual Meeting, Vancouver, October 5-9, 2014
- [44] P. Kasten, W. Zimmer, S. Leppler: CO₂-Minderungspotenziale durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in Dienstwagenflotten, Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts Future Fleet, Oktober 2011
- [45] Biere, D.; Dallinger, D.; Wietschel, M.: Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen, Zeitschrift für Energiewirtschaft 33 (Nr.2): 173-181., 2009
- [46] Martin Wietschel et.al, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI): Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten „Early Adoptern“ – Endbericht, Karlsruhe, Juni 2012
- [47] W. Zimmer; K. Götz et.al.: OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen, Berlin, Oktober 2011
- [48] H. Helms, et.al, Institut für Energie- und Umweltforschung (Hrsg.): UMBReLA – Umweltbilanzen Elektromobilität, Heidelberg, 2011
- [49] H. Heinrichs, T. Pesch, J.-F. Hake, D. Martinsen: Deutsches Energiekonzept versus Netzentwicklungsplan 2012, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 63. Jg., Heft 6, 2013, Seite 39-45
- [50] Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen (FZ) – Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 1. Januar 2016, Mai 2016 Flensburg
- [51] Eco Libro GmbH: <http://www.ecolibro.de/de/angebote-loesungen/>, abgerufen am 19.03.2018

- [52] UBA: Energieverbrauch für erneuerbare Kraftstoffe, <https://www.umweltbundesamt.de/energieverbrauch-fuer-erneuerbare-kraftstoffe>, abgerufen am 07.10.2016
- [53] BMWi: Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2015 - Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Entwicklung_der_erneuerbaren_Energien_in_Deutschland/entwicklung_der_erneuerbaren_energien_in_deutschland_im_jahr_2015.html, Stand August 2016, Aufruf am 07.10.2016
- [54] BDEW: Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2017), Berlin, Juli 2017
- [55] BDEW: Bruttostromerzeugung in Deutschland – Vorjahresvergleich, Stand 12/2017, abgerufen am 27.05.2018
- [56] BMUB: Klimaschutzbericht 2015, Berlin, November 2015
- [57] Fraunhofer ISE: Energy Charts“, https://www.energy-charts.de/power_inst_de.htm#, abgerufen am 27.05.2018
- [58] BMWi: Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, Projekt Nr. 57/12, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Basel/Köln/Osnabrück, Juni 2014
- [59] Fraunhofer IWES: Windmonitor, http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/windmonitor_de/3_Onshore/5_betriebsergebnisse/1_volllaststunden/, Aufruf am 13.11.2016
- [60] Fraunhofer IWES: Windmonitor, http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/windmonitor_de/2_Netzintegration/2_netzbetrieb/1_Die_vier_Regelzonen/, abgerufen am 21.10.2016
- [61] TenneT: Netzkennzahlen, <https://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/netzkennzahlen>, abgerufen am 21.10.2016
- [62] BNetzA: EEG in Zahlen 2014, http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1412/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/erneuerbareenergien-node.html;jsessionid=644F5B0E868D0C651F8A6E3207642DBF, abgerufen am 30.09.2016
- [63] Kraftfahrzeugbundesamt: Gewerbliche Zulassungen bestimmen den Neuwagenmarkt, http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/2011/2011_n_neuwagenmarkt_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=6, abgerufen am 05.02.2017
- [64] Florian Klausmann: E-Autos mit Flottenpotential, erschienen in emobility 2.0 (Januar 2013), publish-industry Verlag GmbH, München

- [65] Urs A. Haymoz: Chancen für Elektrofahrzeuge bei Flottenbetreibern, electrosuisse, Bulletin 2/2010
- [66] ESU-Services Ltd.; Dr. Rolf Frischknecht et.al.: Primärenergiefaktoren von Energiesystemen, Juli 2012
- [67] BMWi: Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz, Berlin 2010
- [68] Umweltbundesamt: Primärenergieverbrauch, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#textpart-1>, abgerufen am 20.03.18
- [69] EBG compleo GmbH, Ladestation Highline: <http://www.ebg-compleo.de/produkte/#c5174>
- [70] Detlef Hoffmann: Wie lange lebt die Batterie?, Fachbeitrag in Elektronik Automotive, <http://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/elektromobilitaet/wie-lange-lebt-die-batterie-122421.html>, abgerufen am 22.03.18
- [71] Maslaton Rechtsanwaltsgesellschaft mbH: Sonstige Direktvermarktung und Vertragsgestaltung, Leipzig, 24.04.2012
- [72] Christoph Moench et.al.: Gutachterliche Stellungnahme Rechtsfragen des Eigenverbrauchs und des Direktverbrauchs vom Strom durch Dritte aus Photovoltaikanlagen, im Auftrag des BMU, Berlin, April 2013
- [73] MVV Netze: Kappung der EEG-Förderung bei Inanspruchnahme einer Stromsteuerbefreiung, <https://www.mvv-netze.de/netze/web/de/content/erzeugungsanlagen/stromsteuerbefreiung/stromsteuerbefreiung.jsp>, abgerufen am 22.08.2018
- [74] BDEW: BDEW-Strompreisanalyse MAI 2017 – Haushalt und Industrie, Berlin, 31.Mai 2017
- [75] BeSte Stadtwerke GmbH: Preisblatt für Dienstleistungen bei EEG-Anlagen und Zusatzdienstleistungen, Steinheim, November 2013
- [76] E.wa Riss Netze GmbH: Messpreise für Einspeiser nach dem Erneuerbaren Energien Gesetz – 01.01.2017, http://www.ewa-netze.de/de/Netznutzer/Strom_netz1/Netzzugang-Entgelte1/Netzzugang-Entgelte.html, abgerufen am 22.03.2018
- [77] Nissan - Bidirektionales Laden: <https://www.nissan.de/fahrzeuge/neuwagen/leaf/reichweite-aufladen.html>, abgerufen am 23.03.2018
- [78] Heise Medien GmbH: Gegenverkehrsstrom – Mitsubishi stellt bidirektionale Ladestation vor, <https://www.heise.de/autos/artikel/Mitsubishi-stellt-bidirektionale-Ladestation-vor-2683899.html>, abgerufen am 23.03.2018
- [79] Bundesverband Energiespeicher: Weltweit größter Second-Use Batteriespeicher geht ans Netz, September 2016, abgerufen am 27.Mai 2018

- [80] Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW): Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen, Ergebnispapier der Wirk- und Begleitforschung, Februar 2016
- [81] Wolf-Heinrich Hucho: Aerodynamik der stumpfen Körper. 2002, ISBN 3528068701
- [82] KIT Scientific Publishing, Ph. Thiebes, M. Geimer: Hybridantriebe für Mobile Arbeitsmaschinen, 2011, ISBN 978-3-86644-808-7
- [83] Ph. Spichartz, C. Sourkounis: Measurement of Braking Energy Recuperation in Electric Vehicles, 15th European Conference on Power Electronics and Applications, Lille, September 2013
- [84] U. Sperling: Auswirkungen von Nutzungsprofilen und Umgebungsbedingungen auf Stromverbrauch und Batterieverhalten bei Elektrofahrzeugen zur Implementierung in einem Wirtschaftlichkeitsmodell, Master Thesis, Institute ie3, TU Dortmund University, September 2013
- [85] H. A. Kiehne: Battery Technology Handbook, Expert Verlag, 2003, ISBN: 0-8247-4249-4
- [86] Sebastian Jeschke: Grundlegende Untersuchungen von Elektrofahrzeugen im Bezug auf Energieeffizienz und EMV mit einer skalierbaren Power-HiL-Umgebung, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2016
- [87] Fabian Schüppel: Optimierung des Heiz- und Klimakonzepts zur Reduktion der Wärme- und Kälteleistung im Fahrzeug, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2015
- [88] Alexandra Schulz: Batterieelektrische Fahrzeuge im gewerblichen Flottenbetrieb, Disseration, Technische Universität Berlin, 2015
- [89] Verbundvorhaben metropol-E - Elektromobilität Rhein-Ruhr : öffentlicher Schlussbericht, (TIB), 2015; <https://doi.org/10.2314/GBV:867661291>, abgerufen am 27.04.2018
- [90] DWD COSMO-DE: Weather prediction and historical data for global radiation in Germany, <http://www.dwd.de/>, abgerufen am 17.03.2014
- [91] Portal Meteoprog: meteoprog.at, abgerufen am 17.03.2014
- [92] Ukrainian Center of Environmental and Water Projects, <http://ucewp.kiev.ua/>, abgerufen am 17.03.2014
- [93] BMVBS: Elektromobilität – Deutschland als Leitmarkt und Leitanbieter, Berlin, Juni 2011
- [94] BMVI: Verkehr in Zahlen 2017/2018, 46. Jahrgang, DVV Media Group GmbH, ISBN 978-3-87154-617-4

- [95] KBA: Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2018, https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html?nn=644526, abgerufen am 20.05.2018
- [96] Dr. Stefan Rommerskirchen, et. al.: Shell Pkw-Szenarien bis 2040, Hamburg, 2014
- [97] Next Kraftwerke GmbH: Was ist die Direktvermarktung von Strom aus erneuerbaren Energien?, <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/direktvermarkt-ung>, abgerufen am 27.05.2018
- [98] Stadtwerke Emmendingen: Lastprofile, <https://swe-emmendingen.de/strom-netz/lastprofile/>, abgerufen am 10.06.2018
- [99] Elektroauto-New.net: Vehicle-to-Grid-Ladestationen für europäisches Nissan Technical Centre, November 2016, <https://www.elektroauto-news.net/elektroautos/vehicle-to-grid-lade-stationen-fuer-europaeisches-nissan-technical-centre>, abgerufen am 16.05.2018
- [100] Elektroauto-New.net: Honda installiert erste bidirektionale Ladesäulen in Offenbach, Dezember 2017, <https://www.elektroauto-news.net/2017/hinda-installiert-erste-bidirektionale-ladesaeulen-in-offenbach>, abgerufen am 16.05.2018
- [101] BMU: Strommarktdesign der Zukunft, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau, und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 371297100, Dessau-Roßlau, Februar 2016
- [102] SMARD – Informationsplattform für Strommarktdaten der BNetzA, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/strommarkt-der-zukunft.html>, Stromverbrauchsdaten von 2017, abgerufen am 20.06.2018

Anhang A: Energie- und Leistungsprofile

Tabelle A-1: Durchschnittliches Energieprofil (in [kWh]) eines Pkw für den WTT2 differenziert nach Monaten für Szenario a) und b)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,00	0,06	0,07	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,18	0,13
1	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,07	0,00	0,01	0,01	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,01	0,48
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
20	0,00	0,06	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
21	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04	0,01	0,01	0,03	0,04
23	0,01	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,02
24	0,01	0,14	0,01	0,01	0,03	0,04	0,14	0,00	0,02	0,02	0,05	0,05
25	0,09	0,02	0,06	0,07	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04	0,05	0,10
26	0,06	0,06	0,11	0,18	0,12	0,06	0,01	0,05	0,06	0,06	0,14	0,16
27	0,10	0,09	0,12	0,31	0,08	0,05	0,04	0,08	0,08	0,12	0,13	0,11
28	0,31	0,23	0,17	0,32	0,23	0,29	0,15	0,20	0,11	0,13	0,37	0,22
29	0,10	0,20	0,21	0,10	0,20	0,12	0,14	0,15	0,06	0,12	0,13	0,27
30	0,18	0,13	0,30	0,28	0,08	0,16	0,12	0,12	0,14	0,19	0,23	0,13
31	0,26	0,27	0,33	0,39	0,19	0,23	0,08	0,21	0,16	0,28	0,25	0,33
32	0,48	0,46	0,41	0,17	0,28	0,23	0,43	0,22	0,24	0,41	0,40	0,44
33	0,21	0,20	0,36	0,25	0,21	0,18	0,14	0,18	0,16	0,43	0,20	0,36
34	0,35	0,37	0,34	0,16	0,20	0,26	0,26	0,13	0,18	0,51	0,70	0,37
35	0,27	0,23	0,31	0,22	0,22	0,13	0,24	0,19	0,22	0,38	0,65	0,39
36	0,48	0,40	0,54	0,40	0,42	0,39	0,23	0,27	0,22	0,58	0,44	0,57
37	0,10	0,24	0,14	0,22	0,27	0,19	0,17	0,23	0,11	0,13	0,26	0,21
38	0,39	0,74	0,35	0,29	0,46	0,30	0,20	0,20	0,25	0,39	0,32	0,57
39	0,32	0,20	0,53	0,45	0,10	0,24	0,11	0,15	0,15	0,26	0,36	0,34
40	0,48	0,32	0,53	0,38	0,20	0,28	0,22	0,36	0,27	0,26	0,46	0,38
41	0,27	0,36	0,27	0,27	0,26	0,25	0,05	0,24	0,17	0,22	0,54	0,41
42	0,09	0,40	0,21	0,39	0,25	0,19	0,27	0,12	0,17	0,38	0,51	0,27
43	0,20	0,07	0,14	0,11	0,15	0,15	0,20	0,16	0,07	0,24	0,35	0,18
44	0,25	0,26	0,59	0,28	0,19	0,28	0,12	0,23	0,24	0,23	0,71	0,63
45	0,10	0,19	0,14	0,06	0,26	0,15	0,18	0,05	0,06	0,08	0,17	0,20
46	0,30	0,16	0,45	0,42	0,14	0,24	0,26	0,24	0,16	0,15	0,55	0,27
47	0,34	0,11	0,08	0,15	0,05	0,15	0,06	0,11	0,14	0,31	0,24	0,24

48	0,20	0,42	0,64	0,18	0,18	0,35	0,17	0,18	0,23	0,13	0,34	0,36
49	0,13	0,16	0,24	0,07	0,10	0,18	0,07	0,17	0,06	0,35	0,12	0,16
50	0,18	0,13	0,29	0,16	0,19	0,04	0,08	0,20	0,20	0,27	0,19	0,25
51	0,27	0,15	0,16	0,29	0,03	0,07	0,05	0,18	0,11	0,10	0,21	0,29
52	0,35	0,26	0,31	0,21	0,24	0,36	0,15	0,19	0,16	0,56	0,19	0,28
53	0,23	0,24	0,27	0,14	0,17	0,07	0,05	0,06	0,13	0,16	0,18	0,14
54	0,27	0,26	0,13	0,30	0,30	0,20	0,11	0,09	0,14	0,08	0,15	0,19
55	0,30	0,17	0,16	0,14	0,06	0,17	0,15	0,09	0,13	0,15	0,22	0,09
56	0,24	0,23	0,29	0,18	0,39	0,17	0,10	0,11	0,23	0,22	0,69	0,31
57	0,15	0,17	0,04	0,17	0,03	0,15	0,10	0,12	0,05	0,11	0,14	0,20
58	0,57	0,13	0,18	0,36	0,11	0,15	0,10	0,32	0,07	0,23	0,30	0,39
59	0,27	0,07	0,11	0,15	0,08	0,09	0,14	0,10	0,10	0,07	0,09	0,10
60	0,25	0,26	0,24	0,16	0,30	0,30	0,21	0,20	0,42	0,15	0,49	0,26
61	0,06	0,08	0,18	0,12	0,04	0,07	0,03	0,11	0,04	0,09	0,41	0,18
62	0,24	0,17	0,58	0,07	0,14	0,11	0,08	0,12	0,17	0,28	0,59	0,24
63	0,54	0,17	0,06	0,19	0,14	0,14	0,11	0,15	0,10	0,22	0,13	0,18
64	0,36	0,64	0,44	0,45	0,24	0,48	0,30	0,20	0,20	0,41	0,51	0,48
65	0,35	0,23	0,14	0,10	0,05	0,10	0,04	0,11	0,19	0,29	0,21	0,24
66	0,20	0,31	0,37	0,23	0,17	0,12	0,11	0,19	0,16	0,33	0,39	0,22
67	0,32	0,33	0,14	0,39	0,19	0,09	0,22	0,25	0,16	0,18	0,21	0,24
68	0,91	0,61	0,41	0,19	0,45	0,47	0,33	0,29	0,38	0,27	0,33	0,60
69	0,51	0,17	0,33	0,23	0,07	0,23	0,11	0,09	0,23	0,24	0,26	0,20
70	0,21	0,45	0,22	0,40	0,14	0,13	0,35	0,20	0,24	0,80	0,28	0,49
71	0,22	0,18	0,31	0,37	0,24	0,33	0,20	0,09	0,14	0,15	0,15	0,24
72	0,38	0,44	0,51	0,16	0,34	0,23	0,12	0,20	0,39	0,31	0,75	0,44
73	0,27	0,28	0,21	0,41	0,36	0,24	0,15	0,18	0,11	0,50	0,32	0,43
74	0,19	0,22	0,49	0,16	0,14	0,19	0,11	0,11	0,19	0,60	0,73	0,29
75	0,11	0,23	0,12	0,20	0,12	0,19	0,21	0,11	0,11	0,13	0,09	0,29
76	0,31	0,29	0,85	0,17	0,39	0,29	0,07	0,13	0,18	0,25	0,60	0,69
77	0,19	0,17	0,24	0,17	0,02	0,10	0,01	0,12	0,09	0,24	0,15	0,10
78	0,01	0,27	0,20	0,13	0,11	0,12	0,35	0,35	0,09	0,26	0,49	0,21
79	0,05	0,28	0,23	0,27	0,16	0,03	0,14	0,20	0,12	0,14	0,13	0,16
80	0,32	0,34	0,16	0,23	0,08	0,37	0,23	0,20	0,18	0,18	0,90	0,47
81	0,30	0,15	0,07	0,01	0,06	0,03	0,03	0,06	0,02	0,08	0,03	0,16
82	0,10	0,03	0,31	0,01	0,20	0,11	0,01	0,20	0,08	0,05	0,30	0,20
83	0,01	0,01	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,08	0,23	0,14	0,04	0,04
84	0,23	0,31	0,11	0,05	0,38	0,15	0,04	0,04	0,02	0,11	0,19	0,23
85	0,11	0,07	0,03	0,00	0,21	0,07	0,19	0,03	0,01	0,11	0,03	0,01
86	0,07	0,01	0,08	0,02	0,41	0,13	0,01	0,03	0,00	0,00	0,02	0,01
87	0,00	0,07	0,04	0,04	0,01	0,02	0,00	0,02	0,01	0,06	0,04	0,00
88	0,15	0,11	0,15	0,05	0,01	0,05	0,01	0,10	0,12	0,03	0,00	0,21
89	0,01	0,00	0,00	0,00	0,08	0,03	0,00	0,04	0,12	0,00	0,01	0,00
90	0,03	0,01	0,15	0,02	0,01	0,00	0,01	0,22	0,01	0,01	0,02	0,12
91	0,01	0,02	0,02	0,00	0,04	0,05	0,01	0,02	0,00	0,04	0,01	0,11
92	0,00	0,01	0,31	0,00	0,00	0,03	0,02	0,07	0,01	0,03	0,09	0,02
93	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
94	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,07	0,10	0,01	0,03
95	0,00	0,01	0,02	0,12	0,06	0,08	0,00	0,00	0,00	0,06	0,06	0,03

