

# Modellierung zeitlich aufgelöster Ladeenergienachfragen von batterie-elektrischen Fahrzeugen und deren Abbildung in einem Energiesystemmodell

Jochen Franz Linßen

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 457

ISBN 978-3-95806-395-2





Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung  
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3)

# **Modellierung zeitlich aufgelöster Lade- energienachfragen von batterie-elektrischen Fahrzeugen und deren Abbildung in einem Energiesystemmodell**

Jochen Franz Linßen

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 457

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-395-2



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

Herausgeber und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH  
Zentralbibliothek, Verlag  
52425 Jülich  
Tel.: +49 2461 61-5368  
Fax: +49 2461 61-6103  
[zb-publikation@fz-juelich.de](mailto:zb-publikation@fz-juelich.de)  
[www.fz-juelich.de/zb](http://www.fz-juelich.de/zb)

Umschlaggestaltung: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2019

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 457

D 83 Zugl.: Berlin, Technische Universität, Diss., 2018

ISSN 1866-1793  
ISBN 978-3-95806-395-2

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)  
unter [www.fz-juelich.de/zb/openaccess](http://www.fz-juelich.de/zb/openaccess).



This is an Open Access publication distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## Kurzfassung

Die Notwendigkeit des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung zusammen mit den derzeitigen Entwicklungen im Verkehr indizieren dringenden Handlungsbedarf und die Erstellung von Umsetzungsstrategien. Der Beitrag, den die Elektromobilität hin zu einem klimaneutralen und effizienten Verkehr zu leisten vermag, ist derzeit unklar. Das erschließbare Reduktionspotenzial wird entscheidend durch das Ladeverhalten der Fahrzeugnutzer bestimmt. Hierzu fehlen derzeit belastbare empirische Erfahrungswerte. Das Ladeverhalten wird zusätzlich zu technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wesentlich durch das Mobilitätsverhalten geprägt. Dieses ist durch Lebensstile und Soziodemografie bestimmt, die einem Wandel unterliegen können. Ziel dieser Arbeit ist daher, einen Modellansatz für das Ladeverhalten unter Berücksichtigung von Lebensstilen und Soziodemografie zu entwickeln, der eine fundierte Quantifizierung des Potenzials der Elektromobilität im Gesamtenergiesystem ermöglicht.

Ausgangspunkt der vorliegenden Forschungsarbeit ist eine Analyse des Status Quo der Elektromobilität bezüglich Fahrzeugkonzepte, Marktbedingungen, Nutzeranforderungen an die Ladeinfrastruktur und Mobilitätsverhalten. Darauf aufbauend werden ein Modellansatz und ein Data-Mining-Verfahren entwickelt, das die Bildung von nutzungshomogenen Gruppen und deren Zuordnung zu soziodemografischen Merkmalen von potenziellen Elektrofahrzeug-Nutzern ermöglicht. Gegenüber derzeitigen Ansätzen hat der im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte Ansatz den Vorteil, dass demografische Effekte und die Bildung von spezifischen Käuferschichten in der Modellierung der resultierenden Ladeleistung eines Elektrofahrzeugbestands berücksichtigt werden können.

Die ermittelten Tagesprofile des Ladeenergiebedarfs werden zusammenfassend dazu genutzt, Energieszenarien mit Berücksichtigung der Elektromobilität zu untersuchen. Hierzu wird ein bestehendes Bottom-Up-Modell verwendet, welches das Energieversorgungssystem sektorübergreifend abbildet. Die oft verwendete Kopplung der Elektromobilität mit Strommodellen greift dabei zu kurz, da variierende Ladeprofile die Emissionssituation in der Stromversorgung und damit auch das Kostenranking von Techniken und Maßnahmen in allen Sektoren beeinflussen. Die Analysen zeigen das hohe Potenzial der Elektromobilität für die Erfüllung von Klimaschutz- und Energieeinsparzielen im Verkehr. Weiterhin konnte der Einfluss von verschiedenen Zielregimen auf das Potenzial der Elektromobilität quantifiziert werden.

Weiterer Forschungsbedarf ist bei der Abbildung der generierten Ladebedarfsprofile in räumlich und zeitlich höher auflösenden Energiesystemmodellen und einer darauf aufbauenden Bewertung der Elektromobilität zu sehen. Zudem ist die Berücksichtigung neuer Mobilitätskonzepte wie zum Beispiel autonomes Fahren und Sharing-Konzepte bei der Bildung homogener Cluster bezüglich des Ladeverhaltens in den Blick zu nehmen.



## Executive Summary

The need for climate protection and resource conservation, in combination with current trends in transportation, requires urgent action and the implementation of viable strategies. Today the contribution of electric transportation towards a climate-neutral and efficient transport system is not clear, given that the reduction potentials are determined to a significant degree by the charging behavior of vehicle users. Thus far, sound empirical experiences of charging behavior has been lacking. The resulting energy demand from charging is not only characterized by technical and economic conditions, but also by user behavior. The mobility behavior is determined by lifestyles and socio-demographic aspects and their development over long periods. Therefore, the goal of this study is to develop a model approach that takes into account the lifestyles and socio demographic factors underpinning the charging behavior. This will provide a fact-based quantification of the effects achieved by electric vehicles in the total energy system.

The starting point of this research is an analysis of the status quo of electric vehicle concepts, market conditions, user requirements, charging infrastructure and mobility behavior. On the basis of that, a modeling approach for the charging demand of electric vehicles is developed. To allow for the socio-demographic mapping of mobility patterns, a data-mining method is developed to build homogeneous clusters of electric vehicle users. Compared to current models for charging profiles, this method has the advantage that demographic effects and the formation of specific groups of buyers can be taken into account.

In summary, the diurnal demand profiles for charging electric vehicles are used to analyze the impact and attainable effects of electric vehicles within the total energy system. On this, an existing bottom-up energy system model is adapted for the analysis across all sectors. The combination of charging load and power flow models is not sufficient, because varying charging profiles influence the emissions of the power sector and the cost ranking of techniques and measures in other sectors. The analyses show the high potential of electric vehicles to meet climate protection and energy saving targets. The significant impact of different target regimes in the scenarios on the application of electric vehicles could then be quantified.

To illuminate the impact of charging demand profiles on cost-optimized system designs, further research is needed using adapting models with higher spatial and temporal resolution. Furthermore, the impact of new mobility concepts such as, e.g., autonomous driving and sharing concepts, should be analyzed. The developed data-mining concept for clustering homogeneous user groups and the resulting charging profiles should also be applied to the possible change in mobility patterns.



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand berufsbegleitend zu meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Energie- und Klimaforschung des Forschungszentrums Jülich in den Institutsbereichen Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE) sowie Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3). Das hervorragende und sehr kollegiale Arbeitsumfeld des Instituts und des Forschungszentrums Jülich möchte ich an dieser Stelle ausdrücklich erwähnen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Volker Schindler, Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Kraftfahrzeuge der Technischen Universität Berlin, für die Bereitschaft, die Betreuung meiner Dissertation zu übernehmen sowie für die konstruktive, umfassende und ausdauernde Unterstützung in allen Belangen. Bei Herrn Prof. Jürgen-Friedrich Hake, Leiter des Institutsbereichs IEK-STE, und Herrn Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten, Leiter des Institutsbereichs IEK-3, möchte ich mich ganz besonders für die Unterstützung meines Promotionsvorhabens bedanken. Ohne diese Unterstützung und die gewährten Freiräume wäre die Erstellung meiner Dissertation sicher nicht möglich gewesen. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten bedanke ich mich zusätzlich sehr herzlich für die Übernahme der Zweitbetreuung und die Bereitschaft, als Gutachter für diese Arbeit zur Verfügung zu stehen. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich, Leiter des Fachgebiets „Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik“ an der Technischen Universität Berlin, für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Ich danke allen meinen Kolleginnen und Kollegen für die vielfältige Unterstützung während meiner Arbeit; sei es durch inhaltliche Diskussionen oder motivierende Worte. Insbesondere möchte ich namentlich meinen Kolleginnen Heidi Heinrichs und Dagmar Müller sowie meinen Kollegen Bastian Gillessen, Dr.-Ing. Thomas Grube, Wilfried Hennings, Dr.-Ing. Peter Markewitz und Dr.-Ing Martin Robinius danken.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meiner Frau, für die immer vorhandene Unterstützung, ohne die eine derartige Arbeit sicher nicht möglich gewesen wäre. Meinen beiden wundervollen Kindern sage ich an dieser Stelle: Ihr seid mein Antrieb!

### **Greatest Engineering Achievements of the 20<sup>th</sup> Century [National Research Council, 2003]**

- |                                       |                                 |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1 Electrification                     | 11 Highways                     |
| 2 Automobile                          | 12 Spacecraft                   |
| 3 Airplane                            | 13 Internet                     |
| 4 Water Supply and Distribution       | 14 Imaging                      |
| 5 Electronics                         | 15 Household Appliances         |
| 6 Radio and Television                | 16 Health Technologies          |
| 7 Agricultural Mechanization          | 17 Petroleum and Petrochemicals |
| 8 Computers                           | 18 Laser and Fiber Optics       |
| 9 Telephone                           | 19 Nuclear Technologies         |
| 10 Air Conditioning ... Refrigeration | 20 High-performance Materials   |

**Mein Statement: Kombiniere Errungenschaft 1 und 2 miteinander!**



## Inhaltsverzeichnis

<b>I. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>II. Zielsetzung, Aufbau und Abgrenzung der Arbeit .....</b>	<b>3</b>
<b>III. Status Quo der Elektromobilität .....</b>	<b>7</b>
<b>III.1 Antriebskonzepte .....</b>	<b>9</b>
<b>III.2 Traktionsbatterien .....</b>	<b>13</b>
III.2.1 Lithium-Ionen-Batterien .....	14
III.2.2 Lithium-Schwefel-Batterien .....	16
III.2.3 Lithium-Luft-Batterien .....	17
III.2.4 Kostentwicklung der Traktionsbatterien .....	17
<b>III.3 xEV-Neufahrzeugverkäufe und Bestände .....</b>	<b>19</b>
<b>III.4 Anreizsysteme.....</b>	<b>23</b>
<b>III.5 Nutzerperspektive der Elektromobilität .....</b>	<b>26</b>
<b>III.6 Ladeoptionen der xEV .....</b>	<b>30</b>
<b>III.7 Zusammenfassung Status Quo.....</b>	<b>39</b>
<b>IV. Analyse der Ist-Situation der privaten Pkw-Nutzung.....</b>	<b>41</b>
<b>IV.1 Beschreibung der Pkw-Mobilitätsstatistiken.....</b>	<b>43</b>
IV.1.1 Mobilität in Deutschland .....	43
IV.1.2 Kraftfahrzeuge in Deutschland .....	45
IV.1.3 Mobilitätspanel.....	46
IV.1.4 Fahrleistungserhebung .....	47
<b>IV.2 Datenerhebungen und deren Vergleich .....</b>	<b>48</b>
<b>IV.3 Zusammenfassung Mobilitätsstatistiken .....</b>	<b>49</b>
<b>V. Modellierung der Ladeleistung der Grundgesamtheit aller Nutzer .....</b>	<b>51</b>
<b>V.1 Eingrenzung des Analyserahmens.....</b>	<b>51</b>
<b>V.2 Modellansatz .....</b>	<b>53</b>
V.2.1 Aufbereitung der Daten .....	54
V.2.2 Modellbildung der Heimladung im Tagesgang.....	64
<b>V.3 Auswertung der Modellergebnisse zur Ladeleistung der Nutzergesamtheit .....</b>	<b>68</b>
<b>V.4 Vergleich der Ergebnisse mit der Mobilitätsstatistik aus dem Jahr 2002 .....</b>	<b>75</b>
<b>V.5 Diskussion des Modellansatzes und der Ergebnisse .....</b>	<b>78</b>
<b>VI. Modellierung der Ladeleistung von nutzungshomogenen Gruppen .....</b>	<b>81</b>
<b>VI.1 Vorüberlegungen zur Bildung nutzungshomogener Gruppen.....</b>	<b>83</b>
<b>VI.2 Modellansatz .....</b>	<b>85</b>
<b>VI.3 Beschreibung des entwickelten Data-Mining-Verfahrens.....</b>	<b>87</b>
VI.3.1 Parameterauswahl und Bestimmung der Ähnlichkeiten .....	87
VI.3.2 Auswahl des Fusionierungsalgorithmus .....	88
VI.3.3 Durchführung der Clusteranalyse und Bestimmung der Clusterzahl.....	91
VI.3.4 Interpretation der Cluster.....	96



<b>VI.4</b>	<b>Ladeverhalten in nutzungshomogenen Clustern und Szenarien .....</b>	<b>102</b>
VI.4.1	Szenario Demografie.....	104
VI.4.2	Szenario Käuferschicht.....	104
VI.4.3	Vergleich der Szenarien .....	105
<b>VI.5</b>	<b>Exkurs: Übertragbarkeit des Modellansatzes auf gewerbliche Nutzer .....</b>	<b>106</b>
<b>VI.6</b>	<b>Diskussion des Modellansatzes und der Ergebnisse .....</b>	<b>109</b>
<b>VII.</b>	<b><i>Szenarien zur Energieversorgung unter Berücksichtigung der Elektromobilität .....</i></b>	<b><i>113</i></b>
<b>VII.1</b>	<b>Beschreibung des verwendeten Energiesystemmodells .....</b>	<b>113</b>
<b>VII.2</b>	<b>Ausgangssituation im Verkehrs- und Energiesystem .....</b>	<b>116</b>
<b>VII.3</b>	<b>Wirtschaftliche und soziodemografische Rahmendaten .....</b>	<b>120</b>
<b>VII.4</b>	<b>Inputdaten der Fahrzeuge .....</b>	<b>121</b>
VII.4.1	Energiebedarfe und Fahrzeugkosten .....	122
VII.4.2	Modellierung der Ladeenergienachfrage im Energiesystemmodell .....	125
<b>VII.5</b>	<b>Szenario-Varianten.....</b>	<b>127</b>
<b>VII.6</b>	<b>Auswertung der Szenario-Rechnungen zum Energiesystem .....</b>	<b>129</b>
VII.6.1	Vergleich der Hauptszenarien.....	130
VII.6.2	Variation der Ladeprofile .....	137
<b>VII.7</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion der Energiesystemmodellierung .....</b>	<b>139</b>
<b>VIII.</b>	<b><i>Zusammenfassung und Ausblick .....</i></b>	<b><i>141</i></b>
<b>IX.</b>	<b><i>Abkürzungsverzeichnis .....</i></b>	<b><i>143</i></b>
<b>X.</b>	<b><i>Abbildungsverzeichnis.....</i></b>	<b><i>145</i></b>
<b>XI.</b>	<b><i>Tabellenverzeichnis .....</i></b>	<b><i>149</i></b>
<b>XII.</b>	<b><i>Literaturverzeichnis .....</i></b>	<b><i>151</i></b>
<b>XIII.</b>	<b><i>Anhang.....</i></b>	<b><i>162</i></b>
XIII.1	xEV Datenbank .....	162
XIII.2	Datensatzaufbereitung der MiD 2008 .....	166
XIII.3	Statistische Beschreibung der Nutzergesamt und Cluster .....	169
XIII.4	Ergebnisse der Clusteranalyse der gewerblichen Pkw und leichte Lkw .....	170
XIII.5	Techno-ökonomische Annahmen zu den Fahrzeugen und Ergebnistabellen der Energieszenario-Rechnungen.....	178
XIII.6	Ergebnis-Tabellen der Szenarien .....	181

## I. Einleitung

In hochindustrialisierten Ländern ist die Mobilität von Personen und Gütern eine wesentliche Grundlage für Wohlstand. Individuelle Mobilität sichert hierbei den Zugang des Einzelnen zu Arbeits-, Bildungs- und Freizeitaktivitäten und zählt daher zu den Grundbedürfnissen. Für die Wirtschaft ist der Transport von Gütern ein unverzichtbarer Bestandteil der Wertschöpfungsketten. Neben den gewünschten positiven Effekten des Verkehrs sind die negativen Auswirkungen auf das Klima, die Umwelt und die Gesundheit zu minimieren. Wichtiger Bestandteil einer zukunftsfähigen Energieversorgung ist daher die Bereitstellung von nachhaltigen Konzepten für den Verkehrsbereich.

Bisher beruhen sowohl der Straßenpersonenverkehr als auch der Straßengütertransport zu weiten Teilen auf dem Einsatz mineralölbasierter Primärenergieträger. Der Einsatz von Biokraftstoffen kann diese Abhängigkeit abmildern. Allerdings sind die Potenziale durch einen nachhaltigen Biomasse-Anbau beschränkt (vgl. z. B. [Funk, 2008]). Im Verkehrsbereich müssen daher Strategien entwickelt werden, die es ermöglichen, von der heutigen fossil geprägten Versorgungsstruktur hin zu einer Diversifikation der Primärenergieträgerbasis mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien zu gelangen. Eine breite Primärenergieträgerbasis bietet weiterhin das Potenzial, die geostrategische Versorgungssicherheit zu erhöhen. Dabei sind mögliche Synergieeffekte im gesamten Energiesystem zu nutzen. Sektoren-übergreifende Systemlösungen – insbesondere strukturelle Veränderungen, die durch die Energiewende in vielen Bereichen des Energiesystems angestoßen und vorangetrieben werden – gilt es auch für den Verkehrsbereich zu erschließen.

Die Integration erneuerbarer Energien über das begrenzte Maß der Biokraftstoffe hinaus kann durch die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom oder die indirekte Nutzung von durch Wasserelektrolyse gewonnenem Wasserstoff erreicht werden. Weitere Optionen bestehen darin, den Wasserstoff durch weitere Prozessschritte in einfache oder komplexere Kohlenwasserstoffe umzuwandeln. Die Herkunft des Kohlenstoffs im Kraftstoff entscheidet dabei über den Beitrag zum Klimaschutz.

Untrennbar mit der Kraftstoffstrategie verbunden ist auch die Betrachtung notwendiger Verteilungsinfrastrukturen. Nur bei einer hohen Verfügbarkeit und Flächendeckung wird man die Akzeptanz neuer Kraftstoffe positiv belegen können. Der Aufbau komplett neuer Infrastrukturen ist mit hohen Startinvestitionen verbunden, so dass eine evolutionäre Entwicklung aus bereits existierenden Infrastrukturen vorteilhaft ist. Für eine detaillierte Übersicht der Kraftstoffinfrastrukturen und Szenarien zu deren Entwicklung sei an dieser Stelle auf die weiterführenden Literaturstellen z. B. [Schindler, 1997], [Geitmann, 2010], [Kasten et al., 2016] [Robinius et al., 2018] verwiesen.

Im aktuellen Konzept der Energiewende setzt die Bundesregierung Eckpunkte für die Entwicklung der Energieversorgung in Deutschland für die nächsten Dekaden. Eckpfeiler des Konzeptes ist die Transformation der Stromerzeugung in Richtung erneuerbare Energien bei gleichzeitig signifikanten CO<sub>2</sub>-Einsparungen. Dies wird den Anteil an dargebotsabhängiger, fluktuierender Erzeugung deutlich erhöhen. Dieser Wechsel hin zu einer dezentralen Stromerzeugung fern von

Verbrauchsschwerpunkten macht einen Umbau des gesamten Stromversorgungssystems notwendig. Daraus ergeben sich neue Anforderungen für den Ausbaubedarf und die Betriebsführung der Erzeugung und der Transport- und Verteilnetze sowie die Verbrauchersteuerung. Der Stellenwert von steuerbaren Verbrauchern und Speicheroptionen wird deutlich steigen.

Die Elektromobilität bietet dabei die Möglichkeit der verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien im Verkehr, der Reduktion von klimaschädlichen Emissionen, der Reduktion von gesundheitsgefährdenden Emissionen sowie Lärm – insbesondere in Ballungsräumen – und der Erhöhung der Effizienz der gesamten Umwandlungskette. Zusätzlich kann über die mögliche Steuerung der Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen ein Lastverschiebepotenzial erschlossen werden (vgl. [Linssen et al., 2012]).

Die derzeit von potenziellen Käufern als zu gering empfundene Reichweite der Fahrzeuge, die höheren Kosten der Fahrzeuge und fehlende Erfahrungswerte der Nutzer<sup>1</sup> im täglichen Umgang mit Elektrofahrzeugen sowie der Ladung stellen deutliche Hemmnisse für eine schnelle Markteinführung dar. Die Evolution der Batterietechnik zu höheren Leistungs- und Energiedichten bei gleichzeitig fallenden Batteriekosten lässt mittelfristig den breiteren Einsatz von Elektrofahrzeugen möglich erscheinen.

Die Elektromobilität ist dabei als System mit vielen Wechselwirkungen zu weiteren Systemen zu verstehen. Diese Wechselwirkungen bestehen nicht nur zwischen technischen Systemen, sondern auch zu ökonomischen und gesellschaftlichen Systemen und sind sehr vielfältig und bidirektional, d. h. sowohl die Elektromobilität beeinflusst andere Systeme als auch umgekehrt. Da die Elektromobilität als Substitut für das bereits etablierte System der fossilen Kraftstoffe und der Nutzung von Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen gilt, wird sie sich zumindest anfänglich am derzeitigen Zustand wie z. B. Nutzung, Wertschöpfung oder Infrastruktur anfänglich orientieren müssen.