Tabelle A-2: Durchschnittliches Energieprofil eines Pkw für den WTT5 differenziert nach Monaten für Szenario a) und b)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,03	0,00	0,01	0,00	0,07	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,14	0,10
1	0,00	0,04	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
3	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
24	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
26	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00	0,00
28	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01
29	0,01	0,00	0,00	0,15	0,17	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01
30	0,02	0,00	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
31	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
32	0,03	0,02	0,01	0,07	0,00	0,13	0,00	0,00	0,01	0,11	0,42	0,04
33	0,02	0,04	0,13	0,13	0,00	0,01	0,12	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
34	0,00	0,01	0,01	0,10	0,03	0,05	0,02	0,00	0,10	0,09	0,01	0,02
35	0,00	0,09	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01
36	0,08	0,01	0,03	0,16	0,00	0,03	0,02	0,05	0,02	0,01	0,04	0,06
37	0,11	0,12	0,02	0,03	0,00	0,06	0,00	0,01	0,08	0,01	0,01	0,02
38	0,02	0,14	0,02	0,06	0,04	0,02	0,04	0,14	0,02	0,05	0,33	0,02
39	0,02	0,01	0,09	0,01	0,00	0,04	0,16	0,05	0,00	0,09	0,02	0,04
40	0,01	0,07	0,16	0,13	0,00	0,01	0,02	0,03	0,09	0,22	0,19	0,02
41	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,07	0,05	0,05	0,03	0,22	0,03	0,36
42	0,00	0,29	0,02	0,02	0,00	0,07	0,08	0,06	0,04	0,07	0,01	0,06
43	0,00	0,00	0,12	0,28	0,03	0,01	0,00	0,05	0,06	0,01	0,13	0,06
44	0,08	0,00	0,26	0,01	0,03	0,01	0,05	0,05	0,00	0,19	0,05	0,38
45	0,00	0,39	0,17	0,05	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,06
46	0,01	0,04	0,03	0,04	0,17	0,03	0,02	0,09	0,02	0,08	0,07	0,02
47	0,03	0,02	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,04	0,02	0,00	0,05	0,02
48	0,56	0,02	0,03	0,05	0,21	0,08	0,05	0,09	0,01	0,03	0,11	0,13
49	0,16	0,07	0,12	0,09	0,04	0,01	0,00	0,02	0,09	0,01	0,06	0,05
50	0,02	0,22	0,01	0,03	0,08	0,20	0,00	0,01	0,02	0,12	0,12	0,09

51	0,00	0,06	0,01	0,26	0,17	0,00	0,05	0,03	0,00	0,03	0,00	0,05
52	0,01	0,00	0,08	0,00	0,09	0,08	0,00	0,01	0,16	0,10	0,11	0,04
53	0,01	0,01	0,02	0,05	0,01	0,03	0,01	0,03	0,00	0,66	0,03	0,07
54	0,00	0,06	0,04	0,02	0,01	0,16	0,01	0,00	0,20	0,06	0,06	0,03
55	0,01	0,01	0,01	0,11	0,03	0,01	0,04	0,06	0,02	0,06	0,03	0,07
56	0,38	0,12	0,01	0,33	0,05	0,11	0,00	0,02	0,03	0,55	0,05	0,03
57	0,00	0,01	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,09	0,04	0,06	0,03	0,00
58	0,51	0,15	0,04	0,04	0,02	0,03	0,14	0,16	0,06	0,14	0,05	0,05
59	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,03	0,04	0,01	0,06	0,01	0,00	0,09
60	0,12	0,05	0,39	0,24	0,11	0,12	0,03	0,01	0,02	0,13	0,00	0,03
61	0,02	0,00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00	0,03
62	0,00	0,06	0,08	0,03	0,00	0,02	0,00	0,09	0,13	0,00	0,15	0,02
63	0,02	0,28	0,05	0,04	0,02	0,00	0,00	0,03	0,00	0,04	0,03	0,02
64	0,01	0,05	0,03	0,30	0,02	0,30	0,03	0,02	0,02	0,01	0,05	0,07
65	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,04	0,04	0,02	0,03	0,00	0,03	0,00
66	0,03	0,13	0,01	0,11	0,02	0,05	0,03	0,00	0,06	0,12	0,41	0,12
67	0,04	0,37	0,04	0,10	0,00	0,01	0,03	0,02	0,02	0,06	0,03	0,07
68	0,00	0,22	0,06	0,00	0,03	0,22	0,11	0,43	0,22	0,22	0,16	0,09
69	0,00	0,08	0,07	0,01	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,10
70	0,10	0,01	0,04	0,02	0,01	0,28	0,29	0,08	0,01	0,03	0,09	0,19
71	0,09	0,00	0,04	0,01	0,10	0,02	0,01	0,01	0,08	0,02	0,25	0,05
72	0,02	0,06	0,07	0,63	0,06	0,01	0,00	0,07	0,39	0,03	0,04	0,01
73	0,05	0,01	0,13	0,17	0,00	0,03	0,01	0,08	0,00	0,25	0,09	0,00
74	0,00	0,30	0,05	0,05	0,14	0,02	0,03	0,04	0,11	0,00	0,03	0,04
75	0,09	0,00	0,03	0,07	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,04	0,05	0,03
76	0,02	0,11	0,13	0,06	0,00	0,00	0,00	0,13	0,05	0,28	0,28	0,04
77	0,02	0,04	0,00	0,04	0,05	0,10	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	0,01
78	0,00	0,09	0,02	0,19	0,01	0,06	0,02	0,50	0,01	0,00	0,41	0,08
79	0,00	0,00	0,08	0,04	0,00	0,02	0,00	0,05	0,01	0,05	0,00	0,33
80	0,02	0,53	0,09	0,00	0,00	0,04	0,02	0,16	0,08	0,51	0,00	0,07
81	0,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,04	0,01	0,03
82	0,00	0,13	0,02	0,01	0,14	0,01	0,00	0,12	0,00	0,04	0,11	0,12
83	0,18	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,06
84	0,07	0,02	0,10	0,00	0,18	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
85	0,07	0,06	0,00	0,01	0,00	0,02	0,16	0,00	0,02	0,00	0,16	0,28
86	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,05	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01
87	0,00	0,00	0,06	0,35	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
88	0,06	0,05	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24
89	0,00	0,24	0,00	0,25	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
90	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,18	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,17
92	0,10	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,02
93	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,06	0,00	0,19	0,00	0,63	0,02	0,00
94	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
95	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,01

Tabelle A-3: Durchschnittliches Energieprofil eines LNfzg für den WTT2 differenziert nach Monaten für Szenario a) und b)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,22	0,00	0,00	0,00	0,04	0,17	0,00	0,00	0,06	0,00	0,15	0,26
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,11	0,00	0,25	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00
4	0,00	0,04	0,00	0,45	0,10	0,00	0,00	0,06	0,01	0,00	0,00	0,17
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,10	0,01	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00
11	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00
12	0,20	0,00	0,03	0,00	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,23	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,03	0,16	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,12	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
15	0,00	0,00	0,05	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
16	0,09	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,01	0,05	0,00	1,93
17	0,00	0,00	0,09	0,01	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03
18	0,33	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00	0,01	0,04
19	0,02	0,01	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,01
20	0,25	0,08	0,06	0,02	0,04	0,02	0,12	0,01	0,01	0,03	0,06	0,10
21	0,04	0,04	0,03	0,07	0,01	0,00	0,00	0,03	0,05	0,13	0,07	0,04
22	0,01	0,05	0,04	0,02	0,00	0,05	0,07	0,00	0,06	0,00	0,05	0,09
23	0,04	0,06	0,01	0,07	0,03	0,01	0,07	0,02	0,12	0,06	0,07	0,09
24	0,01	0,08	0,08	0,01	0,08	0,25	0,06	0,09	0,04	0,03	0,03	0,11
25	0,10	0,15	0,15	0,13	0,20	0,05	0,22	0,15	0,17	0,12	0,19	0,11
26	0,15	0,27	0,09	0,15	0,33	0,19	0,16	0,32	0,21	0,56	0,34	0,33
27	0,29	0,12	0,32	0,28	0,24	0,33	0,22	0,26	0,28	0,42	0,81	0,27
28	0,24	0,35	0,95	0,79	0,41	0,44	0,40	0,67	0,61	1,18	1,15	2,24
29	0,35	0,36	0,49	0,59	0,18	0,26	0,12	0,32	0,32	0,43	0,64	0,64
30	0,34	0,39	0,54	0,51	0,32	0,42	0,53	0,23	0,52	0,68	0,79	0,53
31	0,79	0,29	0,49	0,38	0,58	0,31	0,34	0,33	0,36	0,61	0,62	0,76
32	0,55	0,76	0,51	0,78	0,64	0,78	0,28	0,54	0,61	0,86	0,96	0,70
33	0,33	0,58	0,42	0,42	0,21	0,32	0,36	0,21	0,19	0,47	0,44	0,58
34	1,29	0,40	0,58	0,64	0,69	0,36	0,56	0,23	0,36	0,63	0,70	0,83
35	0,10	0,47	0,25	0,29	0,31	0,52	0,35	0,21	0,19	0,35	0,39	0,30
36	0,56	0,88	0,34	0,98	0,31	0,43	0,62	0,29	0,47	0,74	1,03	0,75
37	0,30	0,15	0,58	0,17	0,25	0,26	0,23	0,23	0,39	0,35	0,27	0,46
38	0,25	0,44	0,99	0,51	0,58	0,37	0,17	0,21	0,24	0,92	0,41	0,89
39	0,30	0,22	0,17	0,18	0,16	0,22	0,16	0,29	0,24	0,96	0,32	0,25
40	0,42	0,85	0,48	0,39	0,39	0,23	0,57	0,37	0,30	1,14	0,59	0,69
41	0,14	0,36	0,57	0,24	0,37	0,15	0,24	0,22	0,37	0,33	0,24	0,33
42	0,21	0,38	0,43	0,27	0,24	0,21	0,21	0,35	0,33	0,30	0,55	1,13
43	0,20	0,26	0,16	0,19	0,23	0,14	0,10	0,14	0,24	0,46	0,23	0,33
44	0,48	0,41	0,19	0,20	0,31	0,23	0,23	0,19	0,47	0,58	0,65	0,39
45	0,17	0,19	0,21	0,20	0,11	0,19	0,34	0,27	0,18	0,39	0,31	0,41
46	0,15	0,43	0,54	0,51	0,39	0,20	0,12	0,20	0,24	0,18	0,52	0,52
47	0,12	0,43	0,33	0,46	0,07	0,19	0,11	0,19	0,22	0,36	0,21	0,19
48	0,91	0,36	0,59	0,69	0,67	0,83	0,33	0,38	0,40	0,25	0,16	0,40

49	0,41	0,47	0,17	0,17	0,11	0,26	0,39	0,09	0,34	0,14	0,25	0,28
50	0,17	0,34	0,45	0,56	0,15	0,24	0,42	0,13	0,49	0,29	0,44	0,42
51	0,12	0,22	0,19	0,21	0,13	0,18	0,16	0,14	0,26	0,24	0,23	0,28
52	0,58	0,27	0,32	0,23	0,38	0,33	0,36	0,30	0,24	0,93	0,28	0,78
53	0,20	0,44	0,22	0,34	0,18	0,17	0,07	0,14	0,19	0,18	0,31	0,17
54	0,43	0,30	0,34	0,22	0,30	0,21	0,23	0,22	0,26	0,34	0,47	0,56
55	0,10	0,39	0,33	0,16	0,23	0,19	0,09	0,15	0,21	0,20	0,30	0,26
56	0,43	0,59	0,58	0,20	0,42	0,71	0,61	0,44	0,39	0,54	0,62	0,74
57	0,31	0,32	0,42	0,39	0,19	0,25	0,15	0,25	0,25	0,28	0,30	0,28
58	0,45	0,46	0,43	0,65	0,23	0,21	0,16	0,26	0,28	0,82	0,51	0,59
59	0,22	0,33	0,21	0,18	0,17	0,32	0,28	0,16	0,13	0,19	0,32	0,34
60	0,40	0,38	0,89	0,82	0,61	0,37	0,39	0,48	0,39	0,58	0,87	0,94
61	0,31	0,36	0,44	0,31	0,33	0,18	0,12	0,13	0,24	0,13	0,20	0,27
62	0,37	0,52	0,81	0,44	0,40	0,33	0,38	0,36	0,53	0,54	1,12	0,55
63	0,53	0,28	0,41	0,15	0,44	0,22	0,22	0,23	0,31	0,54	0,81	0,38
64	1,35	0,83	0,86	1,66	0,74	0,57	0,94	0,52	0,59	1,55	1,45	1,62
65	0,38	0,51	0,87	0,77	0,25	0,26	0,19	0,15	0,37	0,63	0,26	0,62
66	0,27	0,61	0,74	0,60	0,64	0,67	0,40	0,39	0,28	0,58	0,65	0,70
67	0,61	0,48	0,87	0,66	0,23	0,35	0,32	0,30	0,40	0,83	0,81	0,59
68	0,98	1,01	0,89	0,94	0,29	0,42	0,40	0,64	0,61	0,88	1,03	1,05
69	0,16	0,30	0,31	0,20	0,20	0,31	0,26	0,22	0,42	0,37	0,29	0,18
70	0,08	0,67	0,87	0,61	0,42	0,31	0,42	0,50	0,33	0,35	0,53	0,65
71	0,13	0,15	0,15	0,86	0,11	0,22	0,28	0,16	0,26	0,45	0,34	0,27
72	0,36	0,58	0,85	0,76	0,14	0,45	0,29	0,14	0,40	0,42	1,42	0,68
73	0,37	0,12	0,35	0,36	0,28	0,31	0,00	0,26	0,34	0,35	0,20	0,18
74	0,07	0,12	0,14	0,11	0,13	0,39	0,03	0,18	0,08	0,43	0,31	0,68
75	0,16	0,03	0,09	0,01	0,17	0,06	0,12	0,07	0,01	0,23	0,06	0,23
76	0,25	0,07	0,34	0,11	0,06	0,26	0,24	0,18	0,13	0,97	1,78	2,60
77	0,21	0,02	0,09	0,02	0,03	0,05	0,00	0,12	0,04	0,05	0,08	0,27
78	0,48	0,05	0,01	0,00	0,46	0,04	0,01	0,03	0,02	0,22	0,07	0,02
79	0,05	0,02	0,05	0,05	0,00	0,06	0,00	0,02	0,00	0,34	0,36	0,03
80	0,00	0,17	0,07	0,04	0,00	0,07	0,32	0,11	0,04	0,02	0,19	0,70
81	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,06	0,08	0,54
82	0,00	0,03	0,00	0,01	0,03	0,08	0,09	0,02	0,07	0,25	0,00	0,53
83	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,11	0,00	0,00	0,69
84	0,00	0,07	0,01	0,00	0,01	0,18	0,00	0,00	0,07	0,19	0,25	0,53
85	0,08	0,02	0,03	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,27	0,00	0,18
86	0,14	0,00	0,02	0,02	0,23	0,13	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,11
87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,06
88	0,00	0,01	0,04	0,31	0,05	0,01	0,25	0,05	0,00	0,03	0,43	0,00
89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,00
90	0,39	0,24	0,03	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
91	0,00	0,07	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
92	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,19
93	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,09	0,00	0,06	0,16	0,10	0,00	0,25
95	0,04	0,07	0,02	0,00	0,00	0,48	0,00	0,16	0,03	0,01	0,00	0,11