Die Transformation des heutigen Verkehrssystems hin zu einem nachhaltigen System wird nicht alleine durch neue Antriebstechniken und Energieträger gelingen. Es erfordert auch eine Mobilitätswende mit neuen Konzepten für den Personen- und Gütertransport. Städtebauliche und infrastrukturelle Maßnahmen müssen dabei Hand in Hand gehen mit einer Änderung des Mobilitätsverhaltens in Gesellschaft und Wirtschaft (vgl. [Hochfeld et al., 2017]).

Das System Elektromobilität ist derzeit Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Da aktuell noch wenige Erfahrungswerte zur Elektromobilität existieren, werden technische, ökonomische und sozialwissenschaftliche Modelle entwickelt und anhand von Szenarien zukünftige mögliche Entwicklungen des Energiesystems unter Berücksichtigung der komplexen Wechselwirkungen analysiert. Ziel ist es, zu einem frühen Zeitpunkt Risiken und Chancen des Systems Elektromobilität abschätzen bzw. einordnen zu können.

---

<sup>1</sup> Hinweis: Aus Gründen der Lesbarkeit wird hier und weiter im Buch die maskuline Form verwendet. Sie ist nur als grammatikalisches Geschlecht zu verstehen und schließt weibliche Personen mit ein, z. B. „Nutzerinnen“.

## II. Zielsetzung, Aufbau und Abgrenzung der Arbeit

Die Elektromobilität steht derzeit an der Schwelle zur Marktpenetration in einigen großen Fahrzeugmärkten wie z. B. EU, USA und China. Sie wird als neuer Bestandteil des Energiesystems Auswirkungen auf dessen zukünftige Ausgestaltung haben. Die Analyse dieser Auswirkungen steht im Vordergrund der hier vorgestellten Studie. Bedingt durch fehlende Erfahrungswerte bezüglich des Ladeenergiebedarfs insbesondere im Tagesgang besteht derzeit eine Lücke bei der Abbildung der Elektromobilität als neuen Bestandteil des Energiesystems. Diese soll mit den hier vorgestellten Modellansätzen geschlossen werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Modellen und Verfahren, welche die Beurteilung des Ladeverhaltens unter Berücksichtigung von Lebensstilen und Soziodemografie ermöglichen. Darauf aufbauend erfolgt eine Quantifizierung des Beitrags der Elektromobilität zu Strategien des Klimaschutzes und der Energieeffizienz.

Die Modellierung von Ladebedarfsprofilen setzt eine Analyse des Status Quo der Elektromobilität bezüglich Fahrzeugkonzepte, Marktbedingungen, Nutzeranforderungen an die Ladeinfrastruktur und Mobilitätsverhalten voraus (Kapitel III und Kapitel IV). Darauf aufbauend wird in Kapitel V ein Modell entwickelt, welches die Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen nachbildet und die Generierung von Tagesprofilen der Ladeenergienachfrage am nächtlichen Stellplatz ermöglicht.

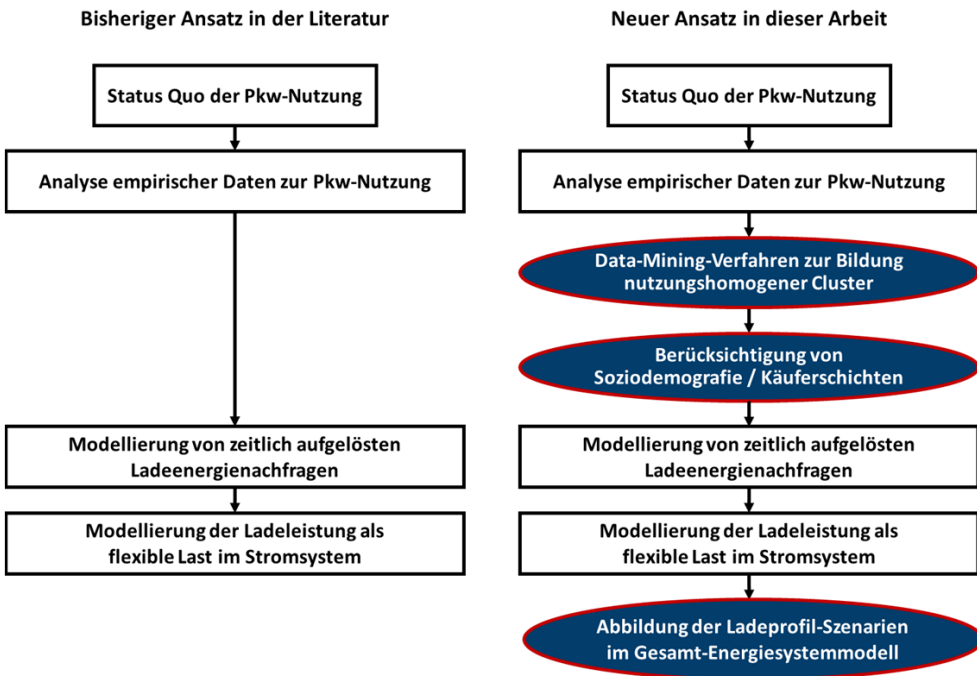
Der in Kapitel VI vorgestellte Ansatz zur Bildung von nutzungshomogenen Gruppen und deren Zuordnung zu soziodemografischen, haushaltstypischen und sonstigen Merkmalen soll eine Berücksichtigung der Zusammensetzung von potenziellen xEV-Nutzern ermöglichen. Dieser Ansatz beruht auf der Entwicklung eines Data-Mining-Verfahrens zur Aufteilung potenzieller Elektrofahrzeug-Nutzer in nutzungshomogene Cluster mit ähnlichem Mobilitätsverhalten.

Die Erkenntnisse und Modelle werden abschließend in einem Energiesystemmodell zusammengeführt, um eine konsistente Abbildung der Elektromobilität als Teil des gesamten Energiesystems zu ermöglichen (Kapitel VII). Der aus dem Nutzerverhalten resultierende Tagesgang der Ladeenergie spielt dabei für die Abbildung der Elektromobilität im Gesamtenergiesystem eine wichtige Rolle. Die entwickelten Modelle zur Abbildung des Ladebedarfs von Elektrofahrzeugen werden daher mit einem bestehenden Energiesystemmodell gekoppelt, um die Auswirkungen der Ladevorgänge auf das gesamte Energiesystem zu untersuchen. Dadurch kann die Rolle der Elektromobilität als Bestandteil von kostenoptimalen CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategien im Gesamtsystem bewertet werden.

Die Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zu bereits bestehenden Modellen des Ladeverhaltens besteht in der Berücksichtigung von nutzungshomogenen Clustern für die Modellierung der Ladeenergieprofile. Zur Clusterung von potenziellen xEV-Nutzern wird erstmalig ein Data-Mining-Verfahren speziell für die Bildung von signifikanten Tagesprofilen für die Ladung am nächtlichen Stellplatz entwickelt. Daraus entsteht die Option, soziodemografische Effekte und die Käuferschichtbildung mit in die Analysen einzubeziehen. Die Kopplung des Ansatzes mit einem Energiesystemmodell ermöglicht es, Elektromobilität als Bestandteil des Gesamtenergieteils

systems zu verstehen und zu bewerten. Es sollen explizit auch Rückwirkungen auf andere Sektoren untersucht werden. Dies ist als weitere Neuerung zur oft verwendeten Kopplung der Elektromobilität mit Strommodellen zu sehen. Variierende Ladeprofile können die Emissionssituation in der Stromversorgung beeinflussen und damit auch das Kostenranking von Techniken und Maßnahmen in allen Sektoren verändern. Abbildung II-1 stellt die Vorgehensweise der Arbeit dar und vergleicht diese mit bereits erfolgten Modellierungen von Ladevorgängen.

**Abbildung II-1: Vorgehensweise und Abgrenzung der Arbeit**



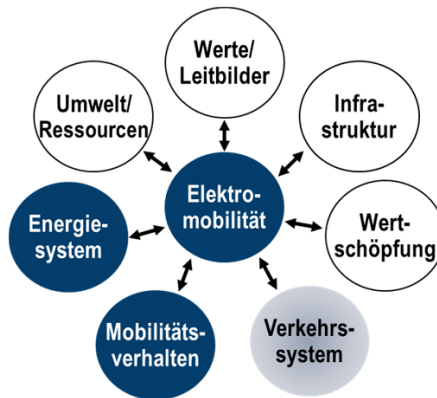
Quelle: Eigene Darstellung

Der Analyseschwerpunkt liegt auf der Berücksichtigung der Elektromobilität als Bestandteil zukünftiger Szenarien für das Energiesystem in Deutschland. Die Untersuchung unternimmt dabei keine detaillierten Strommarktmodellierungen oder Netzberechnungen, da dies bereits Bestandteil einiger Studien zur energiewirtschaftlichen Betrachtung der Elektromobilität ist. Weiterhin werden keine regional aufgelösten Untersuchungen oder Mikro-Analysen (z. B. einzelne Straßenzüge oder konkrete Verteilnetze) vorgenommen, sondern es wird ein Ein-Knoten-Energiesystemmodell für die Fragestellung dieser Forschungsarbeit adaptiert.

Die thematische Abgrenzung wird anhand eines Systembilds zur Elektromobilität konkretisiert (Abbildung II-2). Die Analyse konzentriert sich auf die Bereiche Mobilitätsverhalten und bewertende Energiesystemanalyse. Zudem werden der Personentransport mit Pkw und der Gütertransport mit Lkw als Bestandteile des Verkehrssystems detailliert untersucht. Die weiteren Systemzusammenhänge werden im Rahmen der Arbeit nicht vertieft. Das Hauptaugenmerk

der Forschungsarbeit ist auf den privaten Pkw-Verkehr gerichtet, der als langfristig wichtiger und großer Markt angesehen wird. Eine Übertragbarkeit des entwickelten Data-Mining-Verfahrens auf die gewerbliche Nutzung von Pkw und leichten Lkw wird in einem gesonderten Exkurs behandelt.

### Abbildung II-2: Elektromobilität als System und Abgrenzung der Arbeit



Quelle: Eigene Darstellung

Die vorliegende Forschungsarbeit umfasst die Fachgebiete Fahrzeugtechnik, Nutzerverhalten, Data-Mining, Verkehrswesen und bewertende Energiesystemanalyse. Der Charakter der Analyse entspricht einer interdisziplinären Betrachtungsweise. Da bereits einige Studien zur Abbildung des Ladeenergiebedarfs im Tagesgang und der Integration in das Energiesystem existieren, wird im Folgenden die Abgrenzung zur vorliegenden Forschungsarbeit konkretisiert.

Die Analyse von [Link, 2011] befasst sich mit der lokalen Optimierung von Ladevorgängen in dezentralen, erneuerbare Stromerzeugungssystemen. Es werden Ladeprofile auf Basis des Mobilitätsverhaltens gebildet und Möglichkeiten der Ladesteuerung analysiert. Eine Analyse im Kontext des gesamten Energiesystems erfolgt nicht.

Die Analyse [Heinrichs, 2013] untersucht die langfristigen Auswirkungen von Elektromobilität auf das europäische Stromversorgungssystem. Die Elektromobilität wird hierbei durch Tagesgänge der Ladeenergienachfrage abgebildet und in einem europäischen Modell zur Stromversorgung abgebildet. Zudem werden Szenariorechnungen durchgeführt. [Trost, 2016] analysiert mit einer modellgestützten Szenarioanalyse die Marktdiffusion alternativer Fahrzeugantriebe und deren Auswirkungen auf die Stromversorgung. Die Ladelastprofile werden durch eine stochastische Modellierung basierend auf Mobilitätsdaten generiert. [Dallinger, 2012] entwickelt ein stochastisches Modell zur Ladeleistungsnachfrage von Plug-In-Hybriden unter Berücksichtigung von Käuferschichten. Weiterhin findet eine Integration in ein Strommarktmodell zur Bewertung von Flexibilitäten und Steuerungsoptionen statt. Die Analyse von [Stöckl, 2014] modelliert die Ladeleistung von Elektrofahrzeugen ebenfalls auf Basis von Mobilitätsstatistiken und untersucht die Auswirkung auf die Netzbelastung. Der Unterschied der

vorgenannten Studien zur hier vorgestellten Untersuchung liegt in der Modellierung der Ladelastprofile in nutzungshomogenen Gruppen und der Kopplung mit einem für die Fragestellung angepassten Ein-Knoten-Energiesystemmodell.

Eine weitere Abgrenzung ist zu mikroskopischen Modellen zu sehen. Diese bilden Individuen oder Akteure ab und modellieren über stochastische Ansätze eine Grundgesamtheit an Nutzern. In [Arndt et al., 2016] erfolgt dieser Ansatz durch Anwendung von Markov-Ketten, bei [Soares et al., 2016] durch eine Monte-Carlo-Simulation. Zudem zu unterscheiden sind Bottom-Up-Ansätze basierend auf gemessenen Daten und probabilistischen Analysen z. B. in [Wieland et al., 2015], welche die Grundgesamtheit von Nutzer simulieren.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der hier gewählte makroskopische Ansatz aus der Beobachtung des derzeitigen Nutzerverhaltens und die Clusterung von nutzungshomogenen Gruppen bisher so noch nicht untersucht worden sind. Die Clusterung der Nutzer eröffnet die Möglichkeit, geänderte Ladeverläufe durch den Einfluss soziodemografischer Trends oder die Spezialisierung von Käuferschichten in einem Energiesystemmodell abzubilden. Dieses Vorgehen erlaubt eine Analyse des Einflusses unterschiedlicher Ladeverläufe auf das Energiesystem und die Bewertung des Stellenwerts der Elektromobilität in kostenoptimalen CO<sub>2</sub>-Vermeidungsstrategien.

Die folgenden Veröffentlichungen sind bereits erschienen und ergänzend zur vorliegenden Forschungsarbeit zu sehen. Teile der vorliegenden Forschungsarbeit bauen auf diesen bereits veröffentlichten Ergebnissen auf.

- Heinrichs, H. U., Linssen, J., Gillessen, B. (2017) „Climate policy beyond the European emissions trading system: Spotlight on the transport sector in Germany“. IEEE proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on the European Energy Market (EEM).
- Linssen, J., Gillessen, B., Heinrichs, H., Hennings, W. (2017) Electrification of commercial road transport – Attainable effects and impacts on national energy supply systems. Energy Procedia 105C (2017) pp. 2245-2252
- Arndt, W.-H.; Döge, N.; Marker, S., Linssen, J. (2016) Elektrifizierungspotential kommerzieller Kraftfahrzeug-Flotten im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource in städtischen Verteilnetzen. Universitätsverlag der TU Berlin. ISBN 978-3-7983-2801-3
- Hennings, W., Mischinger, S., Linssen, J. (2013) Utilization of excess wind power in electric vehicles. Energy policy, 62, 139 - 144.
- Linssen, J., Danzer, M., Marker, S., Maas, H., Strunz, K. & Weinmann, O. (2013) Netzintegration von Elektrofahrzeugen und deren Auswirkungen auf die Energieversorgung. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 2013-1/2, 121-124.
- Linssen, J., et al. (2012) Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen – Advances in Systems Analyses 1, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Band/Volume 150, ISBN 978-3-89336-811-2.

### III. Status Quo der Elektromobilität

Der Begriff Elektromobilität umfasst grundsätzlich alle Fortbewegungsmittel, die mit einem Elektromotor angetrieben werden. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff „Elektrofahrzeug“ (Electric Vehicle, EV) auf Straßenfahrzeuge und weiter auf Pkw und leichte Lkw (< 3,5 t zulässigen Gesamtgewicht, zGG) fokussiert.

Das Konzept der Antriebstrang-Hybridisierung – ohne Option der netzgekoppelten Ladung der Batterie (Hybrid Electric Vehicle: HEV) – ermöglicht die situationsabhängige Verteilung der Energieflüsse auf zwei verschiedene Antriebssysteme, die bei geeigneter Steuerung erhebliche Energieeinsparungen ermöglicht. Zusätzlich kann das Potenzial der Bremsenergieerückgewinnung weitgehend erschlossen werden. Bedingt durch die Fokussierung der Arbeit auf die Ladeenergie nachfrage von Elektrofahrzeugen aus dem Netz wird diese Antriebsvariante nicht weiter betrachtet. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das HEV-Antriebskonzept einen sehr wichtigen Baustein hin zu mehr Energieeffizienz bei der Verwendung von fossilen Kraftstoffen darstellt.

Rein batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle: BEV) und Plug-In-Hybride (Plug-in Hybrid Electric Vehicle: PHEV) ermöglichen eine lokal emissionsfreie Mobilität, die insbesondere in städtischen Gebieten eine deutliche Entlastung bringen kann. Die Elektromobilität gilt derzeit als eine Systemalternative für einen klimaschonenden, emissionsarmen und effizienten Verkehr [Hochfeld et al., 2017]. Das im Rahmen der Energiewende gesetzte Ziel zur Endenergieeinsparung im Verkehrsbereich von -40 % bis 2050 im Vergleich zu 2005 [BMW, 2016b] wird ohne eine Teil-Elektrifizierung des Personen- und auch des Güter-Straßenverkehrs nicht erreichbar sein.

Wesentliches Merkmal von BEV und PHEV (zusammengefasst nachfolgend als xEV bezeichnet) ist, dass die für den Antrieb notwendige elektrische Energie durch eine Traktionsbatterie (Unterscheidung zur Bordnetzatterie) mobil bereitgestellt wird. Während der Stillstandzeiten des Fahrzeuges wird die Traktionsbatterie mit elektrischer Energie aus dem Netz versorgt. Unterstützt werden kann der elektrische Antrieb durch eine Verbrennungskraftmaschine oder eine andere Wandlungseinheit, die aus chemischen Energieträgern elektrische Energie an Bord bereitstellt. Die leistungselektronische Ansteuerung des Elektromotors macht einen Generatorbetrieb ohne zusätzliche Komponenten möglich. Dies ermöglicht die Rückgewinnung von Bremsenergie und erhöht die Effizienz und die elektrische Reichweite (Rekuperation).

Die Vorteile des elektrischen Antriebsmotors und der mobilen Bereitstellung von elektrischer Energie durch die Batteriespeicher sind die hohen Umwandlungswirkungsgrade. Die gesamte Wirkungsgradkette im Fahrzeug vom Kraftstoff hin zur Antriebsenergie ist herkömmlichen Verbrennungskraftmaschinen (VKM) deutlich überlegen. Für einen ausführlichen Vergleich verschiedener Antriebskonzepte und deren Energiewandlungsketten Well-to-Wheel (WtW, Primärenergiegewinnung bis zur mechanischen Energie am Rad,) sei an dieser Stelle auf die europäische Studie [Edwards et al., 2014] verwiesen. Für die WtW-Effizienz der Elektromobilität sind eine effiziente Stromerzeugung sowie ein verlustarmer Stromtransport bzw. -verteilung wichtig.



Ein weiterer Vorteil der EV im Vergleich zum Benzin- oder Dieselantrieb ist der deutlich einfachere mechanische Aufbau des Antriebsstrangs. Es wird daher davon ausgegangen, dass der elektrische Antrieb weniger wartungs- und betriebskostenintensiv ist. Zu diesem Fakt trägt auch bei, dass bedingt durch das verfügbare hohe Drehmoment des Elektromotors in einem großen Drehzahlbereich auf schaltbare Übersetzungen verzichtet werden kann. Die derzeit ausschließlich eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien sind ebenfalls wartungsfrei, unterliegen aber kalendarischen und zyklischen Alterungsvorgängen.

Der Elektromotor gilt als technisch ausgereift, robust und kostengünstig. Durch die Steuerungsmöglichkeiten der Leistungselektronik lassen sich die Betriebspunkte der elektrischen Maschine sehr flexibel einstellen. Außerdem zeichnet er sich durch ein im Vergleich zum Verbrennungsmotor hohes spezifisches Leistungsgewicht und -volumen aus. Dies ermöglicht kompakte Bauweisen und höhere Freiheitsgrade bei der Positionierung des Antriebs.

Zentrale Baugruppe der xEV ist die Traktionsbatterie. Trotz einer Weiterentwicklung in den letzten Jahren sind das hohe Gewicht und große Bauvolumina sowie die hohen Kosten der Batterien immer noch wesentliche Hemmnisse für eine breitere Marktpenetration. Die vom Kunden gewünschte maximale Reichweite bestimmt bei gegebenem Fahrzeugkonzept die Größe und insbesondere die Kosten der Batterie. Als Batterietechnik hat sich die Li-Ionen-Technik gegen alle anderen technisch ausgereiften Batterietechniken durchgesetzt. Alle bis Ende 2016 angebotenen xEV sind mit dieser Zellchemie ausgerüstet (vgl. Anhang A).

Batterieelektrische Fahrzeuge sind lokal emissionsfrei. Das System tauscht keine Stoffe mit der Umgebung aus (z. B. Luftsauerstoff oder Emissionen). Weiterhin ist die Emission von Lärm in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen deutlich gemindert. Bei höheren Geschwindigkeiten überwiegen dagegen Abrollgeräusche der Reifen und Geräusche der Luftverwirbelungen. Beide Aspekte zusammen genommen sind insbesondere wichtig für eine Entlastung von urbanen Räumen.

Die Kundenanforderungen an xEV leiten sich aus den derzeitigen Erfahrungswerten mit konventionellen Pkw ab. Da Elektrofahrzeuge ein Substitutionsprodukt für konventionelle Fahrzeuge sind, müssen diese derzeitige Kundenanforderungen erfüllen oder übertreffen. Wichtige derzeitige Kundenanforderungen an privat genutzte Pkw sind in Anlehnung an [Troost, 2016]:

- Anschaffungspreis,
- fixe und variable Unterhaltskosten,
- Qualität und Wertstabilität,
- Energiebedarf,
- Image,
- Umweltverträglichkeit,
- Design,
- Fahrdynamik,
- Komfort,
- Sicherheit und
- Alltagstauglichkeit.