Tabelle A-5: Durchschnittliches Leistungsprofil (in [kW]) eines Pkw für den WTT2 differenziert nach Monaten in Szenario a)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,55	0,56	0,63	0,60	0,38	0,35	0,36	0,35	0,37	0,53	0,73	0,61
1	0,55	0,56	0,63	0,60	0,38	0,35	0,37	0,35	0,37	0,53	0,74	0,61
2	0,55	0,56	0,64	0,60	0,38	0,35	0,36	0,36	0,37	0,53	0,74	0,61
3	0,55	0,56	0,64	0,60	0,38	0,35	0,36	0,36	0,37	0,53	0,75	0,61
4	0,55	0,56	0,64	0,60	0,40	0,35	0,36	0,36	0,37	0,53	0,75	0,61
5	0,55	0,56	0,64	0,60	0,40	0,35	0,36	0,36	0,37	0,53	0,75	0,61
6	0,55	0,56	0,64	0,60	0,40	0,35	0,36	0,36	0,37	0,53	0,75	0,62
7	0,55	0,56	0,64	0,60	0,40	0,35	0,36	0,36	0,37	0,54	0,75	0,62
8	0,55	0,56	0,64	0,60	0,40	0,35	0,36	0,36	0,37	0,54	0,75	0,62
9	0,55	0,56	0,64	0,60	0,41	0,35	0,36	0,36	0,37	0,54	0,75	0,62
10	0,55	0,56	0,64	0,60	0,41	0,35	0,36	0,36	0,37	0,54	0,75	0,62
11	0,55	0,56	0,64	0,60	0,41	0,35	0,36	0,36	0,37	0,54	0,75	0,62
12	0,55	0,56	0,64	0,60	0,41	0,35	0,36	0,36	0,41	0,54	0,75	0,78
13	0,55	0,56	0,64	0,60	0,41	0,35	0,36	0,36	0,41	0,54	0,75	0,76
14	0,55	0,56	0,64	0,60	0,41	0,35	0,36	0,36	0,41	0,54	0,75	0,77
15	0,55	0,56	0,64	0,60	0,41	0,35	0,36	0,36	0,41	0,54	0,75	0,77
16	0,55	0,57	0,64	0,60	0,41	0,35	0,36	0,36	0,41	0,54	0,76	0,77
17	0,55	0,57	0,64	0,60	0,41	0,35	0,36	0,36	0,41	0,54	0,76	0,76
18	0,55	0,57	0,65	0,60	0,41	0,35	0,37	0,36	0,41	0,54	0,76	0,76
19	0,55	0,57	0,65	0,62	0,41	0,35	0,37	0,36	0,41	0,54	0,76	0,76
20	0,55	0,62	0,67	0,65	0,41	0,35	0,37	0,36	0,41	0,54	0,76	0,76
21	0,56	0,62	0,67	0,62	0,41	0,35	0,39	0,36	0,42	0,54	0,76	0,76
22	0,58	0,62	0,67	0,62	0,41	0,35	0,40	0,39	0,42	0,54	0,78	0,78
23	0,59	0,63	0,68	0,63	0,41	0,36	0,41	0,40	0,42	0,54	0,78	0,78
24	0,03	0,06	0,02	0,02	0,01	0,02	0,04	0,02	0,02	0,01	0,04	0,04
25	0,11	0,05	0,06	0,02	0,10	0,03	0,05	0,04	0,02	0,04	0,06	0,09
26	0,12	0,08	0,08	0,07	0,10	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,10	0,14
27	0,14	0,10	0,16	0,11	0,15	0,05	0,08	0,05	0,04	0,07	0,14	0,15
28	0,25	0,26	0,20	0,23	0,19	0,14	0,13	0,11	0,08	0,14	0,26	0,36
29	0,16	0,27	0,23	0,26	0,21	0,18	0,16	0,13	0,11	0,17	0,27	0,42
30	0,20	0,32	0,33	0,40	0,21	0,18	0,15	0,19	0,16	0,22	0,47	0,30
31	0,30	0,49	0,39	0,57	0,22	0,27	0,15	0,26	0,20	0,27	0,35	0,50
32	0,52	0,68	0,47	0,50	0,27	0,37	0,26	0,30	0,23	0,43	0,67	0,60
33	0,43	0,46	0,60	0,53	0,32	0,37	0,32	0,32	0,29	0,56	0,76	0,68
34	0,54	0,48	0,72	0,54	0,43	0,44	0,37	0,38	0,38	0,83	0,61	0,56
35	0,68	0,51	0,78	0,61	0,50	0,46	0,47	0,40	0,43	0,86	0,78	0,65
36	0,68	0,60	0,90	0,69	0,59	0,52	0,48	0,37	0,43	0,79	0,81	0,92
37	0,80	0,66	0,93	0,66	0,55	0,67	0,47	0,54	0,40	0,76	0,87	0,96
38	0,73	0,95	0,86	0,66	0,65	0,74	0,49	0,57	0,42	0,77	0,90	0,98
39	0,99	1,02	1,08	0,77	0,66	0,76	0,54	0,66	0,42	0,96	1,11	1,13
40	0,97	0,87	1,08	0,86	0,71	0,69	0,54	0,73	0,50	0,83	1,09	1,11
41	1,03	1,04	1,08	1,23	0,74	0,76	0,55	0,76	0,54	0,73	1,24	1,32
42	0,97	1,19	1,11	1,13	0,88	0,72	0,64	0,72	0,58	0,77	1,39	1,07
43	1,06	1,04	1,05	1,15	0,92	0,73	0,64	0,74	0,61	0,93	1,44	1,05
44	0,82	1,13	0,98	0,81	0,66	0,66	0,55	0,72	0,61	0,87	1,53	1,24
45	0,93	0,88	1,10	0,73	0,72	0,83	0,56	0,64	0,53	0,93	1,49	1,24
46	0,98	0,82	1,13	0,75	0,70	0,90	0,77	0,58	0,55	0,85	1,64	1,11
47	1,04	0,84	1,00	0,72	0,70	0,77	0,75	0,58	0,60	0,83	1,48	1,11
48	0,96	0,89	0,92	0,72	0,67	1,04	0,74	0,58	0,67	0,88	1,43	1,18

49	1,05	0,92	0,89	0,68	0,66	0,79	0,54	0,59	0,65	1,03	1,32	1,08
50	0,98	0,82	1,00	0,81	0,69	0,75	0,50	0,66	0,68	1,32	1,24	1,22
51	0,97	0,79	1,00	0,97	0,73	0,70	0,54	0,79	0,65	1,06	1,22	1,21
52	0,78	0,82	1,00	0,75	0,60	0,69	0,49	0,70	0,51	0,94	1,28	1,10
53	0,88	0,98	0,98	0,76	0,69	0,75	0,45	0,68	0,52	1,01	1,26	1,00
54	0,89	1,31	0,98	0,80	0,69	0,74	0,47	0,58	0,50	0,92	1,09	1,05
55	0,86	1,05	1,06	0,78	0,74	0,87	0,53	0,56	0,59	0,91	1,05	1,13
56	0,94	1,04	1,07	0,78	0,85	0,81	0,55	0,52	0,59	0,95	1,26	1,02
57	0,93	0,72	1,04	0,86	0,76	0,82	0,47	0,61	0,58	0,99	1,30	1,16
58	0,96	0,73	0,91	0,84	0,72	0,71	0,40	0,64	0,56	0,93	1,15	1,19
59	1,04	0,76	0,93	1,06	0,78	0,74	0,41	0,50	0,52	1,11	1,12	1,24
60	0,92	0,70	0,77	0,85	0,69	0,70	0,57	0,54	0,47	0,81	0,89	0,97
61	0,93	0,73	0,84	0,87	0,68	0,65	0,58	0,56	0,46	0,77	0,91	0,97
62	1,06	0,82	1,03	0,74	0,64	0,54	0,39	0,78	0,46	0,76	1,10	0,90
63	1,05	0,79	0,89	1,26	0,66	0,59	0,47	0,59	0,47	0,61	1,15	0,92
64	0,94	1,22	0,83	0,61	0,49	0,60	0,57	0,54	0,40	0,77	1,02	0,94
65	0,80	0,92	0,76	0,59	0,52	0,56	0,45	0,52	0,39	0,85	0,94	0,89
66	0,82	0,73	0,81	0,83	0,47	0,58	0,39	0,50	0,34	0,62	1,04	0,80
67	0,68	0,66	0,77	0,78	0,57	0,49	0,43	0,65	0,39	0,66	1,04	0,79
68	0,64	0,54	0,92	0,70	0,39	0,73	0,30	0,59	0,45	0,62	0,98	0,72
69	0,75	0,60	0,64	0,44	0,32	0,53	0,37	0,54	0,42	0,55	1,03	0,92
70	0,73	0,71	0,63	0,46	0,32	0,46	0,46	0,57	0,41	0,48	0,95	0,74
71	0,85	0,65	0,59	0,39	0,33	0,48	0,51	0,46	0,36	0,51	0,96	0,64
72	0,65	0,52	0,54	0,38	0,40	0,44	0,42	0,33	0,60	0,48	0,65	0,58
73	0,65	0,49	0,72	0,44	0,56	0,54	0,41	0,32	0,45	1,05	0,63	0,66
74	0,65	0,55	0,85	0,42	0,35	0,51	0,32	0,33	0,39	0,78	0,77	0,72
75	0,67	0,49	0,84	0,46	0,38	0,46	0,49	0,36	0,42	0,71	0,58	0,84
76	0,72	0,51	0,64	0,43	0,55	0,37	0,29	0,29	0,36	0,48	0,64	0,71
77	0,50	0,52	0,64	0,50	0,41	0,43	0,27	0,45	0,36	0,53	0,58	0,67
78	0,48	0,53	0,65	0,46	0,35	0,36	0,28	0,28	0,36	0,69	0,60	0,57
79	0,48	0,54	0,66	0,54	0,34	0,36	0,27	0,45	0,36	0,69	0,64	0,94
80	0,49	0,55	0,64	0,49	0,36	0,38	0,29	0,34	0,39	0,68	0,73	0,67
81	0,52	0,54	0,61	0,48	0,42	0,39	0,30	0,35	0,34	0,55	0,70	0,62
82	0,53	0,54	0,61	0,48	0,43	0,39	0,30	0,43	0,41	0,55	0,72	0,66
83	0,53	0,51	0,63	0,48	0,35	0,40	0,30	0,41	0,44	0,57	0,72	0,66
84	1,31	0,54	0,61	0,48	0,38	0,46	0,30	0,31	0,44	0,52	0,72	0,59
85	0,54	0,55	0,60	0,42	0,59	0,47	0,31	0,32	0,36	0,53	0,72	0,57
86	0,55	0,55	0,61	0,42	0,44	0,41	0,32	0,31	0,36	0,53	0,72	0,56
87	0,55	0,56	0,72	0,42	0,48	0,41	0,32	0,31	0,35	0,54	0,72	0,56
88	0,57	0,58	0,62	0,42	0,45	0,38	0,32	0,32	0,35	0,53	0,70	0,58
89	0,57	0,57	0,61	0,42	0,77	0,37	0,31	0,32	0,37	0,53	0,70	0,58
90	0,57	0,56	0,63	0,43	0,45	0,37	0,31	0,35	0,37	0,51	0,70	0,59
91	0,57	0,56	0,63	0,43	0,45	0,41	0,31	0,36	0,37	0,51	0,70	0,61
92	0,57	0,55	0,66	0,43	0,45	0,41	0,31	0,36	0,37	0,52	0,72	0,61
93	0,57	0,55	0,67	0,43	0,45	0,37	0,31	0,36	0,37	0,52	0,72	0,61
94	0,57	0,56	0,70	0,43	0,45	0,37	0,31	0,36	0,38	0,53	0,72	0,61
95	0,57	0,56	0,67	0,44	0,46	0,39	0,31	0,37	0,38	0,54	0,72	0,62

Tabelle A-6: Durchschnittliches Leistungsprofil (in [kW]) eines Pkw für den WTT5 differenziert nach Monaten in Szenario a)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,19	0,19	0,34	0,10	0,22	0,21	0,25	0,11	0,16	0,21	0,21	0,34
1	0,19	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,25	0,11	0,16	0,21	0,21	0,34
2	0,19	0,20	0,38	0,10	0,22	0,22	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
3	0,19	0,20	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
4	0,19	0,20	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
5	0,19	0,20	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,17	0,21	0,21	0,35
6	0,19	0,20	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
7	0,19	0,20	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,17	0,21	0,21	0,35
8	0,19	0,20	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,17	0,21	0,21	0,35
9	0,19	0,20	0,38	0,10	0,22	0,22	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
10	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,23	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
11	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
12	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
13	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
14	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
15	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
16	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,17	0,21	0,21	0,35
17	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,17	0,21	0,21	0,35
18	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,21	0,33	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
19	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,21	0,33	0,11	0,17	0,21	0,21	0,35
20	0,19	0,21	0,38	0,10	0,22	0,21	0,30	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
21	0,19	0,21	0,38	0,10	0,41	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,35
22	0,19	0,20	0,38	0,10	0,41	0,22	0,26	0,11	0,17	0,21	0,21	0,35
23	0,19	0,21	0,38	0,10	0,44	0,22	0,26	0,11	0,17	0,21	0,21	0,35
24	0,04	0,01	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
26	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
27	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,00	0,00	0,09	0,08	0,01	0,00
28	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,05	0,01	0,01
29	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,10	0,06	0,01
30	0,05	0,00	0,01	0,02	0,05	0,04	0,00	0,00	0,01	0,05	0,02	0,02
31	0,01	0,00	0,02	0,03	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	0,07	0,02	0,03
32	0,03	0,01	0,03	0,04	0,03	0,05	0,00	0,01	0,02	0,02	0,07	0,04
33	0,12	0,04	0,07	0,07	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03	0,10	0,05
34	0,03	0,05	0,08	0,12	0,04	0,04	0,06	0,01	0,02	0,05	0,09	0,07
35	0,03	0,05	0,07	0,12	0,03	0,04	0,07	0,01	0,03	0,07	0,15	0,05
36	0,08	0,05	0,05	0,13	0,04	0,05	0,02	0,04	0,02	0,09	0,08	0,18
37	0,05	0,07	0,04	0,12	0,04	0,05	0,02	0,04	0,09	0,05	0,07	0,04
38	0,05	0,06	0,05	0,14	0,06	0,06	0,06	0,30	0,09	0,06	0,28	0,05
39	0,06	0,07	0,06	0,13	0,06	0,06	0,08	0,31	0,03	0,11	0,20	0,13
40	0,06	0,10	0,09	0,18	0,06	0,05	0,08	0,04	0,04	0,10	0,18	0,06
41	0,06	0,13	0,13	0,19	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,23	0,26	0,11
42	0,06	0,16	0,12	0,19	0,03	0,09	0,08	0,05	0,06	0,25	0,21	0,17
43	0,06	0,18	0,13	0,26	0,06	0,10	0,08	0,07	0,09	0,24	0,27	0,21
44	0,05	0,16	0,12	0,17	0,09	0,09	0,17	0,08	0,05	0,26	0,34	0,25
45	0,06	0,34	0,14	0,17	0,04	0,08	0,14	0,08	0,06	0,27	0,32	0,24
46	0,06	0,70	0,16	0,20	0,05	0,09	0,09	0,20	0,10	0,49	0,31	0,31
47	0,06	0,71	0,15	0,28	0,06	0,08	0,09	0,22	0,07	0,27	0,22	0,31
48	0,08	0,19	0,17	0,18	0,10	0,09	0,08	0,21	0,07	0,25	0,22	0,73