Die Kundendefinition von Alltagstauglichkeit orientiert sich ebenfalls an den Nutzungsgewohnheiten derzeitiger Fahrzeuge. Wichtige Kriterien wie Reichweite, notwendige Ladezeiten, einfache Handhabung des Ladevorgangs und Flexibilität bei der Fahrzeugnutzung haben somit einen hohen Stellenwert.

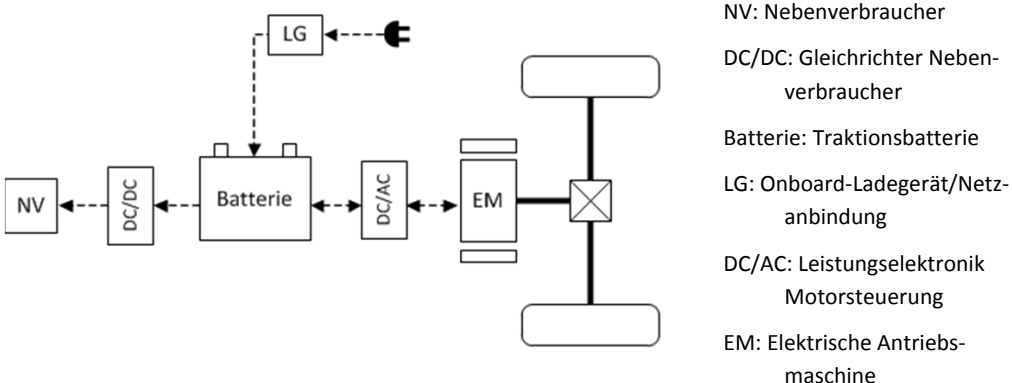
Im Folgenden wird der Stand der Technik bei den Antriebskonzepten und Traktionsbatterien vertieft und eine Analyse des derzeitigen xEV-Marktes inklusive Anreizsysteme und Nutzungsaspekte durchgeführt. Abschließend wird der Status Quo bei der Integration der Ladevorgänge in das Stromversorgungssystem beschrieben und die Bedeutung und Problemlage des Verkehrs als Bestandteil des Energiesystems wird erläutert.

### III.1 Antriebskonzepte

Da die elektrischen Antriebskonzepte Auswirkungen auf die Nutzbarkeit des Gesamtfahrzeugs haben, werden nachfolgend die drei prinzipiellen Antriebskonfigurationen beschrieben, welche sich am Markt bisher durchsetzen konnten. Diese Klassifizierung der Antriebsschemata ist inzwischen etabliert und konform mit der Klassifizierung durch die „Nationale Plattform Elektromobilität“ [NPE, 2011].

Das BEV-Antriebskonzept zeichnet sich durch eine Kombination eines (oder mehrerer) Elektromotor(en) mit einer Traktionsbatterie und entsprechender Leistungselektronik aus. Die elektrische Energie für den Vortrieb wird ausschließlich der Traktionsbatterie entnommen. Diese kann dann in Standzeiten aus dem Stromnetz wieder aufgeladen werden. Abbildung III-1 zeigt eine Prinzip-Skizze der Antriebsverschaltung.

**Abbildung III-1: Konzeptionelle Verschaltung der Antriebskomponenten und des Energiespeichers**



Quelle: nach [Linssen et al., 2012]

Die Nebenverbraucher (NV) des Fahrzeuges (z. B. Lenkung oder Komfortelemente wie Heizung / Klimatisierung) werden mit elektrischer Energie aus der Batterie versorgt. Um auf Standardelemente von herkömmlichen Fahrzeugen zurückgreifen und einfachere Berührungsschutz-

konzepte nutzen zu können, wird häufig ein zweites Bordnetz mit einer niedrigeren Betriebsspannung vorgesehen. Der Elektromotor (EM) wird über eine Leistungselektronik (DC / AC) angesteuert und treibt über geeignete Wellen und Getriebe eine oder beide Achsen an. Bedingt durch die kompakte Bauweise ist auch eine Integration des Elektromotors in die Radnabe denkbar und technisch bereits umgesetzt. [Linszen et al., 2012]

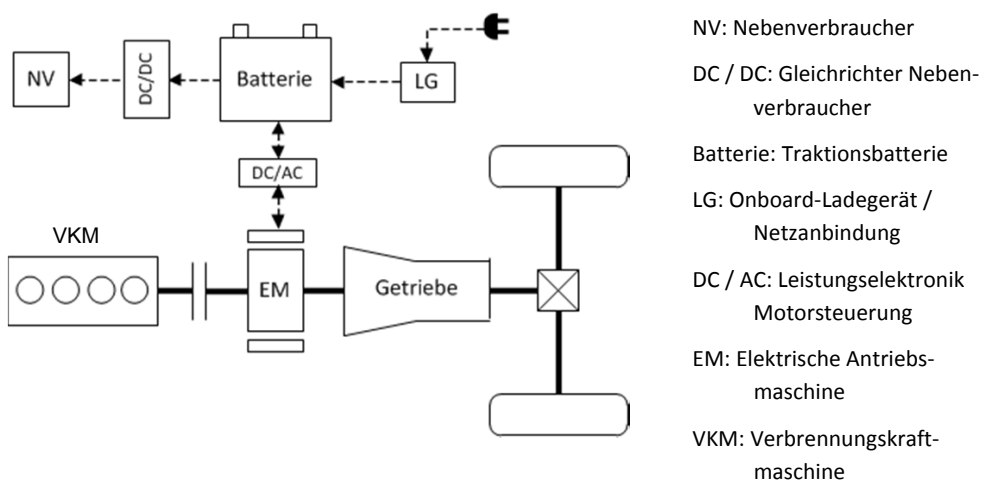
Die Vorteile des BEV-Konzeptes sind die kompakte, einfache elektrische Antriebseinheit ohne mechanisches Schaltgetriebe und eine Beschleunigung ohne Zugkraftunterbrechung gepaart mit einer kurzzeitigen Überlastfähigkeit der elektrischen Antriebsmaschine(n).

Wesentliche Nachteile des Konzeptes sind die durch die Batteriekapazität beschränkte Reichweite ohne Nachladung und die immer noch hohen Batteriekosten (derzeit ca. 50 % der gesamten Fahrzeugkosten [Arndt et al., 2016]). Weiterhin unterliegt die Batterie einer zyklischen sowie kalendarischen Alterung, welche von Faktoren wie mittlerer Ladezustand, Temperatur und Lade- / Endladeleistung abhängt und die Reichweite im Verlaufe der Nutzungsdauer sinken lässt.

Beim Antriebskonzept Parallelhybrid kann das Fahrzeug sowohl mit dem Elektromotor als auch mit dem Verbrennungsmotor angetrieben werden.

Im Gegensatz zum HEV kann beim Plug-In-Hybrid-Fahrzeug (PHEV) die Traktionsbatterie auch aus dem Stromversorgungsnetz nachgeladen werden. Abbildung III-2 zeigt eine mögliche Verschaltung der Antriebs- und Hilfsaggregate. Die Fahrzeuge weisen neben dem Strombedarf für den elektrischen Fahranteil auch einen Kraftstoffverbrauch für die Verbrennungskraftmaschine aus.

**Abbildung III-2: Konzeptionelle Verschaltung der Antriebskomponenten und des Energiespeichers**

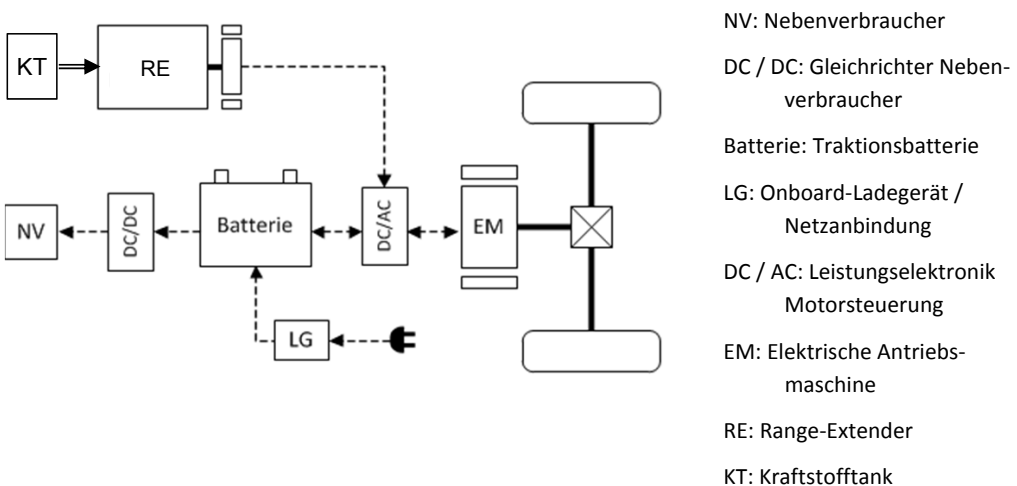


Der größte Vorteil des PHEV gegenüber BEV ist, dass es keine Nutzungseinschränkungen durch eine begrenzte, elektrische Batterie-Reichweite gibt. Zudem kann die Batteriegröße so angepasst werden, dass ein hoher elektrischer Fahranteil mit einer möglichst effizient genutzten Batteriekapazität einhergeht. Dies ermöglicht eine Kostenreduktion bei der Batterie, die jedoch zum Teil oder gänzlich durch die Kosten für zusätzliche notwendige Systemkomponenten (Verbrennungskraftmaschine (VKM), Getriebe etc.) relativiert wird. Da beide Antriebssysteme mechanisch gekoppelt betrieben werden können, kann eine Drehmomenterhöhung für höhere Fahrzeugbeschleunigungen realisiert werden.

Der wesentliche Nachteil dieses Antriebskonzeptes ist die erhöhte Komplexität des Antriebssystems, da zwei Antriebe kombiniert und in das Fahrzeug integriert werden müssen. Außerdem haben die Fahrzeuge meist nur eine geringe elektrische Reichweite, welche nur eine begrenzte lokale Emissionsfreiheit ermöglicht.

Ein batterieelektrisches Fahrzeug mit Reichweitenverlängerung (Range Extended Electric Vehicle, REEV) zeichnet sich dadurch aus, dass die Traktionsbatterie auch während der Fahrt über einen Energiewandler aus einem weiteren Energiespeicher aufgeladen werden kann (Abbildung III-3). Dies kann zum Beispiel die Stromerzeugung durch einen Verbrennungsmotor mit angeschlossenem Generator sein. Diese Systeme benötigen chemische Energieträger wie z. B. Benzin, Diesel oder synthetische Kraftstoffe als Energiespeicher und damit ein zusätzliches Tanksystem. Diese Verschaltung der Wandler-Aggregate wird als serieller Hybrid-Antrieb bezeichnet. Da die Betriebsstrategie solcher Verbrennungsmotoren sich deutlich vom transienten Betrieb als alleinigen Antriebsmotor unterscheidet, können hier an den quasi stationären Betrieb angepasste Motorenkonzepte eingesetzt werden.

**Abbildung III-3: Konzeptionelle Verschaltung der Antriebskomponenten und des Energiespeichers**



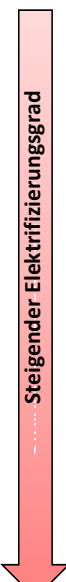
Die Reichweiten-Verlängerung kann auch elektrochemisch mit Hilfe einer Kraftstoff-Reformierung in Kombination mit einer Brennstoffzelle oder mit reinem Wasserstoff erfolgen. Letztere Systemvariante hat höhere Umwandlungseffizienzen im Fahrzeug bei gleichzeitiger Emissionsfreiheit (vgl. [Edwards et al., 2014]).

Der konzeptionelle Vorteil des REEV-Konzeptes im Vergleich zum BEV ist die Aufhebung der elektrischen Reichweiten-Limitierung des Fahrzeugs. Die Antriebseinheit ist kleiner, leichter, weniger komplex als bei PHEV. Als wesentlicher Nachteil des Konzeptes im Vergleich zum PHEV ist zu werten, dass die volle Dauerleistung für längere Höchstgeschwindigkeitsfahrten von der Verbrennungskraftmaschine oder der Brennstoffzelle erbracht werden muss und diese dementsprechend groß zu dimensionieren sind.

In der Praxis sind derzeit vielfältige Abwandlungen und Mischungen der Konzepte zu erkennen, die eine eindeutige Zuordnung zu den beschriebenen Konzepten nicht immer ermöglichen.

Bei den PHEV und REEV unterscheidet man zwischen zwei unterschiedlichen Modi der Batterieentladung im Fahrbetrieb. Im Charge Depleting Mode (CDM) wird der Elektromotor durch die Traktionsbatterie gespeist. Diese wird nicht durch den Range-Extender (RE) nachgeladen. Im Charge Sustaining Mode (CSM) wird der Ladezustand der Traktionsbatterie konstant gehalten und die elektrische Energie für den Vortrieb durch den RE zur Verfügung gestellt. In diesem Betriebsmodus wird Kraftstoff verbraucht. Das Verhältnis zwischen Strom- und Kraftstoffbedarf hängt stark von Systemauslegung, Fahrweise und Fahrzyklus ab (vgl. [Linssen et al., 2012]).

**Abbildung III-4: Vergleich typischer Kenngrößen und Funktionen von xEV-Antriebskonzepten**

	Antriebskonzept	Auslegungsgrößen	Funktionsbeschreibung	
 Steigender Elektrifizierungsgrad	Mikro-Hybrid	EM: 2 – 4 kW Batterie: 0,6 -1,2 kWh	-Start-Stopp	Berücksichtigung der Konzepte in den Energieszenarien (Kapitel VII)
	Mild-Hybrid	EM: 6 – 20 kW Batterie: 1 -2 kWh	-Start-Stopp -Rekuperation -Beschleunigungsunterstützung	
	Voll-Hybrid	EM: 15 – 50 kW Batterie: 2 -3 kWh	-Start-Stopp -Rekuperation -Beschleunigungsunterstützung -Kurzes elektrisches Fahren	
	PHEV / REEV	EM: 40 – 150 kW Batterie: 3 – 20 kWh CDM-Reichweite: 30 – 80 km	-Start-Stopp -Rekuperation -Beschleunigungsunterstützung -Externes Laden -Längeres elektrisches Fahren	Detaillierte Modellierung der Ladeleistung (Kapitel V und VI)
	BEV	EM: 50 – 150 kW Batterie: 10 – 30 kWh El. Reichweite: 120 – 270 km	-Rekuperation -Externes Laden -Nur rein elektrisches Fahren	

Quelle: nach [Weinberg, 2014], eigene Darstellung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Vielzahl von Antriebstrang-Kombinationen möglich ist, welche sich von der Hybridisierung des Verbrennungsmotors mit Start-Stopp-Systemen über Hybride mit möglichen kurzen, rein elektrischen Fahrstrecken, aber ohne Stromnetzladung (Hybrid Electric Vehicle, HEV) über PHEV und REEV bis hin zur reinen batterieelektrischen Fahrzeugen erstrecken.

Abbildung III-4 fasst typische Leistungsgrößen und Kapazitäten der Traktionsbatterie sowie mit dem Elektrifizierungsgrad verbundene Funktionen des elektromotorischen Antriebs zusammen. Alle gezeigten Konzepte sind derzeit am Markt verfügbar.

Schwerpunkt der Analyse ist die Modellierung von Tagesgängen der Ladeleistungsnachfragen und deren Berücksichtigung in zukünftigen Szenarien zur Ausgestaltung des Energiesystems. Obwohl die gezeigten Antriebskonzepte von PHEV und REEV sich technisch deutlich voneinander unterscheiden, ist deren Nutzung beim Kunden im Alltag sehr ähnlich. Beide Antriebsvarianten weisen eine rein batterieelektrische Reichweite zwischen 20 und 60 km auf (vgl. Kapitel XIII.1 im Anhang). Eine Ausnahme bildet dabei der BMW i3 REX, der als BEV mit hoher Akkukapazität konzipiert worden ist. Die Modellierung der Ladeleistungsprofile wird daher auf die Charakteristika der PHEV beschränkt.

### III.2 Traktionsbatterien

Der Einsatz von Traktionsbatterien in Fahrzeugen stellt hohe Anforderungen an die Batterietechnik. Diese unterscheiden sich teilweise deutlich von den Zielwerten in stationären und portablen Anwendungen. Als wichtige technische Kriterien stehen ein geringes Gewicht, ein geringes Bauvolumen und niedrige Kosten im Vordergrund. Weiterhin sind die Sicherheitsanforderungen hoch, da neben Überladungs- und Kurzschlussfestigkeit auch Erschütterungen, hohe Beschleunigungen und erhebliche mechanische Deformation und Durchdringung (z. B. bei Unfällen) beherrscht werden müssen.

Ebenfalls müssen eine ausreichend hohe Zyklenfestigkeit und kalendarische Lebensdauer für alle Betriebsbedingungen (z. B. Umgebungstemperatur) und alle Ladestrategien erreicht werden. Gerade das Alterungsverhalten in Fahrzeuganwendungen ist derzeit Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten und bildet einen Forschungsschwerpunkt in Industrie und Wissenschaft. Da Batterien nur schwer zeitraffend getestet werden können und Langzeiterfahrungen beim Fahrzeugeinsatz fehlen (Marktverfügbarkeit von BEV / PHEV mit Lithium-Ionen-Batterien erst seit dem Jahr 2008 und Vielzahl der eingesetzten Zellchemien mit unterschiedlichen Alterungsmechanismen), besteht derzeit eine deutliche Unsicherheit bei der Lebensdauer- und Vorhersage der Batteriesysteme in Fahrzeugen. Wichtige Batteriekennwerte in Fahrzeugen sind

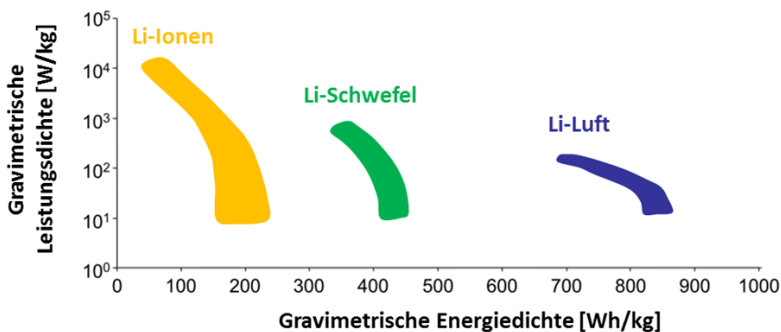
- Leistungs- und Energiedichte,
- Sicherheit,
- Kosten,
- Zyklenfestigkeit und kalendarische Lebensdauer,
- nutzbarer Ladezustandsbereich,

- Temperaturbereich und
- Ressourceneinsatz.

Abbildung III-5 zeigt einen Vergleich von möglichen Leistungs- und Energiedichten für Lithium-basierte Batterietypen auf Zellebene. Die derzeitige Li-Ionen-Zellchemie weist ein sehr breites Spektrum an Leistungsdichten auf. Diese kann daher sowohl als Hochleistungsspeicher (z. B. HEV) als auch als Hochenergiebatterie (z. B. BEV) eingesetzt werden. Hierzu werden unterschiedliche Zelldesigns und Anoden- / Kathoden-Materialpaarungen eingesetzt. Eine deutliche Erhöhung der Energiedichten und damit auch möglicher elektrischer Reichweiten wird langfristig durch den Einsatz neuer Batteriekonzepte wie z. B. Li-Schwefel- und Li-Luft-Systeme angestrebt. Diese neuen Batteriekonzepte befinden sich in einem frühen F&E-Stadium. Die Unsicherheiten der weiteren Entwicklung bezüglich erreichbarer technischer und ökonomischer Batterieparameter sind hoch. Erste praxisrelevante Anwendungen werden erst nach 2030 erwartet [Fischer, 2011]. Der Entwicklungsstand der Li-Schwefel-Zelle ist dabei deutlich fortgeschrittener als das Li-Luft-Batteriekonzept, welches sich noch im Stadium der Grundlagenforschung befindet.

Abbildung III-5 zeigt das Potenzial der Steigerung der gravimetrischen Energiedichten dieser sogenannten Post-Lithium-Ionen-Techniken. Durch einen solchen Technik-Wechsel könnten sich die Reichweiten der BEV signifikant erhöhen. Ein solcher Trend hätte deutliche Auswirkungen auf das Ladeverhalten und die EV-Nutzung.

**Abbildung III-5: Vergleich von Leistungs- und Energiedichten für Lithium-basierte Systeme auf Zellebene**



Quelle: nach [Fischer, 2011] & [Sternier & Stadler, 2018], eigene Darstellung

Nachfolgend werden die drei Batteriekonzepte kurz beschrieben. Für die Lithium-Ionentechnik werden mögliche zukünftige Trends hinsichtlich Energiedichte und Kostenentwicklung gezeigt.

### III.2.1 Lithium-Ionen-Batterien

Die Vorteile von Lithium-Ionen-Batterien gegenüber anderen elektrochemischen Speichern sind vor allem ihre vergleichsweise hohe Energiedichte, ihre hohe Zellspannung, die geringe Selbstentladung und hohe Lade- / Endladewirkungsgrade.