49	0,15	0,25	0,19	0,19	0,11	0,09	0,07	0,11	0,08	0,22	0,23	0,31
50	0,15	0,27	0,18	0,20	0,10	0,23	0,07	0,09	0,10	0,22	0,28	0,28
51	0,15	0,22	0,18	0,21	0,12	0,23	0,07	0,09	0,10	0,25	0,29	0,34
52	0,15	0,19	0,20	0,19	0,15	0,09	0,06	0,10	0,09	0,24	0,28	0,29
53	0,10	0,16	0,21	0,30	0,15	0,09	0,07	0,10	0,08	0,35	0,27	0,21
54	0,09	0,16	0,18	0,19	0,13	0,18	0,08	0,10	0,25	0,36	0,24	0,23
55	0,09	0,16	0,20	0,21	0,12	0,16	0,09	0,12	0,09	0,31	0,23	0,23
56	0,25	0,18	0,21	0,21	0,10	0,11	0,09	0,13	0,10	0,30	0,20	0,22
57	0,13	0,14	0,18	0,25	0,10	0,11	0,08	0,13	0,13	0,34	0,21	0,22
58	0,16	0,17	0,18	0,23	0,10	0,10	0,09	0,72	0,13	0,33	0,21	0,23
59	0,16	0,18	0,17	0,27	0,10	0,11	0,23	0,13	0,14	0,34	0,21	0,26
60	0,18	0,18	0,27	0,21	0,30	0,23	0,10	0,09	0,11	0,35	0,19	0,21
61	0,19	0,17	0,19	0,20	0,30	0,12	0,11	0,10	0,12	0,39	0,19	0,20
62	0,20	0,17	0,22	0,20	0,09	0,12	0,09	0,12	0,14	0,39	0,24	0,18
63	0,19	0,19	0,22	0,21	0,16	0,13	0,09	0,11	0,14	0,37	0,23	0,18
64	0,18	0,19	0,20	0,23	0,11	0,14	0,07	0,10	0,18	0,28	0,17	0,11
65	0,15	0,21	0,19	0,23	0,08	0,13	0,13	0,11	0,13	0,29	0,17	0,12
66	0,16	0,21	0,18	0,26	0,08	0,14	0,13	0,09	0,12	0,29	0,16	0,12
67	0,16	0,23	0,27	0,63	0,09	0,14	0,24	0,09	0,12	0,30	0,20	0,19
68	0,17	0,28	0,13	0,25	0,08	0,17	0,10	0,15	0,12	0,30	0,17	0,17
69	0,17	0,26	0,14	0,25	0,08	0,17	0,13	0,16	0,11	0,31	0,17	0,14
70	0,18	0,25	0,19	0,22	0,07	0,20	0,21	0,16	0,12	0,30	0,17	0,27
71	0,18	0,22	0,14	0,21	0,08	0,20	0,18	0,16	0,11	0,39	0,18	0,28
72	0,23	0,24	0,13	0,24	0,11	0,15	0,15	0,14	0,17	0,29	0,17	0,14
73	0,21	0,17	0,13	0,28	0,10	0,17	0,15	0,12	0,18	0,22	0,17	0,11
74	0,21	0,19	0,13	0,24	0,66	0,17	0,15	0,10	0,18	0,16	0,16	0,21
75	0,22	0,19	0,13	0,23	0,10	0,17	0,14	0,10	0,22	0,16	0,34	0,14
76	0,21	0,18	0,13	0,20	0,11	0,15	0,14	0,09	0,19	0,17	0,17	0,09
77	0,18	0,20	0,13	0,21	0,11	0,16	0,09	0,09	0,19	0,17	0,18	0,08
78	0,18	0,20	0,13	0,23	0,11	0,15	0,13	0,13	0,17	0,16	0,49	0,19
79	0,18	0,20	0,13	0,26	0,11	0,15	0,07	0,14	0,14	0,16	0,50	0,10
80	0,15	0,23	0,15	0,24	0,09	0,14	0,05	0,16	0,13	0,21	0,18	0,11
81	0,15	1,57	0,15	0,24	0,09	0,18	0,05	0,16	0,13	0,20	0,17	0,13
82	0,15	0,27	0,13	0,21	0,10	0,15	0,04	0,16	0,13	0,22	0,18	0,15
83	0,15	0,27	0,14	0,21	0,10	0,15	0,05	0,16	0,13	0,23	0,18	0,38
84	0,17	0,27	0,14	0,21	0,10	0,16	0,05	0,16	0,13	0,23	0,18	0,15
85	0,18	0,27	0,14	0,21	0,10	0,17	0,05	0,16	0,13	0,21	0,19	0,18
86	0,17	0,27	0,14	0,22	0,09	0,37	0,06	0,16	0,13	0,21	0,20	0,18
87	0,16	0,27	0,15	0,26	0,09	0,17	0,06	0,16	0,13	0,21	0,20	0,19
88	0,16	0,27	0,15	0,26	0,09	0,16	0,06	0,16	0,13	0,21	0,20	0,21
89	0,16	0,28	0,15	0,27	0,09	0,16	0,06	0,16	0,13	0,21	0,20	0,21
90	0,16	0,30	0,16	0,29	0,09	0,18	0,08	0,16	0,13	0,21	0,20	0,22
91	0,16	0,30	0,17	0,29	0,09	0,18	0,08	0,16	0,13	0,21	0,20	0,67
92	0,18	0,30	0,18	0,28	0,09	0,18	0,08	0,16	0,13	0,26	0,19	0,44
93	0,17	0,48	0,19	0,28	0,09	0,19	0,08	0,19	0,13	0,35	0,20	0,21
94	0,17	0,30	0,19	0,29	0,09	0,19	0,08	0,19	0,13	0,35	0,20	0,23
95	0,17	0,30	0,19	0,29	0,09	0,19	0,08	0,21	0,13	0,35	0,20	0,22

Tabelle A-7: Durchschnittliches Leistungsprofil (in [kW]) eines LNfz für den WTT2 differenziert nach Monaten in Szenario a)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,74	0,83	0,94	1,47	0,53	0,78	0,59	0,52	0,61	1,11	1,25	1,58
1	0,74	0,83	0,94	1,47	0,55	0,78	0,59	0,54	0,61	1,16	1,26	1,58
2	0,74	0,83	0,94	1,47	0,57	0,78	0,59	0,55	0,61	1,16	1,26	1,58
3	0,74	0,83	0,94	1,47	0,57	0,78	0,59	0,55	0,65	1,16	1,26	1,58
4	0,74	0,84	0,94	1,49	0,59	0,78	0,59	0,55	0,64	1,16	1,26	1,61
5	0,74	0,84	0,94	1,49	0,59	0,78	0,59	0,55	0,61	1,16	1,26	1,62
6	0,77	0,84	0,94	1,49	0,59	0,82	0,59	0,55	0,61	1,16	1,26	1,62
7	0,77	0,84	1,01	1,49	0,59	0,82	0,59	0,55	0,61	1,16	1,26	1,61
8	0,77	0,84	1,01	1,49	0,58	0,81	0,63	0,55	0,61	1,35	1,28	1,62
9	0,77	0,84	1,01	1,49	0,58	0,79	0,63	0,55	0,61	1,35	1,27	1,62
10	0,81	0,84	1,01	1,49	0,58	0,79	0,63	0,56	0,64	1,16	1,27	1,62
11	0,87	0,84	0,96	1,49	0,66	0,80	0,64	0,56	0,61	1,16	1,27	1,61
12	0,88	0,84	0,96	1,49	0,63	0,81	0,66	0,58	0,64	1,16	1,29	1,61
13	0,88	0,84	0,96	1,49	0,59	0,81	0,64	0,56	0,62	1,29	1,31	1,61
14	0,88	0,84	0,96	1,61	0,63	0,80	0,63	0,57	0,65	1,16	1,35	1,69
15	0,88	0,84	0,97	1,85	0,60	0,82	0,63	0,56	0,65	1,16	1,35	1,73
16	0,88	0,84	1,04	1,51	0,60	0,82	0,63	0,57	0,68	1,16	1,35	1,76
17	0,78	0,84	0,97	1,50	0,60	0,81	0,63	0,56	0,66	1,16	1,36	1,78
18	0,81	0,85	0,97	1,51	0,59	0,81	0,65	0,62	0,67	1,16	1,36	1,79
19	0,82	0,85	0,98	1,50	0,60	0,83	0,65	0,60	0,74	1,16	1,37	1,82
20	0,83	1,00	1,03	1,51	0,66	0,86	1,12	0,56	0,71	1,17	1,36	1,79
21	0,83	1,11	1,05	1,79	0,63	0,84	0,66	0,61	0,73	1,17	1,40	1,82
22	0,83	0,86	1,12	1,58	0,61	0,87	0,71	0,63	0,77	1,17	1,39	2,18
23	0,98	1,07	1,06	1,72	0,66	0,86	0,74	0,58	1,09	1,37	1,43	1,96
24	0,09	0,31	0,18	0,04	0,07	0,10	0,09	0,09	0,10	0,04	0,13	0,19
25	0,28	0,16	0,29	0,12	0,11	0,15	0,24	0,12	0,24	0,28	0,30	0,30
26	0,08	0,32	0,16	0,24	0,36	0,17	0,24	0,43	0,22	0,13	0,47	0,53
27	0,16	0,45	0,25	0,39	0,28	0,30	0,27	0,30	0,48	0,44	1,74	0,41
28	0,19	0,36	0,87	0,81	0,39	0,69	0,52	0,55	0,54	0,67	0,68	1,15
29	0,34	0,46	0,72	1,10	0,36	0,51	0,38	0,62	0,54	0,92	0,98	1,63
30	0,43	0,80	0,95	1,28	0,49	0,49	0,36	0,56	0,69	0,88	1,23	1,67
31	0,78	0,90	1,03	1,10	0,78	0,64	0,39	0,63	0,88	1,06	1,03	1,72
32	0,93	0,74	1,02	0,87	1,38	1,11	0,49	0,74	0,87	1,05	2,02	1,83
33	0,96	0,87	0,98	0,94	1,12	1,03	0,57	0,78	0,92	1,08	1,93	2,09
34	1,53	1,32	1,46	1,02	1,38	0,87	0,74	0,88	0,96	1,52	1,89	2,08
35	1,20	1,92	1,40	0,98	1,54	1,03	0,78	0,97	0,86	1,48	1,57	2,06
36	1,12	1,65	1,03	0,98	1,19	1,04	1,04	0,92	0,98	1,45	1,63	1,90
37	1,23	1,43	1,75	1,04	1,25	1,18	1,11	1,11	1,50	1,74	1,73	2,19
38	1,24	1,38	2,14	1,05	1,16	0,97	1,08	0,76	1,27	1,62	1,69	2,28
39	1,15	1,14	1,69	1,08	1,22	1,33	1,17	0,81	1,08	2,01	1,74	2,25
40	1,56	1,47	1,32	1,19	1,17	0,91	1,30	0,82	1,10	2,10	1,49	2,37
41	1,79	1,40	1,82	1,32	1,38	0,97	1,25	0,82	1,51	2,20	1,51	1,83
42	1,18	1,26	1,70	1,12	1,15	1,04	1,01	0,92	1,22	1,66	1,93	2,86
43	1,45	1,15	1,42	1,29	0,98	1,10	0,88	0,91	1,38	1,57	2,05	2,26
44	1,33	1,18	1,25	1,12	1,31	0,92	0,71	0,83	1,29	2,72	1,63	1,99
45	1,21	1,16	1,20	1,16	1,05	1,10	0,83	0,95	1,23	1,70	1,89	1,75
46	1,04	1,16	1,40	1,54	1,15	0,93	0,83	1,24	0,97	1,65	1,88	1,80
47	0,92	1,50	1,57	1,64	0,91	0,94	0,78	0,87	1,02	2,10	2,09	1,61
48	0,81	1,26	1,48	1,83	1,13	0,94	0,74	0,81	1,07	1,89	1,37	1,43

49	0,99	1,48	1,28	1,32	0,84	1,21	0,78	0,79	1,26	1,68	1,50	1,71
50	0,96	1,45	1,35	1,52	0,89	1,05	0,80	0,67	1,28	2,19	1,50	1,54
51	0,97	1,27	1,56	1,43	0,83	1,03	0,90	0,73	1,09	1,77	1,61	1,55
52	1,32	1,16	1,51	1,22	0,92	0,94	1,11	0,82	0,98	1,92	1,40	1,87
53	1,31	1,16	1,20	1,30	0,85	0,92	1,06	0,81	1,19	1,99	1,46	1,46
54	1,44	1,19	1,16	1,37	0,76	0,83	1,71	0,77	0,93	2,26	1,34	1,68
55	1,40	1,14	1,29	1,56	0,97	0,98	0,81	0,72	0,96	2,00	1,42	1,87
56	0,82	1,02	1,08	1,10	0,95	1,11	0,68	0,80	0,92	1,71	1,24	1,71
57	1,29	1,00	1,11	1,31	0,87	1,34	0,72	0,81	0,96	1,57	1,48	1,39
58	1,22	1,15	1,04	1,42	0,85	1,01	0,72	0,75	0,90	2,20	1,69	1,56
59	1,39	0,96	1,22	1,35	0,84	0,95	0,72	0,82	0,74	2,15	1,53	1,47
60	1,22	0,85	1,03	2,34	1,03	0,83	0,83	0,98	0,90	1,68	1,38	1,39
61	0,87	0,88	1,21	1,15	0,97	0,81	0,58	0,67	0,86	1,56	1,23	1,50
62	0,83	0,85	1,00	1,30	0,83	0,71	0,67	0,59	0,75	1,45	1,15	1,29
63	1,01	0,74	1,04	1,20	0,79	0,92	0,86	0,58	0,76	1,69	1,23	1,32
64	1,21	0,80	1,05	0,84	0,62	0,67	0,85	0,58	0,67	1,00	1,13	1,09
65	1,13	0,77	1,25	0,88	0,63	0,55	0,69	0,53	0,73	0,98	0,99	1,45
66	1,02	1,70	0,87	0,90	1,59	0,88	0,53	0,59	0,67	0,86	0,80	1,00
67	0,87	0,67	0,92	1,14	0,61	0,90	0,57	0,60	0,64	0,98	1,45	1,25
68	0,73	0,78	0,82	1,54	0,52	0,60	0,51	0,54	0,57	0,76	0,81	0,85
69	0,72	0,80	0,90	1,22	0,52	0,63	0,52	0,57	0,55	0,81	0,80	0,89
70	0,67	0,84	0,91	0,82	0,59	0,61	0,50	0,53	0,56	0,80	0,85	0,80
71	0,66	0,90	0,95	0,85	0,51	0,48	0,52	0,56	0,58	0,78	0,95	1,05
72	1,00	0,90	1,15	0,81	0,53	0,56	0,54	0,52	0,65	0,96	0,99	0,91
73	0,74	0,80	0,87	0,84	0,53	0,60	0,54	0,55	0,61	0,74	0,98	0,84
74	0,72	0,77	0,88	0,77	0,53	0,88	0,53	0,54	0,59	0,80	0,97	0,90
75	0,71	0,75	0,89	0,78	0,54	0,77	0,79	0,55	0,58	0,83	0,96	0,91
76	0,70	0,79	0,91	0,79	0,52	0,60	0,51	0,52	0,54	0,94	1,09	1,13
77	0,69	0,76	0,92	0,79	0,51	0,59	0,52	0,54	0,60	0,87	1,09	1,23
78	0,77	0,76	0,90	0,77	0,55	0,56	0,52	0,53	0,54	0,91	1,09	1,19
79	0,78	0,73	0,92	0,77	0,56	0,57	0,52	0,51	0,53	0,91	1,85	1,27
80	0,75	0,72	0,92	0,77	0,56	0,61	0,53	0,52	0,54	0,91	1,55	1,33
81	0,75	0,72	0,93	0,77	0,55	0,56	0,55	0,52	0,54	0,96	1,11	1,47
82	0,70	0,75	0,91	0,77	0,53	0,59	0,56	0,53	0,54	0,95	1,12	1,27
83	0,70	0,87	0,91	0,77	0,53	0,57	0,56	0,53	0,58	0,95	1,12	1,35
84	0,70	0,90	0,90	0,76	0,53	0,61	0,56	0,53	0,58	0,96	1,14	1,41
85	0,71	0,76	0,90	0,76	0,53	0,60	0,56	0,53	0,55	1,00	1,14	1,43
86	0,80	0,76	0,89	0,76	0,54	0,62	0,56	0,53	0,56	0,99	1,14	1,44
87	0,80	0,74	0,89	0,76	0,56	0,62	0,56	0,53	0,57	0,99	1,14	1,45
88	0,78	0,74	0,89	0,78	0,57	0,65	0,59	0,52	0,56	1,00	1,20	1,45
89	0,78	0,74	0,89	0,80	0,56	0,62	0,59	0,51	0,56	1,00	1,24	1,45
90	0,83	0,77	0,90	0,80	0,56	0,63	0,59	0,51	0,56	1,00	1,24	1,45
91	0,83	0,84	0,90	0,80	0,56	0,63	0,59	0,51	0,56	1,00	1,24	1,45
92	0,74	0,84	0,92	0,80	0,56	0,63	0,59	0,55	0,56	1,02	1,24	1,47
93	0,74	0,84	0,92	0,80	0,56	0,65	0,59	0,49	0,56	1,00	1,24	1,47
94	0,74	0,77	0,92	0,80	0,56	0,67	0,59	0,50	0,59	1,01	1,24	1,51
95	0,74	0,78	0,92	0,80	0,56	0,71	0,59	0,59	0,59	1,05	1,24	1,52

Tabelle A-8: Durchschnittliches Leistungsprofil (in [kW]) eines LNfzg für den WTT5 differenziert nach Monaten in Szenario a)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,30	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,15	0,10	0,19	0,26
1	0,30	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,19	0,26
2	0,30	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
3	0,30	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
4	0,30	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
5	0,30	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
6	0,30	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
7	0,30	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
8	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
9	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
10	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
11	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
12	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
13	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,26
14	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,34
15	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,09	0,16	0,10	0,24	0,34
16	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,10	0,16	0,10	0,24	0,29
17	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,10	0,16	0,10	0,24	0,37
18	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,10	0,16	0,10	0,24	0,26
19	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,10	0,16	0,10	0,24	0,38
20	0,32	0,13	0,12	0,10	0,15	0,23	0,11	0,10	0,16	0,10	0,24	0,26
21	0,32	0,13	0,12	0,10	0,15	0,23	0,11	0,10	0,16	0,10	0,24	0,30
22	0,32	0,13	0,12	0,10	0,15	0,23	0,11	0,10	0,16	0,10	0,24	0,26
23	0,32	0,13	0,12	0,10	0,15	0,23	0,11	0,34	0,16	0,10	0,24	0,26
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,07	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
28	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
29	0,00	0,00	0,01	0,01	0,05	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02
30	0,00	0,01	0,02	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02
31	0,02	0,01	0,02	0,03	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
32	0,02	0,01	0,02	0,04	0,00	0,02	0,00	0,01	0,03	0,00	0,08	0,02
33	0,02	0,04	0,02	0,15	0,00	0,02	0,01	0,01	0,05	0,02	0,08	0,02
34	0,02	0,08	0,08	0,09	0,00	0,03	0,01	0,01	0,01	0,04	0,10	0,17
35	0,02	0,02	0,08	0,13	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,04	0,11	0,17
36	0,02	0,02	0,08	0,08	0,10	0,02	0,01	0,01	0,01	0,04	0,11	0,18
37	0,02	0,02	0,09	0,08	0,14	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,12	0,18
38	0,02	0,19	0,09	0,08	0,10	0,04	0,01	0,02	0,01	0,02	0,14	0,02
39	0,02	0,02	0,09	0,18	0,10	0,04	0,01	0,02	0,01	0,03	0,18	0,02
40	0,03	0,02	0,09	0,09	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,11	0,07
41	0,03	0,02	0,09	0,09	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,11	0,04
42	0,03	0,02	0,09	0,06	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,11	0,04
43	0,03	0,03	0,10	0,06	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01	0,48	0,11	0,08
44	0,03	0,02	0,09	0,05	0,04	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,14	0,04
45	0,03	0,04	0,09	0,06	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,15	0,04
46	0,03	0,04	0,14	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,11	0,08
47	0,03	0,47	0,09	0,14	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,11	0,08
48	0,03	0,04	0,09	0,14	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,11	0,08

49	0,03	0,04	0,09	0,14	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,12	0,08
50	0,04	0,04	0,09	0,04	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,12	0,08
51	0,04	0,03	0,09	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,12	0,08
52	0,04	0,02	0,09	0,03	0,03	0,04	0,01	0,01	0,03	0,02	0,12	0,15
53	0,04	0,02	0,09	0,03	0,03	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,11	0,15
54	0,04	0,02	0,09	0,06	0,12	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,09	0,20
55	0,05	0,02	0,09	0,06	0,12	0,05	0,01	0,01	0,02	0,02	0,23	0,20
56	0,05	0,03	0,09	0,06	0,12	0,05	0,01	0,01	0,02	0,02	0,29	0,11
57	0,05	0,03	0,09	0,16	0,12	0,05	0,01	0,01	0,02	0,02	0,18	0,11
58	0,05	0,03	0,05	0,20	0,03	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,18	0,19
59	0,05	0,03	0,05	0,06	0,03	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	0,18	0,30
60	0,05	0,03	0,06	0,05	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,15	0,04
61	0,07	0,03	0,08	0,05	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,13	0,07
62	0,07	0,03	0,06	0,07	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,09	0,10
63	0,07	0,03	0,06	0,07	0,04	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,36	0,05
64	0,05	0,02	0,06	0,08	0,02	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	0,10	0,04
65	0,05	0,02	0,06	0,21	0,03	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	0,11	0,11
66	0,04	0,03	0,08	0,15	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,01	0,12	0,04
67	0,05	0,03	0,08	0,15	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,01	0,12	0,04
68	0,04	0,03	0,07	0,16	0,03	0,06	0,02	0,01	0,01	0,06	0,13	0,05
69	0,04	0,03	0,06	0,17	0,03	0,06	0,02	0,02	0,01	0,06	0,13	0,06
70	0,04	0,02	0,06	0,17	0,04	0,07	0,02	0,02	0,01	0,02	0,13	0,06
71	0,04	0,02	0,06	0,17	0,04	0,16	0,02	0,01	0,01	0,02	0,12	0,09
72	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,17	0,02	0,01	0,01	0,02	0,12	0,11
73	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,11	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,11
74	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,14	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,10
75	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,11	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,06
76	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,11	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05
77	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,11	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05
78	0,04	0,02	0,09	0,16	0,04	0,11	0,03	0,01	0,01	0,02	0,05	0,06
79	0,04	0,09	0,09	0,16	0,04	0,11	0,03	0,01	0,01	0,02	0,05	0,06
80	0,04	0,09	0,09	0,16	0,04	0,11	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05	0,06
81	0,04	0,09	0,09	0,16	0,04	0,11	0,03	0,01	0,04	0,02	0,05	0,06
82	0,04	0,09	0,14	0,16	0,04	0,11	0,03	0,01	0,04	0,02	0,05	0,06
83	0,04	0,09	0,14	0,16	0,04	0,08	0,03	0,01	0,04	0,02	0,05	0,06
84	0,04	0,09	0,14	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,06
85	0,04	0,09	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,06
86	0,04	0,09	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,06
87	0,04	0,09	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,06
88	0,04	0,21	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
89	0,04	0,21	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
90	0,04	0,21	0,24	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
91	0,04	0,21	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
92	0,04	0,22	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
93	0,04	0,22	0,18	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
94	0,04	0,22	0,18	0,16	0,04	0,07	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
95	0,04	0,23	0,18	0,16	0,04	0,09	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07

Tabelle A-9: Durchschnittliches Leistungsprofil (in [kW]) eines Pkw für den WTT2 differenziert nach Monaten in Szenario b)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,37	0,55	0,74	0,71
1	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,37	0,36	0,37	0,55	0,74	0,72
2	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,37	0,55	0,74	0,72
3	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,38	0,55	0,74	0,72
4	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,37	0,55	0,74	0,71
5	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,37	0,55	0,74	0,71
6	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,38	0,55	0,74	0,72
7	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,37	0,56	0,74	0,72
8	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,37	0,56	0,74	0,72
9	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,37	0,56	0,74	0,72
10	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,37	0,56	0,75	0,72
11	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,37	0,56	0,75	0,72
12	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,38	0,56	0,75	0,75
13	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,38	0,56	0,75	0,73
14	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,38	0,56	0,75	0,74
15	0,61	0,61	0,63	0,62	0,39	0,35	0,36	0,36	0,38	0,56	0,75	0,74
16	0,57	0,58	0,63	0,61	0,39	0,35	0,36	0,36	0,38	0,54	0,74	0,67
17	0,55	0,57	0,63	0,60	0,38	0,35	0,36	0,35	0,37	0,54	0,73	0,63
18	0,55	0,57	0,63	0,60	0,38	0,35	0,37	0,35	0,37	0,54	0,73	0,63
19	0,55	0,57	0,63	0,62	0,38	0,35	0,37	0,35	0,38	0,54	0,73	0,63
20	0,55	0,57	0,64	0,65	0,38	0,35	0,37	0,35	0,38	0,54	0,74	0,63
21	0,56	0,57	0,64	0,62	0,39	0,35	0,39	0,35	0,38	0,54	0,74	0,63
22	0,58	0,57	0,64	0,62	0,39	0,35	0,40	0,38	0,38	0,54	0,76	0,64
23	0,59	0,57	0,64	0,63	0,39	0,35	0,41	0,39	0,39	0,54	0,76	0,64
24	0,03	0,06	0,02	0,02	0,01	0,02	0,04	0,02	0,02	0,01	0,04	0,04
25	0,11	0,05	0,06	0,02	0,10	0,03	0,05	0,04	0,02	0,04	0,06	0,09
26	0,12	0,08	0,08	0,07	0,10	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,10	0,14
27	0,14	0,10	0,16	0,11	0,15	0,05	0,08	0,05	0,04	0,07	0,14	0,15
28	0,25	0,26	0,20	0,23	0,19	0,14	0,13	0,11	0,08	0,14	0,26	0,36
29	0,16	0,27	0,23	0,26	0,21	0,18	0,16	0,13	0,11	0,17	0,27	0,42
30	0,20	0,32	0,33	0,40	0,21	0,18	0,15	0,19	0,16	0,22	0,47	0,30
31	0,30	0,49	0,39	0,57	0,22	0,27	0,15	0,26	0,20	0,27	0,35	0,50
32	0,52	0,68	0,47	0,50	0,27	0,37	0,26	0,30	0,23	0,43	0,67	0,60
33	0,43	0,46	0,60	0,53	0,32	0,37	0,32	0,32	0,29	0,56	0,76	0,58
34	0,54	0,48	0,72	0,54	0,43	0,44	0,37	0,38	0,38	0,83	0,61	0,56
35	0,68	0,51	0,78	0,61	0,50	0,46	0,47	0,40	0,43	0,86	0,78	0,65
36	0,68	0,60	0,90	0,69	0,59	0,52	0,49	0,37	0,43	0,79	0,81	0,92
37	0,80	0,66	0,93	0,66	0,55	0,67	0,47	0,54	0,40	0,76	0,87	0,96
38	0,73	0,95	0,86	0,66	0,65	0,74	0,49	0,57	0,42	0,77	0,90	0,98
39	0,99	1,02	1,08	0,77	0,66	0,76	0,54	0,66	0,42	0,96	1,11	1,13
40	0,97	0,87	1,08	0,86	0,71	0,70	0,54	0,73	0,50	0,83	1,09	1,11
41	1,03	1,04	1,08	1,23	0,74	0,76	0,55	0,76	0,54	0,73	1,24	1,06
42	0,97	1,19	1,13	1,13	0,88	0,72	0,64	0,72	0,58	0,77	1,39	1,07
43	1,06	1,04	1,05	1,15	0,92	0,73	0,64	0,74	0,61	0,93	1,44	1,05
44	0,82	1,13	0,98	0,81	0,66	0,66	0,55	0,72	0,61	0,87	1,53	1,24
45	0,93	0,88	1,10	0,73	0,72	0,83	0,56	0,64	0,53	0,93	1,49	1,24
46	0,98	0,82	1,13	0,75	0,70	0,90	0,77	0,58	0,55	0,85	1,64	1,11
47	1,04	0,84	1,00	0,72	0,70	0,77	0,75	0,58	0,60	0,83	1,48	1,11
48	0,96	0,89	0,92	0,72	0,67	1,04	0,74	0,58	0,67	0,88	1,43	1,18

49	1,05	0,92	0,89	0,68	0,66	0,79	0,54	0,59	0,65	1,03	1,32	1,08
50	0,98	0,82	1,00	0,81	0,69	0,75	0,50	0,66	0,68	1,32	1,24	1,22
51	0,97	0,79	1,00	0,97	0,73	0,70	0,54	0,79	0,65	1,06	1,22	1,21
52	0,78	0,82	1,00	0,75	0,60	0,69	0,49	0,70	0,51	0,94	1,28	1,10
53	0,88	0,80	0,98	0,76	0,69	0,75	0,45	0,68	0,52	1,01	1,26	1,00
54	0,89	0,78	0,98	0,80	0,69	0,74	0,47	0,58	0,50	0,92	1,09	1,05
55	0,86	1,05	1,06	0,78	0,74	0,87	0,53	0,56	0,59	0,91	1,05	1,13
56	0,94	1,04	1,07	0,78	0,85	0,81	0,55	0,52	0,59	0,95	1,26	1,02
57	0,93	0,72	1,04	0,86	0,76	0,82	0,47	0,61	0,58	0,99	1,30	1,16
58	0,96	0,73	0,91	0,84	0,72	0,71	0,40	0,64	0,56	0,93	1,15	1,19
59	1,04	0,76	0,93	1,06	0,78	0,74	0,41	0,50	0,52	1,11	1,12	1,24
60	0,92	0,70	0,77	0,85	0,69	0,70	0,57	0,54	0,47	0,81	0,89	0,97
61	0,93	0,73	0,84	0,87	0,68	0,65	0,58	0,56	0,46	0,77	0,91	0,97
62	1,06	0,82	1,03	0,74	0,64	0,54	0,39	0,79	0,46	0,76	0,92	0,90
63	1,05	0,79	0,89	0,74	0,66	0,59	0,47	0,59	0,47	0,61	0,97	0,92
64	0,94	1,22	0,83	0,61	0,49	0,60	0,57	0,54	0,40	0,77	1,02	0,94
65	0,80	0,92	0,76	0,59	0,52	0,56	0,45	0,52	0,39	0,85	0,94	0,89
66	0,82	0,73	0,81	0,83	0,47	0,58	0,39	0,50	0,34	0,62	1,04	0,80
67	0,68	0,66	0,77	0,78	0,57	0,49	0,43	0,65	0,39	0,66	1,04	0,79
68	0,64	0,54	0,92	0,70	0,39	0,73	0,30	0,59	0,37	0,62	0,98	0,72
69	0,75	0,60	0,64	0,44	0,32	0,53	0,37	0,54	0,42	0,55	1,03	0,92
70	0,73	0,71	0,63	0,46	0,32	0,46	0,46	0,57	0,41	0,48	0,95	0,74
71	0,85	0,65	0,59	0,39	0,33	0,48	0,51	0,46	0,36	0,51	0,96	0,64
72	0,65	0,52	0,54	0,38	0,40	0,44	0,42	0,33	0,60	0,48	0,65	0,58
73	0,65	0,49	0,72	0,44	0,56	0,54	0,41	0,32	0,45	0,54	0,63	0,66
74	0,65	0,55	0,85	0,42	0,35	0,51	0,32	0,33	0,39	0,78	0,77	0,72
75	0,67	0,49	0,84	0,46	0,38	0,46	0,49	0,36	0,42	0,71	0,58	0,84
76	0,72	0,51	0,64	0,43	0,55	0,37	0,29	0,29	0,36	0,48	0,64	0,71
77	0,50	0,52	0,64	0,50	0,41	0,43	0,27	0,45	0,36	0,53	0,58	0,67
78	0,48	0,53	0,66	0,46	0,35	0,36	0,28	0,28	0,36	0,69	0,60	0,57
79	0,48	0,54	0,67	0,54	0,34	0,36	0,27	0,45	0,36	0,69	0,64	0,72
80	0,49	0,55	0,64	0,49	0,36	0,38	0,29	0,34	0,39	0,68	0,73	0,67
81	0,52	0,54	0,61	0,48	0,42	0,39	0,30	0,35	0,34	0,55	0,70	0,62
82	0,53	0,54	0,61	0,48	0,43	0,39	0,30	0,43	0,41	0,55	0,72	0,66
83	0,53	0,51	0,63	0,48	0,35	0,40	0,30	0,41	0,44	0,57	0,72	0,66
84	0,54	0,54	0,62	0,48	0,38	0,46	0,30	0,31	0,44	0,52	0,72	0,59
85	0,54	0,55	0,61	0,42	0,40	0,47	0,31	0,32	0,36	0,53	0,72	0,57
86	0,55	0,55	0,61	0,42	0,44	0,41	0,32	0,31	0,36	0,53	0,72	0,56
87	0,55	0,56	0,61	0,42	0,48	0,41	0,32	0,31	0,35	0,54	0,72	0,56
88	0,57	0,58	0,62	0,42	0,45	0,38	0,32	0,32	0,35	0,53	0,70	0,58
89	0,57	0,57	0,61	0,42	0,77	0,37	0,31	0,32	0,37	0,53	0,70	0,58
90	0,57	0,56	0,63	0,43	0,45	0,37	0,31	0,35	0,37	0,51	0,70	0,59
91	0,57	0,56	0,63	0,43	0,45	0,41	0,31	0,36	0,37	0,51	0,70	0,61
92	0,57	0,55	0,66	0,43	0,45	0,41	0,31	0,36	0,37	0,52	0,72	0,61
93	0,57	0,55	0,67	0,43	0,45	0,37	0,31	0,36	0,37	0,52	0,72	0,61
94	0,57	0,56	0,70	0,43	0,45	0,37	0,31	0,36	0,38	0,53	0,72	0,61
95	0,57	0,56	0,67	0,44	0,46	0,39	0,31	0,37	0,38	0,54	0,72	0,62