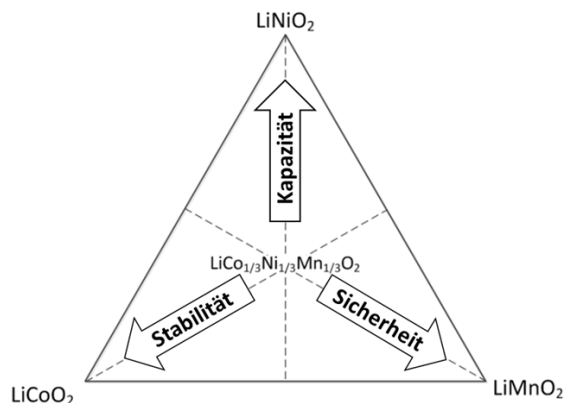
Lithium-Ionen-Batterien sind seit mehr als zwei Dekaden kommerziell verfügbar und werden hauptsächlich für portable Anwendungen eingesetzt. In diesem Anwendungsfeld wurden bisher überwiegend Lithium-Kobaltoxid-Kathoden zusammen mit Graphit-Anoden verwendet, da diese Materialkombination die höchste Langzeitstabilität der derzeit etablierten Kathodenmaterialien aufweist. Der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in xEV ist im Vergleich zum Markt der portablen Anwendungen relativ jung. Erste Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Technik wurden 2008 am Markt angeboten. [Wietschel et al., 2015]

Das verwendete Kathodenmaterial ist für die Leistungsfähigkeit der Batterie von zentraler Bedeutung. Es hat Einfluss auf wichtige Batterieparameter wie die Zellspannung, die Energie- und die Leistungsdichte, die Zyklenfestigkeit, die Betriebssicherheit sowie die Herstellkosten. Gleichzeitig ist zu prüfen, wie gut die Umweltverträglichkeit und die Verfügbarkeit der Materialien sind. Eine vertiefende Analyse zu diesem Thema ist in [Reuter, 2016] zu finden.

Die folgende Abbildung III-6 weist auf das Problem der Kathodenmaterialkomposition für Li-Übergangsmetalloxide hin. Keine Materialpaarung erfüllt die Kriterien Kapazität (Erhöhung der Energiedichte), Sicherheit und Stabilität (günstiges Alterungsverhalten) gleichzeitig. Die Wahl des Kathodenmaterials stellt also immer einen Kompromiss zwischen den Zielen dar.

Neben materialeitigen Maßnahmen können zur Erhöhung der Lebensdauern bestimmte Ladezustände vermieden werden, da hier eine stärkere kalendarische und zyklische Alterung erwartet wird. Das Lademanagement vermeidet insbesondere sehr hohe und sehr niedrige Ladezustände der Batterie (z. B. < 10 % Ladezustand und > 90 % Ladezustand) [Günther et al., 2010]. Aus diesem Grund erfolgt eine Überdimensionierung der Batteriespeicherkapazität, die zwischen ökonomischen Aspekten und Batterielebensdauer ausbalanciert werden muss.

**Abbildung III-6: Li-Übergangsmetalloxide im System  $\text{LiCo}_2\text{-LiNiO}_2\text{-LiMnO}_2$**



Quelle: [Wietschel et al., 2015]

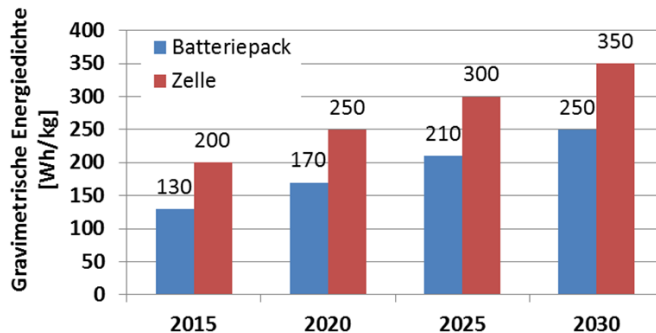
Die Entwicklungsziele im Bereich Lithium-Ionen-Technik sind sehr breit gefächert. Im Bereich der Elektromobilität steht bei der Batterieentwicklung das Erreichen höherer Energie- und Leistungsdichten im Vordergrund. Als Kathodenmaterialien werden sowohl Standard-Metall-



Oxide (vgl. Abbildung III-6) als auch neue Materialkombinationen z. B. Lithium-Eisenphosphate eingesetzt. Weitere Entwicklungsziele beinhalten die Verbesserung der Sicherheit und die Erweiterung des Temperaturbereichs, in dem die Batterie betrieben werden kann. [Thielmann et al., 2012]

Einen möglichen Trend der Energiedichten von Lithium-Traktionsbatterien zeigt Abbildung III-7.

**Abbildung III-7: Entwicklung der Energiedichte von Li-Ionen-Zellen und Batteriepacks von 2015 bis 2030**



Quelle: nach [Arndt et al., 2016], eigene Darstellung

Bei den nachfolgenden Analysen (Kapitel V bis VII) wird davon ausgegangen, dass sich die Energiedichte auf Zellebene schrittweise bis zum Jahr 2030 um 75 % erhöht. Dadurch können höhere Reichweiten bei gleichen Batteriegewichten erzielt werden.

Zusätzlich zum Entwicklungstrend der Energiedichten auf Zellebene ist auch eine Prognose für die erreichbare Energiedichte für ganze Batteriepacks (Kombination aus Zellen, Konditionierung (u.a. Kühlung), Batteriemanagementsystem (BMS), Stromableitersystem und Gehäuse) dargestellt. Das Verbesserungspotenzial bezüglich der Energiedichte wird in der Studie [Arndt et al., 2016] – bedingt durch neue Kühlkonzepte und Batteriedesigns – höher eingeschätzt als auf Zellebene.

### **III.2.2 Lithium-Schwefel-Batterien**

Die wesentlichen Entwicklungsziele bei der Lithium-Schwefel-Batterie stellen das Erreichen hinreichender Zyklenfestigkeiten, eine signifikante Verbesserung der Leistung und Dynamik sowie die Hochskalierung der Systeme vom Labormaßstab hin zu größeren Einheiten dar.

Die Sicherheit der Lithium-Schwefel-Systeme wird derzeit als kritisch gesehen. Das verwendete metallische Lithium ist dabei ein zentraler Punkt, da ein Kontakt des Metalls mit der Feuchte der Luft unbedingt vermieden werden muss. Daher wird in Forschungsvorhaben sowohl konstruktiv als auch chemisch an einem sicheren Einschluss des Lithium-Metalls gearbeitet. Da die beiden Elemente Lithium in metallischer Form und Schwefel sehr reaktiv sind, müssen Konzepte entwickelt werden, die einen sicheren Einschluss der Materialien auch bei hohen Temperaturen gewährleisten können. Hohe Temperaturen können zum Beispiel durch interne Kurzschlüsse

verursacht werden. Eine Möglichkeit zu deren Vermeidung ist der Einsatz von keramischen Trennmembranen.

Begleitend zur Materialforschung werden preisgünstige und skalierbare Herstellungsprozesse untersucht und entwickelt, um die Lithium-Schwefel-Technologie in die industrielle Anwendung zu überführen. Bis Ende 2016 sind keine kommerziellen Produkte am Markt verfügbar gewesen. Die Entwicklung von Lithium-Schwefel-Batterien hat daher noch Forschungs- und Entwicklungscharakter. [Wietschel et al., 2015]

### **III.2.3 Lithium-Luft-Batterien**

Die Arbeiten an diesem Batterietypen befinden sich in der Grundlagenforschung. Weder der sichere Betrieb noch eine hinreichende Zyklenfestigkeit bei elektrischer Wiederaufladung konnten bisher technisch zuverlässig demonstriert werden. Schwerpunkte der Entwicklung sind das Materialdesign der Anode und der Kathode sowie die Entwicklung elektrochemisch stabiler Elektrolyte.

Die Lithium-Luft-Systeme weisen sehr hohe theoretische Energiedichten auf. Jedoch wird nach derzeitiger Einschätzung die gravimetrische Leistungsdichte der Systeme gering sein (vgl. Abbildung III-5). Das vorrangige Einsatzgebiet für diese Technik wird daher im Bereich der portablen Anwendungen liegen. Gelingt eine Hybridisierung mit Hochleistungsbatterien, könnte langfristig auch der Einsatz in Fahrzeugen denkbar sein [JRC, 2011]. Für elektrisch aufladbare Lithium-Luft-Systeme wird mit einer Verfügbarkeit von technischen Systemen deutlich nach dem Jahr 2030 gerechnet [EASE & EERA, 2013]. Das Batteriekonzept erlaubt den Einsatz von kostengünstigen und gut verfügbaren Materialien mit geringen zu erwartenden Umweltauswirkungen [Oertel, 2008]

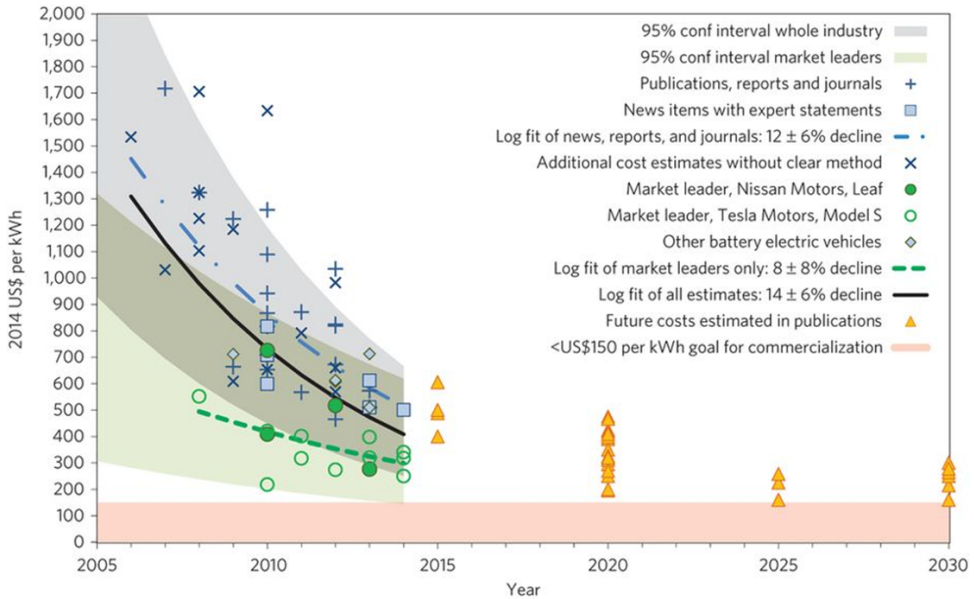
### **III.2.4 Kostentwicklung der Traktionsbatterien**

Für die Abbildung der Elektromobilität in zukünftigen Energieversorgungsszenarien ist eine Einschätzung der Trendentwicklung von technischen Parametern der Fahrzeuge notwendig. Da die Analyse der technischen Parameter nicht den Schwerpunkt der Analyse bilden, sei an dieser Stelle auf vertiefende Literatur z. B. [Arndt et al., 2016], [Plötz et al., 2015a], [Linssen et al., 2012] oder [Helms et al., 2011] verwiesen. Wichtige Parameter, welche die Nutzung von xEV zusätzlich beeinflussen, sind Ladezeiten und die elektrische Reichweite ohne Laden.