Tabelle A-10: Durchschnittliches Leistungsprofil (in [kW]) eines Pkw für den WTT5 differenziert nach Monaten in Szenario b)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,18	0,19	0,34	0,10	0,22	0,21	0,25	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
1	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,25	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
2	0,18	0,20	0,38	0,10	0,22	0,22	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
3	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
4	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
5	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
6	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
7	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
8	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
9	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,22	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
10	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,23	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
11	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
12	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
13	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
14	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
15	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,20	0,21	0,21	0,34
16	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,18	0,21	0,21	0,34
17	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,34
18	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,33	0,11	0,16	0,21	0,21	0,34
19	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,33	0,11	0,17	0,21	0,21	0,34
20	0,18	0,20	0,34	0,10	0,22	0,21	0,30	0,11	0,16	0,21	0,21	0,34
21	0,18	0,20	0,34	0,10	0,41	0,21	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,34
22	0,18	0,20	0,34	0,10	0,41	0,22	0,26	0,11	0,17	0,21	0,21	0,34
23	0,18	0,20	0,34	0,10	0,44	0,22	0,26	0,11	0,16	0,21	0,21	0,34
24	0,04	0,01	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
26	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
27	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,00	0,00	0,09	0,08	0,01	0,00
28	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,05	0,01	0,01
29	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,10	0,06	0,01
30	0,05	0,00	0,01	0,02	0,05	0,04	0,00	0,00	0,01	0,05	0,02	0,02
31	0,01	0,00	0,02	0,03	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	0,07	0,02	0,03
32	0,03	0,01	0,03	0,04	0,03	0,05	0,00	0,01	0,02	0,02	0,07	0,04
33	0,12	0,04	0,07	0,07	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03	0,10	0,05
34	0,03	0,05	0,08	0,12	0,04	0,04	0,06	0,01	0,02	0,05	0,09	0,07
35	0,03	0,05	0,07	0,12	0,03	0,04	0,07	0,01	0,03	0,07	0,15	0,05
36	0,08	0,05	0,05	0,13	0,04	0,05	0,02	0,04	0,02	0,09	0,08	0,18
37	0,05	0,07	0,04	0,12	0,04	0,05	0,02	0,04	0,09	0,05	0,07	0,04
38	0,05	0,06	0,05	0,14	0,06	0,06	0,06	0,30	0,09	0,06	0,28	0,05
39	0,06	0,07	0,06	0,13	0,06	0,06	0,08	0,31	0,03	0,11	0,20	0,13
40	0,06	0,10	0,09	0,18	0,06	0,05	0,08	0,04	0,04	0,10	0,18	0,06
41	0,06	0,13	0,13	0,19	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05	0,23	0,26	0,11
42	0,06	0,16	0,12	0,19	0,03	0,09	0,08	0,05	0,06	0,25	0,21	0,17
43	0,06	0,18	0,13	0,26	0,06	0,10	0,08	0,07	0,09	0,24	0,27	0,21
44	0,05	0,16	0,12	0,17	0,09	0,09	0,17	0,08	0,05	0,26	0,34	0,25
45	0,06	0,34	0,14	0,17	0,04	0,08	0,14	0,08	0,06	0,27	0,32	0,24
46	0,06	0,70	0,16	0,20	0,05	0,09	0,09	0,20	0,10	0,49	0,31	0,31
47	0,06	0,71	0,15	0,28	0,06	0,08	0,09	0,22	0,07	0,27	0,22	0,31
48	0,08	0,19	0,17	0,18	0,10	0,09	0,08	0,21	0,07	0,25	0,22	0,26

49	0,15	0,25	0,19	0,19	0,11	0,09	0,07	0,11	0,08	0,22	0,23	0,31
50	0,15	0,27	0,18	0,20	0,10	0,23	0,07	0,09	0,10	0,22	0,28	0,28
51	0,15	0,22	0,18	0,21	0,12	0,23	0,07	0,09	0,10	0,25	0,29	0,34
52	0,15	0,19	0,20	0,19	0,15	0,09	0,06	0,10	0,09	0,24	0,28	0,29
53	0,10	0,16	0,21	0,30	0,15	0,09	0,07	0,10	0,08	0,35	0,27	0,21
54	0,09	0,16	0,18	0,19	0,13	0,18	0,08	0,10	0,25	0,36	0,24	0,23
55	0,09	0,16	0,20	0,21	0,12	0,16	0,09	0,12	0,09	0,31	0,23	0,23
56	0,25	0,18	0,21	0,21	0,10	0,11	0,09	0,13	0,10	0,30	0,20	0,22
57	0,13	0,14	0,18	0,25	0,10	0,11	0,08	0,13	0,13	0,34	0,21	0,22
58	0,16	0,17	0,18	0,23	0,10	0,10	0,09	0,72	0,13	0,33	0,21	0,23
59	0,16	0,18	0,17	0,27	0,10	0,11	0,23	0,13	0,14	0,34	0,21	0,26
60	0,18	0,18	0,27	0,21	0,30	0,23	0,10	0,09	0,11	0,35	0,19	0,21
61	0,19	0,17	0,19	0,20	0,30	0,12	0,11	0,10	0,12	0,39	0,19	0,20
62	0,20	0,17	0,22	0,20	0,09	0,12	0,09	0,12	0,14	0,39	0,24	0,18
63	0,19	0,19	0,22	0,21	0,16	0,13	0,09	0,11	0,14	0,37	0,23	0,18
64	0,18	0,19	0,20	0,23	0,11	0,14	0,07	0,10	0,18	0,28	0,17	0,11
65	0,15	0,21	0,19	0,23	0,08	0,13	0,13	0,11	0,13	0,29	0,17	0,12
66	0,16	0,21	0,18	0,26	0,08	0,14	0,13	0,09	0,12	0,29	0,16	0,12
67	0,16	0,23	0,27	0,26	0,09	0,14	0,24	0,09	0,12	0,30	0,20	0,19
68	0,17	0,28	0,13	0,25	0,08	0,17	0,10	0,15	0,12	0,30	0,17	0,17
69	0,17	0,26	0,14	0,25	0,08	0,17	0,13	0,16	0,11	0,31	0,17	0,14
70	0,18	0,25	0,19	0,22	0,07	0,20	0,21	0,16	0,12	0,30	0,17	0,27
71	0,18	0,22	0,14	0,21	0,08	0,20	0,18	0,16	0,11	0,39	0,18	0,28
72	0,23	0,24	0,13	0,24	0,11	0,15	0,15	0,14	0,17	0,29	0,17	0,14
73	0,21	0,17	0,13	0,28	0,10	0,17	0,15	0,12	0,18	0,22	0,17	0,11
74	0,21	0,19	0,13	0,24	0,66	0,17	0,15	0,10	0,18	0,16	0,16	0,21
75	0,22	0,19	0,13	0,23	0,10	0,17	0,14	0,10	0,22	0,16	0,34	0,14
76	0,21	0,18	0,13	0,20	0,11	0,15	0,14	0,09	0,19	0,17	0,17	0,09
77	0,18	0,20	0,13	0,21	0,11	0,16	0,09	0,09	0,19	0,17	0,18	0,08
78	0,18	0,20	0,13	0,23	0,11	0,15	0,13	0,13	0,17	0,16	0,49	0,19
79	0,18	0,20	0,13	0,26	0,11	0,15	0,07	0,14	0,14	0,16	0,50	0,10
80	0,15	0,23	0,15	0,24	0,09	0,14	0,05	0,16	0,13	0,21	0,18	0,11
81	0,15	0,26	0,15	0,24	0,09	0,18	0,05	0,16	0,13	0,20	0,17	0,13
82	0,15	0,27	0,13	0,21	0,10	0,15	0,04	0,16	0,13	0,22	0,18	0,15
83	0,15	0,27	0,14	0,21	0,10	0,15	0,05	0,16	0,13	0,23	0,18	0,38
84	0,17	0,27	0,14	0,21	0,10	0,16	0,05	0,16	0,13	0,23	0,18	0,15
85	0,18	0,27	0,14	0,21	0,10	0,17	0,05	0,16	0,13	0,21	0,19	0,18
86	0,17	0,27	0,14	0,22	0,09	0,37	0,06	0,16	0,13	0,21	0,20	0,18
87	0,16	0,27	0,15	0,26	0,09	0,17	0,06	0,16	0,13	0,21	0,20	0,19
88	0,16	0,27	0,15	0,26	0,09	0,16	0,06	0,16	0,13	0,21	0,20	0,21
89	0,16	0,28	0,15	0,27	0,09	0,16	0,06	0,16	0,13	0,21	0,20	0,21
90	0,16	0,30	0,16	0,29	0,09	0,18	0,08	0,16	0,13	0,21	0,20	0,22
91	0,16	0,30	0,17	0,29	0,09	0,18	0,08	0,16	0,13	0,21	0,20	0,67
92	0,18	0,30	0,18	0,28	0,09	0,18	0,08	0,16	0,13	0,26	0,19	0,44
93	0,17	0,48	0,19	0,28	0,09	0,19	0,08	0,19	0,13	0,35	0,20	0,21
94	0,17	0,30	0,19	0,29	0,09	0,19	0,08	0,19	0,13	0,35	0,20	0,23
95	0,17	0,30	0,19	0,29	0,09	0,19	0,08	0,21	0,13	0,35	0,20	0,22

Tabelle A-11: Durchschnittliches Leistungsprofil (in [kW]) eines LNfz für den WTT2 differenziert nach Monaten in Szenario b)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,77	0,98	1,03	1,51	0,60	0,82	0,62	0,55	0,64	1,27	1,46	1,85
1	0,77	0,98	1,03	1,51	0,61	0,82	0,62	0,55	0,64	1,28	1,46	1,85
2	0,77	0,98	1,03	1,51	0,61	0,82	0,62	0,55	0,64	1,28	1,46	1,85
3	0,77	0,98	1,03	1,51	0,61	0,82	0,62	0,55	0,68	1,28	1,46	1,85
4	0,77	0,98	1,03	1,53	0,62	0,82	0,62	0,56	0,67	1,28	1,46	1,86
5	0,77	0,98	1,03	1,53	0,62	0,82	0,62	0,56	0,64	1,28	1,46	1,86
6	0,77	0,98	1,03	1,53	0,62	0,85	0,62	0,56	0,64	1,28	1,46	1,86
7	0,77	0,98	1,10	1,53	0,62	0,85	0,62	0,56	0,64	1,28	1,46	1,86
8	0,77	0,98	1,10	1,53	0,61	0,85	0,63	0,56	0,64	1,48	1,48	1,86
9	0,77	0,98	1,10	1,53	0,61	0,83	0,63	0,56	0,64	1,48	1,47	1,86
10	0,81	0,98	1,10	1,53	0,61	0,83	0,63	0,56	0,67	1,28	1,47	1,86
11	0,87	0,98	1,05	1,53	0,70	0,83	0,64	0,56	0,64	1,28	1,47	1,86
12	0,88	0,98	1,05	1,53	0,66	0,84	0,66	0,58	0,67	1,28	1,49	1,86
13	0,88	0,98	1,05	1,53	0,62	0,85	0,64	0,56	0,65	1,42	1,49	1,86
14	0,88	0,98	1,05	1,65	0,66	0,84	0,63	0,57	0,67	1,28	1,49	1,94
15	0,88	0,98	1,06	1,89	0,63	0,85	0,63	0,56	0,67	1,28	1,49	1,97
16	0,87	0,88	1,07	1,52	0,59	0,82	0,61	0,56	0,68	1,18	1,35	1,82
17	0,76	0,84	0,97	1,50	0,57	0,80	0,60	0,54	0,66	1,12	1,28	1,75
18	0,79	0,84	0,97	1,51	0,56	0,80	0,62	0,60	0,67	1,12	1,28	1,76
19	0,79	0,84	0,98	1,50	0,56	0,82	0,62	0,58	0,74	1,13	1,29	1,79
20	0,80	0,99	1,03	1,51	0,63	0,85	1,09	0,54	0,71	1,13	1,29	1,76
21	0,80	1,11	1,05	1,79	0,59	0,83	0,62	0,59	0,73	1,14	1,33	1,79
22	0,81	0,86	1,12	1,58	0,58	0,85	0,68	0,61	0,77	1,14	1,32	1,85
23	0,95	1,07	1,06	1,72	0,63	0,85	0,71	0,55	0,73	1,34	1,36	1,78
24	0,09	0,31	0,18	0,04	0,07	0,10	0,09	0,09	0,10	0,04	0,13	0,19
25	0,28	0,16	0,29	0,12	0,11	0,15	0,24	0,12	0,24	0,28	0,30	0,30
26	0,08	0,32	0,16	0,24	0,36	0,17	0,24	0,43	0,22	0,13	0,48	0,53
27	0,16	0,45	0,25	0,39	0,28	0,30	0,27	0,30	0,48	0,44	0,72	0,41
28	0,19	0,36	0,75	0,81	0,39	0,69	0,52	0,55	0,54	0,67	0,68	1,15
29	0,34	0,46	0,72	1,10	0,36	0,51	0,38	0,62	0,54	0,92	0,98	1,44
30	0,43	0,80	0,95	1,28	0,49	0,49	0,36	0,56	0,69	0,88	1,24	1,48
31	0,78	0,76	0,86	1,10	0,78	0,64	0,39	0,63	0,88	1,06	1,03	1,72
32	0,93	0,74	1,02	0,87	1,15	1,11	0,49	0,74	0,87	1,05	1,86	1,83
33	0,96	0,87	0,98	0,94	1,12	1,03	0,57	0,78	0,92	1,08	1,93	1,81
34	1,53	1,32	1,46	1,02	1,38	0,87	0,74	0,88	0,96	1,52	1,89	2,08
35	1,20	1,28	1,40	0,98	1,54	1,03	0,78	0,97	0,86	1,48	1,57	2,06
36	1,12	1,65	1,03	0,98	1,19	1,04	1,04	0,92	0,98	1,45	1,63	1,90
37	1,23	1,43	1,75	1,04	1,25	1,18	1,11	1,11	1,32	1,74	1,73	2,19
38	1,24	1,38	1,82	1,05	1,18	0,97	1,08	0,77	1,19	1,62	1,69	2,28
39	1,15	1,14	1,69	1,08	1,22	1,33	1,17	0,81	1,08	2,01	1,58	2,25
40	1,56	1,27	1,32	1,19	1,17	0,91	1,30	0,82	1,10	2,10	1,49	2,01
41	1,79	1,40	1,82	1,32	1,38	0,97	1,25	0,82	1,51	2,20	1,52	1,60
42	1,18	1,26	1,57	1,12	1,15	1,04	1,01	0,92	1,22	1,66	1,94	2,12
43	1,45	1,15	1,42	1,29	0,99	1,10	0,88	0,91	1,38	1,57	2,06	2,11
44	1,33	1,18	1,25	1,12	1,17	0,92	0,71	0,83	1,29	1,76	1,64	1,99
45	1,21	1,16	1,20	1,16	1,05	1,10	0,83	0,95	1,23	1,70	1,90	1,75
46	1,04	1,16	1,40	1,54	1,15	0,93	0,83	1,24	0,97	1,65	1,88	1,80
47	0,92	1,38	1,57	1,64	0,91	0,94	0,78	0,87	1,02	2,10	2,10	1,61
48	0,81	1,26	1,48	1,83	1,13	0,94	0,74	0,81	1,07	1,89	1,37	1,43

49	0,99	1,48	1,28	1,32	0,84	1,09	0,78	0,79	1,26	1,68	1,50	1,57
50	0,96	1,45	1,35	1,52	0,89	1,05	0,80	0,67	1,28	1,69	1,51	1,54
51	0,97	1,27	1,42	1,43	0,83	1,03	0,90	0,73	1,09	1,77	1,62	1,55
52	1,32	1,16	1,19	1,22	0,92	0,84	1,11	0,82	0,98	1,92	1,41	1,46
53	1,31	1,16	1,20	1,30	0,85	0,92	1,06	0,81	1,19	1,99	1,46	1,46
54	1,44	1,19	1,16	1,37	0,76	0,83	0,99	0,77	0,93	2,26	1,34	1,30
55	1,40	1,14	1,29	1,56	0,97	0,98	0,81	0,72	0,96	2,00	1,42	1,31
56	0,82	1,02	1,08	1,10	0,95	1,11	0,68	0,80	0,92	1,71	1,24	1,53
57	1,29	1,00	1,11	1,31	0,87	1,23	0,72	0,81	0,96	1,57	1,48	1,39
58	1,02	1,15	1,04	1,42	0,85	1,01	0,72	0,75	0,90	2,20	1,69	1,56
59	1,39	0,96	1,22	1,35	0,84	0,95	0,72	0,82	0,74	2,15	1,54	1,47
60	0,83	0,85	1,03	1,38	1,03	0,83	0,83	0,98	0,90	1,68	1,39	1,39
61	0,87	0,88	1,21	1,15	0,97	0,81	0,58	0,67	0,86	1,56	1,24	1,50
62	0,83	0,85	1,00	1,30	0,83	0,71	0,67	0,59	0,75	1,45	1,16	1,29
63	1,01	0,74	1,04	1,20	0,79	0,92	0,86	0,58	0,76	1,69	1,23	1,32
64	1,21	0,68	1,05	0,84	0,62	0,67	0,85	0,58	0,67	1,00	1,14	1,35
65	1,13	0,77	1,25	0,88	0,63	0,55	0,69	0,53	0,73	0,98	0,99	1,43
66	1,02	0,72	0,87	0,90	0,69	0,56	0,53	0,59	0,67	0,86	0,80	1,26
67	0,87	0,67	0,92	1,14	0,61	0,58	0,57	0,60	0,64	0,98	0,91	1,50
68	0,73	0,78	0,82	1,54	0,52	0,60	0,51	0,54	0,57	0,76	0,82	0,85
69	0,72	0,80	0,90	1,22	0,52	0,63	0,52	0,57	0,55	0,81	0,80	0,89
70	0,67	0,84	0,91	0,82	0,59	0,61	0,50	0,53	0,56	0,80	0,85	0,80
71	0,66	0,90	0,95	0,85	0,51	0,48	0,52	0,56	0,58	0,78	0,96	1,05
72	1,00	0,90	0,91	0,81	0,53	0,56	0,54	0,52	0,65	0,96	0,99	0,91
73	0,74	0,80	0,87	0,84	0,53	0,60	0,54	0,55	0,61	0,74	0,99	0,84
74	0,72	0,77	0,88	0,77	0,53	0,88	0,53	0,54	0,59	0,80	0,97	0,90
75	0,71	0,75	0,89	0,78	0,54	0,66	0,79	0,55	0,58	0,83	0,96	0,91
76	0,70	0,79	0,91	0,79	0,52	0,60	0,51	0,52	0,54	0,94	1,09	1,13
77	0,69	0,76	0,92	0,79	0,51	0,59	0,52	0,54	0,60	0,87	1,09	1,23
78	0,77	0,76	0,90	0,77	0,55	0,56	0,52	0,53	0,54	0,91	1,09	1,19
79	0,78	0,73	0,92	0,77	0,56	0,57	0,52	0,51	0,53	0,91	1,09	1,27
80	0,75	0,72	0,92	0,77	0,56	0,61	0,53	0,52	0,54	0,91	1,11	1,33
81	0,75	0,72	0,93	0,77	0,55	0,56	0,55	0,52	0,54	0,96	1,11	1,47
82	0,70	0,75	0,91	0,77	0,53	0,59	0,56	0,53	0,54	0,95	1,12	1,27
83	0,70	0,87	0,91	0,77	0,53	0,57	0,56	0,53	0,58	0,95	1,12	1,35
84	0,70	0,90	0,90	0,76	0,53	0,61	0,56	0,53	0,58	0,96	1,14	1,41
85	0,71	0,76	0,90	0,76	0,53	0,60	0,56	0,53	0,55	1,00	1,14	1,43
86	0,80	0,76	0,89	0,76	0,54	0,62	0,56	0,53	0,56	0,99	1,14	1,44
87	0,80	0,74	0,89	0,76	0,56	0,62	0,56	0,53	0,57	0,99	1,14	1,45
88	0,78	0,74	0,89	0,78	0,57	0,65	0,59	0,52	0,56	1,00	1,20	1,45
89	0,78	0,74	0,89	0,80	0,56	0,62	0,59	0,51	0,56	1,00	1,24	1,45
90	0,83	0,77	0,90	0,80	0,56	0,63	0,59	0,51	0,56	1,00	1,24	1,45
91	0,83	0,84	0,91	0,80	0,56	0,63	0,59	0,51	0,56	1,00	1,24	1,45
92	0,74	0,84	0,94	0,80	0,56	0,63	0,59	0,55	0,56	1,02	1,24	1,47
93	0,74	0,84	0,94	0,80	0,56	0,65	0,59	0,49	0,56	1,00	1,24	1,47
94	0,74	0,77	0,94	0,80	0,56	0,67	0,59	0,50	0,59	1,01	1,24	1,51
95	0,74	0,78	0,92	0,80	0,56	0,71	0,59	0,51	0,59	1,05	1,24	1,52

Tabelle A-12: Durchschnittliches Leistungsprofil (in [kW]) eines LNfzg für den WTT5 differenziert nach Monaten in Szenario b)

T	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	0,40	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,15	0,10	0,19	0,26
1	0,40	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,19	0,26
2	0,40	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
3	0,40	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
4	0,40	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
5	0,40	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
6	0,40	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
7	0,40	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
8	0,41	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
9	0,41	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
10	0,41	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
11	0,41	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
12	0,41	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
13	0,41	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,26
14	0,41	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,34
15	0,41	0,13	0,13	0,10	0,14	0,31	0,11	0,09	0,16	0,10	0,20	0,34
16	0,35	0,13	0,12	0,10	0,14	0,25	0,11	0,10	0,16	0,10	0,20	0,29
17	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,10	0,16	0,10	0,20	0,37
18	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,10	0,16	0,10	0,20	0,26
19	0,32	0,13	0,12	0,10	0,14	0,22	0,11	0,10	0,16	0,10	0,20	0,38
20	0,32	0,13	0,12	0,10	0,15	0,23	0,11	0,10	0,16	0,10	0,20	0,26
21	0,32	0,13	0,12	0,10	0,15	0,23	0,11	0,10	0,16	0,10	0,20	0,30
22	0,32	0,13	0,12	0,10	0,15	0,23	0,11	0,10	0,16	0,10	0,20	0,26
23	0,32	0,13	0,12	0,10	0,15	0,23	0,11	0,34	0,16	0,10	0,20	0,26
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,07	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
28	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
29	0,00	0,00	0,01	0,01	0,05	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02
30	0,00	0,01	0,02	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02
31	0,02	0,01	0,02	0,03	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
32	0,02	0,01	0,02	0,04	0,00	0,02	0,00	0,01	0,03	0,00	0,08	0,02
33	0,02	0,04	0,02	0,15	0,00	0,02	0,01	0,01	0,05	0,02	0,08	0,02
34	0,02	0,08	0,08	0,09	0,00	0,03	0,01	0,01	0,01	0,04	0,10	0,17
35	0,02	0,02	0,08	0,13	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,04	0,11	0,17
36	0,02	0,02	0,08	0,08	0,10	0,02	0,01	0,01	0,01	0,04	0,11	0,18
37	0,02	0,02	0,09	0,08	0,14	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,12	0,18
38	0,02	0,19	0,09	0,08	0,10	0,04	0,01	0,02	0,01	0,02	0,14	0,02
39	0,02	0,02	0,09	0,18	0,10	0,04	0,01	0,02	0,01	0,03	0,18	0,02
40	0,03	0,02	0,09	0,09	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,11	0,07
41	0,03	0,02	0,09	0,09	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,11	0,04
42	0,03	0,02	0,09	0,06	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,11	0,04
43	0,03	0,03	0,10	0,06	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01	0,48	0,11	0,08
44	0,03	0,02	0,09	0,05	0,04	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,14	0,04
45	0,03	0,04	0,09	0,06	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,15	0,04
46	0,03	0,04	0,14	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,11	0,08
47	0,03	0,47	0,09	0,14	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,11	0,08
48	0,03	0,04	0,09	0,14	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,11	0,08

49	0,03	0,04	0,09	0,14	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,12	0,08
50	0,04	0,04	0,09	0,04	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,12	0,08
51	0,04	0,03	0,09	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,12	0,08
52	0,04	0,02	0,09	0,03	0,03	0,04	0,01	0,01	0,03	0,02	0,12	0,15
53	0,04	0,02	0,09	0,03	0,03	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,11	0,15
54	0,04	0,02	0,09	0,06	0,12	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,09	0,20
55	0,05	0,02	0,09	0,06	0,12	0,05	0,01	0,01	0,02	0,02	0,23	0,20
56	0,05	0,03	0,09	0,06	0,12	0,05	0,01	0,01	0,02	0,02	0,29	0,11
57	0,05	0,03	0,09	0,16	0,12	0,05	0,01	0,01	0,02	0,02	0,18	0,11
58	0,05	0,03	0,05	0,20	0,03	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,18	0,19
59	0,05	0,03	0,05	0,06	0,03	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	0,18	0,30
60	0,05	0,03	0,06	0,05	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,15	0,04
61	0,07	0,03	0,08	0,05	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,13	0,07
62	0,07	0,03	0,06	0,07	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,09	0,10
63	0,07	0,03	0,06	0,07	0,04	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,36	0,05
64	0,05	0,02	0,06	0,08	0,02	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	0,10	0,04
65	0,05	0,02	0,06	0,21	0,03	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	0,11	0,11
66	0,04	0,03	0,08	0,15	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,01	0,12	0,04
67	0,05	0,03	0,08	0,15	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,01	0,12	0,04
68	0,04	0,03	0,07	0,16	0,03	0,06	0,02	0,01	0,01	0,06	0,13	0,05
69	0,04	0,03	0,06	0,17	0,03	0,06	0,02	0,02	0,01	0,06	0,13	0,06
70	0,04	0,02	0,06	0,17	0,04	0,07	0,02	0,02	0,01	0,02	0,13	0,06
71	0,04	0,02	0,06	0,17	0,04	0,16	0,02	0,01	0,01	0,02	0,12	0,09
72	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,17	0,02	0,01	0,01	0,02	0,12	0,11
73	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,11	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,11
74	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,14	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,10
75	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,11	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,06
76	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,11	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05
77	0,04	0,02	0,08	0,16	0,04	0,11	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05
78	0,04	0,02	0,09	0,16	0,04	0,11	0,03	0,01	0,01	0,02	0,05	0,06
79	0,04	0,09	0,09	0,16	0,04	0,11	0,03	0,01	0,01	0,02	0,05	0,06
80	0,04	0,09	0,09	0,16	0,04	0,11	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05	0,06
81	0,04	0,09	0,09	0,16	0,04	0,11	0,03	0,01	0,04	0,02	0,05	0,06
82	0,04	0,09	0,14	0,16	0,04	0,11	0,03	0,01	0,04	0,02	0,05	0,06
83	0,04	0,09	0,14	0,16	0,04	0,08	0,03	0,01	0,04	0,02	0,05	0,06
84	0,04	0,09	0,14	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,06
85	0,04	0,09	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,06
86	0,04	0,09	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,06
87	0,04	0,09	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,06
88	0,04	0,21	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
89	0,04	0,21	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
90	0,04	0,21	0,24	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
91	0,04	0,21	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
92	0,04	0,22	0,17	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
93	0,04	0,22	0,18	0,16	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
94	0,04	0,22	0,18	0,16	0,04	0,07	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07
95	0,04	0,23	0,18	0,16	0,04	0,09	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07

Anhang B: Abbildungen

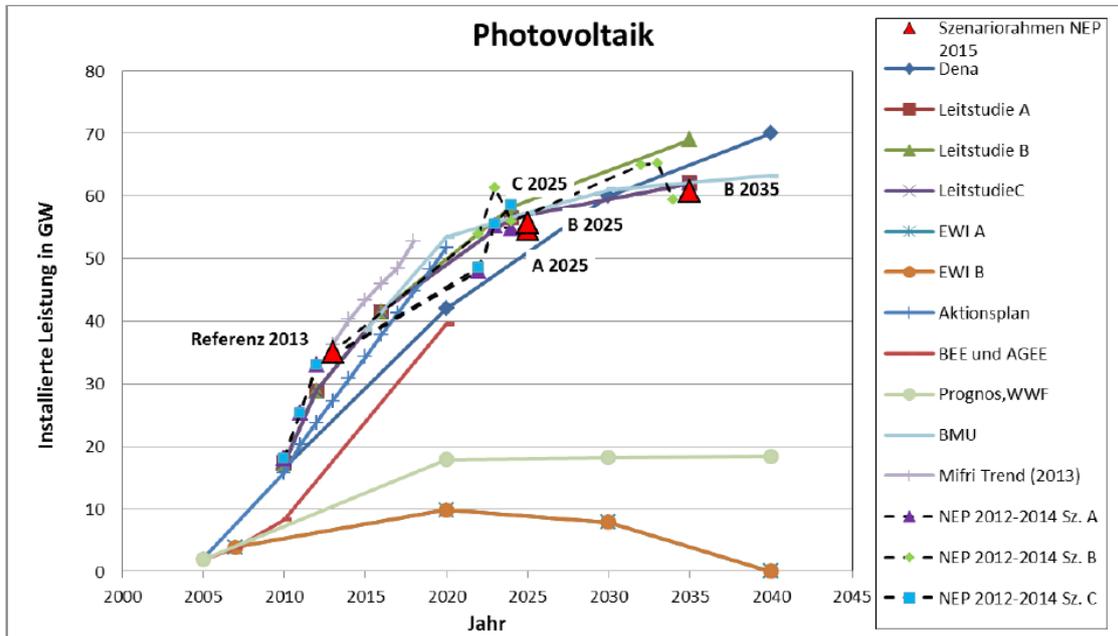


Abbildung B-1: Installierte Leistung für Photovoltaik im Vergleich (Quelle: [30])

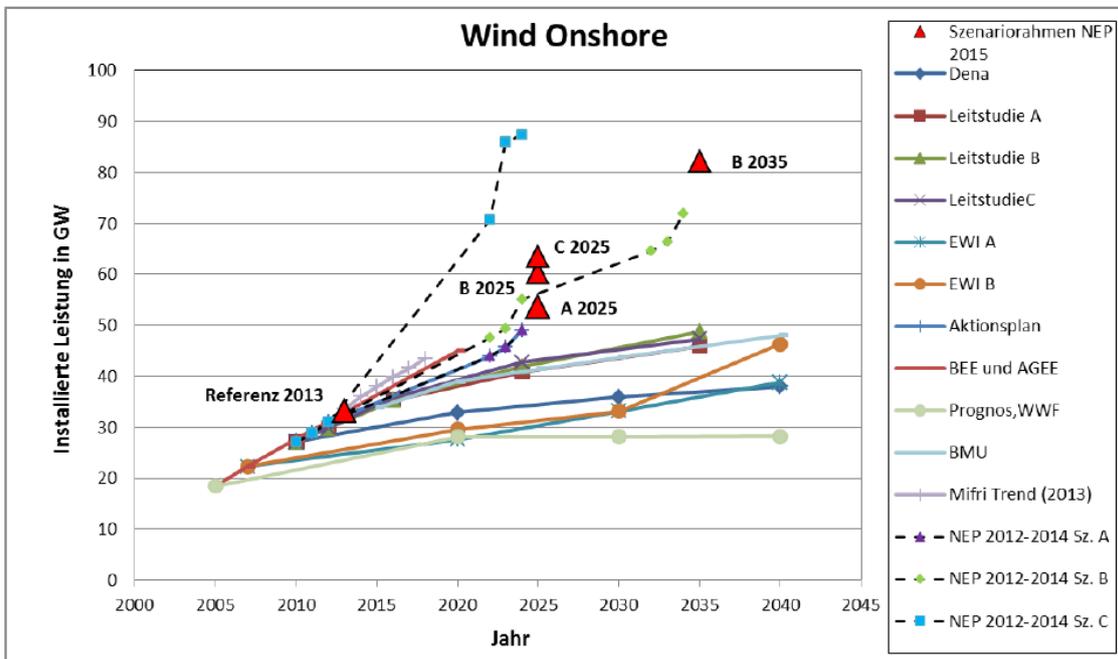


Abbildung B-2: Installierte Leistung für Wind onshore im Vergleich (Quelle: [30])

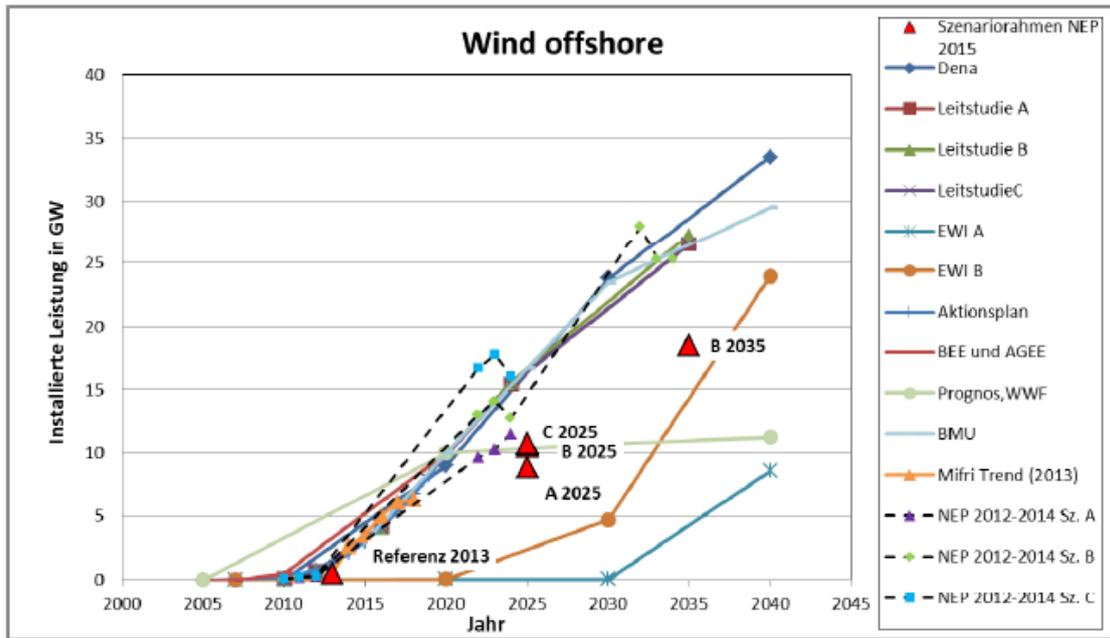


Abbildung B-3: Installierte Leistung für Wind offshore im Vergleich (Quelle: [30])

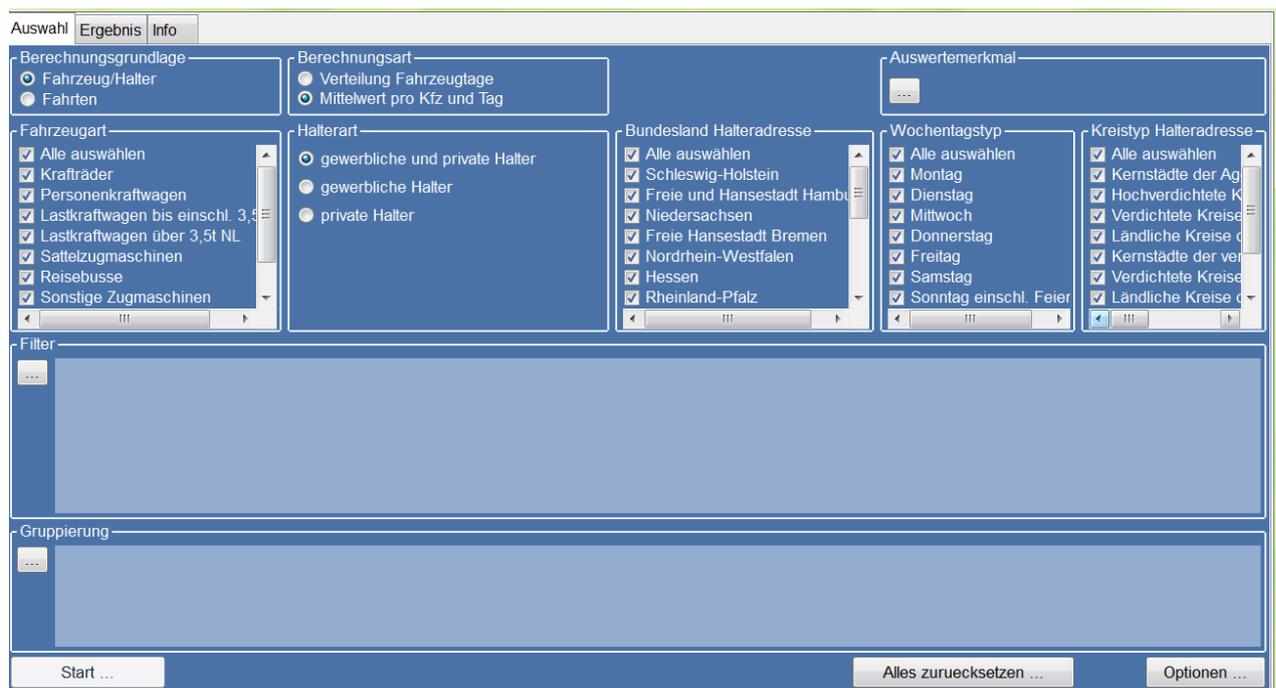


Abbildung B-4: Benutzeroberfläche KiT2010

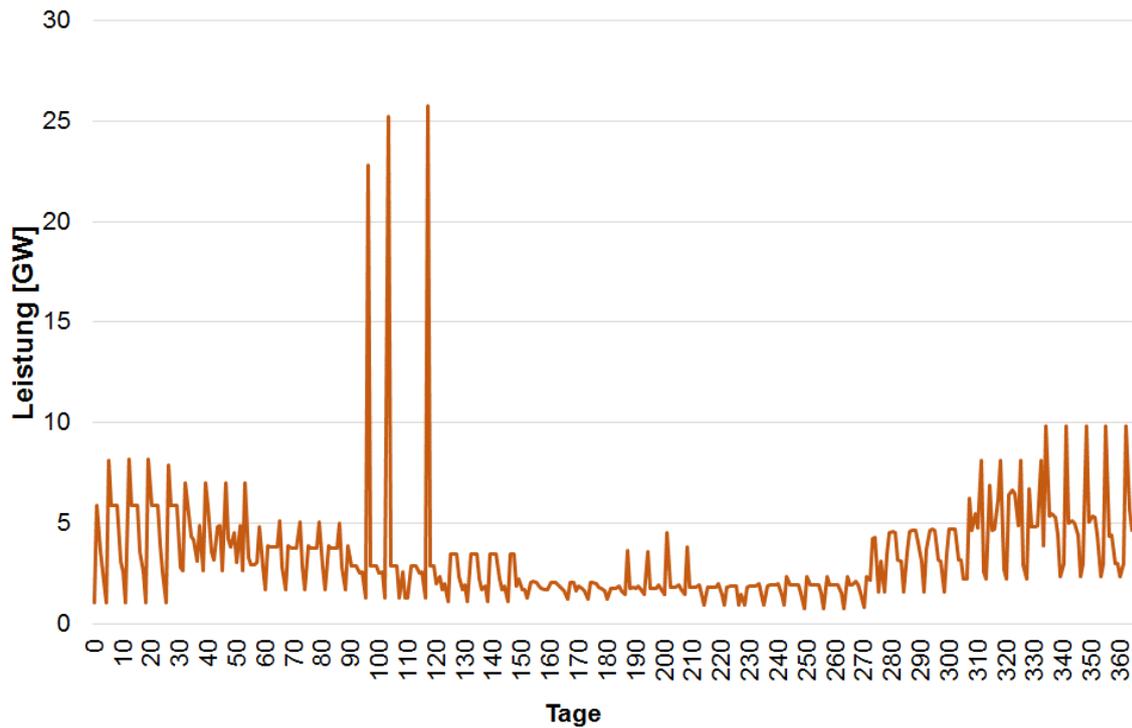


Abbildung B-5: Tägliche Lastspitzen des zusätzlichen Erzeugers bei einer Versorgung von Pkw mit PV-Energie im Jahr 2014

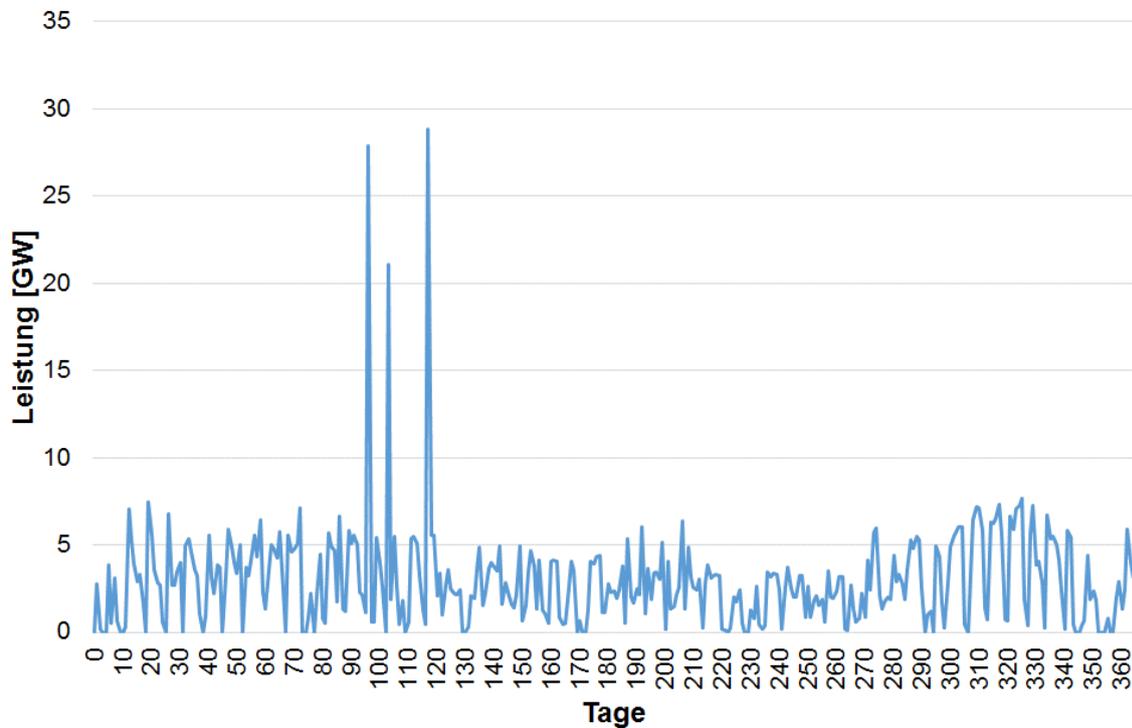


Abbildung B-6: Tägliche Lastspitzen des zusätzlichen Erzeugers bei einer Versorgung von Pkw mit Wind-Energie im Jahr 2014

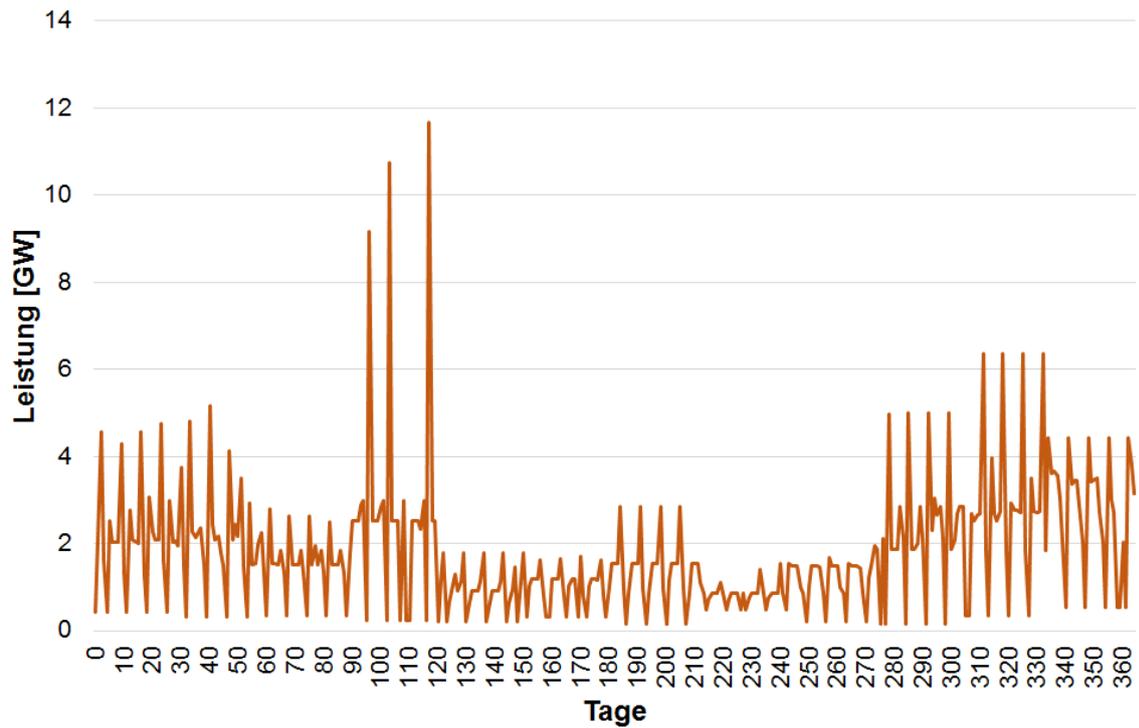


Abbildung B-7: Tägliche Lastspitzen des zusätzlichen Erzeugers bei einer Versorgung von LNfzg mit PV-Energie im Jahr 2014

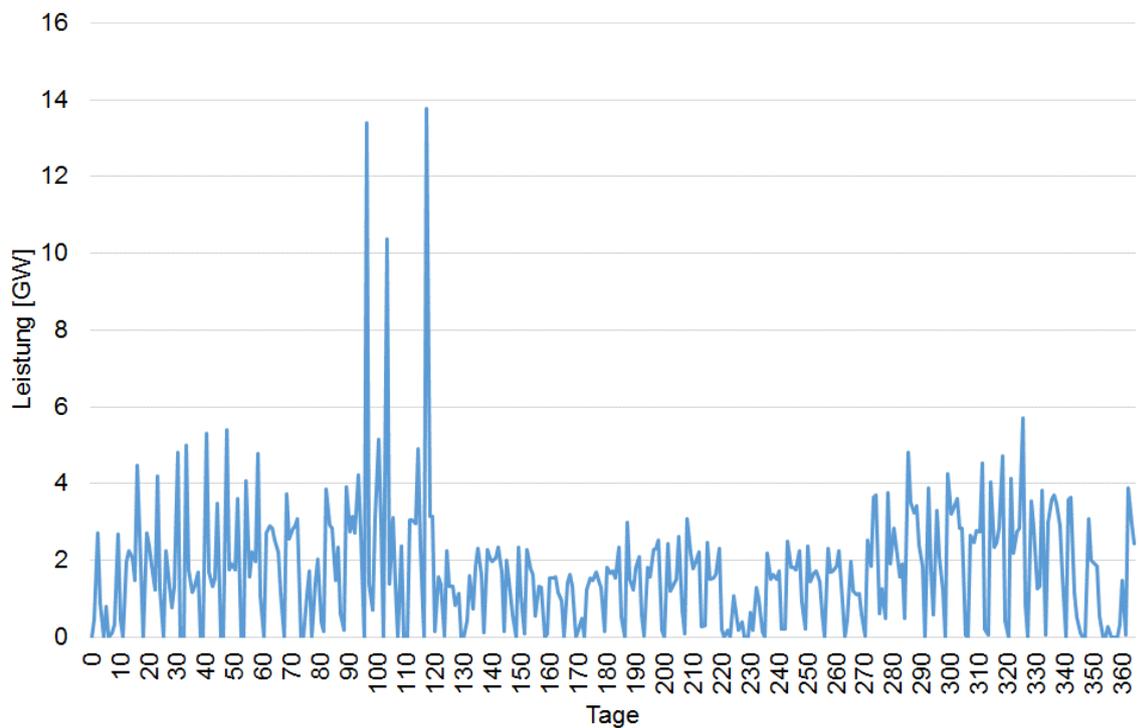


Abbildung B-8: Tägliche Lastspitzen des zusätzlichen Erzeugers bei einer Versorgung von LNfzg mit Wind-Energie im Jahr 2014

Anhang C: Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis

Während meiner Zeit als wissenschaftliche Angestellte sind im Rahmen dieser Arbeit folgende Projektgruppen und -seminare, Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten sowie Veröffentlichungen entstanden. Den beteiligten Studierenden gilt mein besonderer Dank.

Studentische Arbeiten

- [B1] Griwenka, B.; Hartmann, M.; Messing, R.; Schild, V.: Wirtschaftliche und ökologische Bilanz einer Elektrofahrzeugflotte unter Berücksichtigung der Integration von Erneuerbaren Energien, Projektgruppe, August 2012
- [B2] Ilieva, S.: Technische und wirtschaftliche Betrachtung von induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge, Studienarbeit, September 2013
- [B3] Sperling, U.: Auswirkungen von Nutzungsprofilen und Umgebungsbedingungen auf Stromverbrauch und Batterieverhalten bei Elektrofahrzeugen zur Implementierung in einem Wirtschaftlichkeitsmodell, Masterarbeit, Oktober 2013
- [B4] Mian, T.: Potentiale einer optimierten Ladung von E-Flotten zur Senkung der Energiebezugskosten, Bachelorarbeit, März 2014
- [B5] Loschkin, J.: Erstellung eines Prognosetools für Mini-Windanlagen, Bachelorarbeit, April 2014
- [B6] Farien, A.: Potentiale zur Senkung der Gesamtkosten von E-Flotten unter Berücksichtigung der Integration von erneuerbaren Energien, Studienarbeit Juli 2014
- [B7] Vorkoeper, A.: Potential von Elektrofahrzeugen des Wirtschaftsverkehrs zur Integration von erneuerbaren Energien, Projektseminar, November 2014
- [B8] Clute, N.: Erstellung eines Windgeschwindigkeitsmodells zur Anwendung bei Kleinwindenergieanlagen, Bachelorarbeit Dezember 2014
- [B9] Zimmer, M.: Gegenüberstellung verschiedener Steuerungsansätze für ein Management des Ladevorgangs einer Elektrofahrzeugflotte, Masterarbeit, März 2015

Veröffentlichungen und Vorträge

- [E1] Plota, E.; Bolczek, M.; Greve, S.; Wiedemann, T.; Rehtanz, C.: Business Models for Electric Vehicles, 2nd European Conference SmartGrids & E-Mobility, Brüssel, Oktober 2010
- [E2] Plota, E.; Horenkamp, W.; Rettberg, F.; Rehtanz, C.: Test Center for Interoperable Electromobility – Infrastructure and Grids, Batterietag NRW 2012, Münster
- [E3] Plota, E.; Rehtanz, C.: Wirtschaftliche Ladekonzepte von E-Flotten unter Berücksichtigung der Integration erneuerbarer Energien, VDE Kongress 2012 "Smart Grid - Intelligente Energieversorgung der Zukunft, Stuttgart
- [E4] Plota, E.; Rehtanz, C.: Untersuchung der Lastverschiebungspotentiale einer kommunalen Elektrofahrzeugflotte, VDE MINT AKADEMIE – Mobilität der Zukunft, München, Oktober 2013
- [E5] Plota, E.; Rehtanz, C.: Impact of controlled charging of an electrical vehicle fleet on business efficiency, 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cluj, Juli 2014
- [E6] Plota, E., Welge, C.: Vor-Ort-Nutzung erneuerbarer Energie in der batteriegestützten Elektromobilität am Beispiel des Projekts Metropol-E“, 10. Treffen der Expertengruppe H2-System des Netzwerks Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW, Energieagentur NRW, Düsseldorf, November 2014