Zur Abbildung der xEV in Energiesystemmodellen sind Trendfortschreibungen zu ökonomischen Parameter der einzelnen Techniken notwendig. Wie bereits erwähnt, bestimmen die Batterie-kosten wesentlich die Kosten von BEV und PHEV. Abbildung III-8 zeigt eine umfangreiche Meta-Analyse von über 80 Studien zu Kosten von Batteriepacks in BEV.

Die Studie [Nykvist & Nilsson, 2015] zeigt einen stark fallenden Trend bei den Kosten der Lithium-Ionen-Batteriepacks für Fahrzeuge. Die Kosten sind demnach im Schnitt in den Jahren zwischen 2007 und 2014 um 14 % pro Jahr gesunken. Die Kostenkurve zeigt dabei allerdings eine leichte Sättigung bis hin zu durchschnittlichen Batteriepackkosten von 410 US\$/kWh im Jahr 2014. Die Bandbreite der Kosten ist jedoch erheblich. Die Lernrate bei einer Verdopplung der kumulierten hergestellten Batteriekapazität lag nach [Nykvist & Nilsson, 2015] zwischen 6 und 9 %.

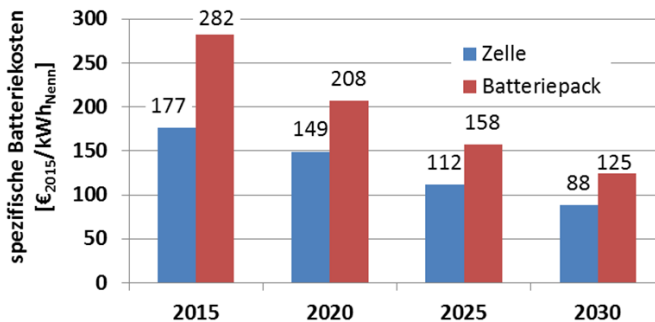
**Abbildung III-8: Historische Entwicklung der Preise von Li-Ionen-Batteriepacks, 2006 bis 2014**



Quelle: [Nykvist & Nilsson, 2015]

Die im Rahmen der folgenden Analysen unterstellte Entwicklung der Batteriepacks (Kapitel VII) ist in Abbildung III-9 dargestellt. Der Trend geht im Analysezeitraum 2014 bis 2025 von einer Halbierung der Kosten der Batteriepacks aus. Die Kostenentwicklung wurde im Rahmen des KomDrive-Projektes über eine Literaturrecherche erhoben [Arndt et al., 2016]. Diese Entwicklung ist die Basis für die unterstellten Kostenentwicklungen für nachfolgende eigene Analysen.

**Abbildung III-9: Mögliche Kostenentwicklung für Zellen und Batteriepacks von 2015 bis 2030, Lithium-Ionen**



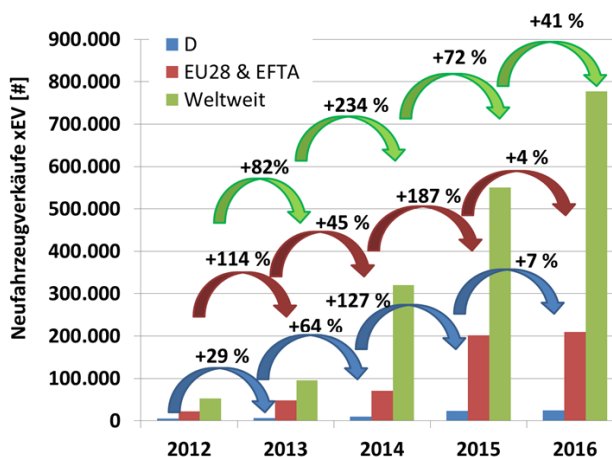
Quelle: [Arndt et al., 2016]

Wesentliche Gründe für die fallenden Preise sind neben werkstoffoptimierten Batteriesystemen auch die Optimierung der Fertigungskapazität und die weltweite Ausweitung der Zellproduktion. Eine Analyse von [Hocking et al., 2016] geht von einer Verdreifachung der weltweiten Produktionskapazitäten bis zum Jahr 2020 aus. Nach dem Jahr 2030 wird davon ausgegangen, dass die Kostensenkungspotenziale weitestgehend erschöpft sind und nur noch sehr geringe Reduktionen der Batteriekosten erfolgen werden.

### III.3 xEV-Neufahrzeugverkäufe und Bestände

Eine Analyse der Neuzulassungs- bzw. Verkaufszahlen von xEV in unterschiedlichen Regionen ermöglicht die Identifikation von frühzeitigen Trends im Elektrofahrzeugmarkt. Weltweit lag der Absatz von xEV im Jahr 2016 bei gut 780.000 Fahrzeugen mit Schwerpunkten in den Märkten in China (48 %), Europa (26 %), den USA (22 %) und den übrigen Regionen (4 %). Die Dynamik der Neufahrzeugverkäufe entwickelte sich dabei sehr differenziert. Während es in China mit +69 % und den USA mit +37 % zweistellige Wachstumsraten von 2015 auf 2016 bei den Neuverkäufen gab, lag die Wachstumsrate in Europa bei nur ca. +7 %. Die Entwicklung der Neufahrzeugverkäufe wird deutlich durch monetäre und nicht monetäre Anreizsysteme bestimmt. Den weltweit höchsten xEV-Bestand weist derzeit China mit 650.000 Fahrzeugen auf. [McKinsey & Company, 2017]

**Abbildung III-10: Neuzulassungen von xEV im Pkw-Bereich in Deutschland, EU 28 und weltweit**



Quelle: [Inside EVs, 2017], [EAFO, 2017], [KBA, 2014], [KBA, 2015], [KBA, 2016b], [KBA, 2017], eigene Darstellung

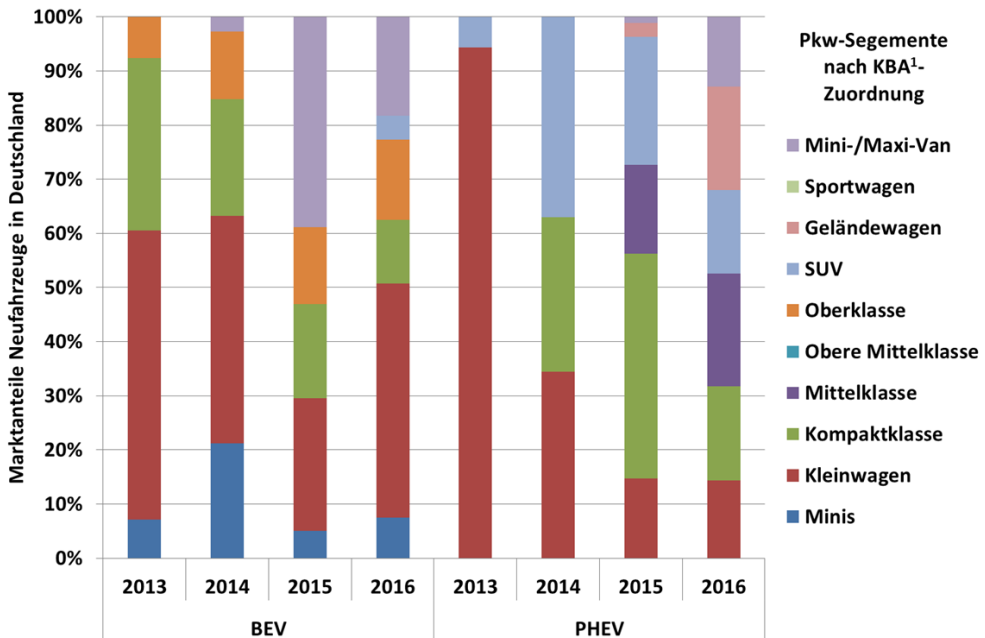
Trotz der in Deutschland bis 2016 bereits implementierten Anreizsysteme (siehe Kapitel III.4) fielen die Neuzulassungszahlen bisher sehr gering aus. Es ist daher fraglich, ob das gesetzte Ziel der Bundesregierung von einer Million elektrischen Straßenfahrzeugen bis zum Jahr 2020 eingehalten werden kann. Von den 3,4 Mio. neuzugelassenen Pkw in Deutschland im Jahr 2016 entfielen lediglich 11.410 auf BEV und 13.744 auf PHEV. Obwohl die Neuzulassungszahlen

bereits im dritten Jahr in Folge deutlich gestiegen sind, ist ihr Anteil an den Gesamtneuzulassungen mit unter 1 % gering [KBA, 2017]. Die Neufahrzeugverkäufe weltweit, in der EU und in Deutschland sind in Abbildung III-10 dargestellt. Die Grundlage der Auswertungen bildet eine Datenbank zu batterieelektrischen Fahrzeugen, deren technischen und ökonomischen Parameter sowie Neuzulassungszahlen mit Datenstand Mai 2017. Ein Auszug aus der Datenbank ist im Anhang A dargestellt.

Das zentrale Fahrzeugregister des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) erlaubt eine Differenzierung der Neuzulassungen nach den Antriebsarten BEV und PHEV und nach Pkw-Segmenten. Die Auswertung gibt Aufschluss über die Marktentwicklung für Elektrofahrzeuge in Deutschland.

In Abbildung III-11 ist die Marktaufteilung nach elektrischer Antriebsart und Pkw-Segment für Deutschland in der zeitlichen Entwicklung von 2013 bis 2016 dargestellt. Es findet die Pkw-Segmentierung des KBA Anwendung.

**Abbildung III-11: Auswertung nach Pkw-Segmenten von xEV-Neuzulassungen in Deutschland**



<sup>1</sup> Einteilung der Fahrzeugsegmente nach der Aufteilung des Kraftfahrtbundesamt

Quelle: [KBA, 2016a] und xEV-Datenbank

Insgesamt ist der Anteil der BEV-Pkw an den xEV von einem Marktanteil von knapp über 80 % im Jahr 2013 auf ca. 55 % gefallen. Die PHEV haben damit deutlich aufgeholt und fast eine Marktparität zu den BEV erlangt. Im Jahr 2015 war für den EU-28-Markt sogar ein höherer Anteil der PHEV (54,4 %) im Vergleich zu den (BEV 45,6 %) zu beobachten [EAFO, 2017].

Bei den rein batterieelektrischen Fahrzeugen hat die Bedeutung der Segmente Mini und Kleinwagen in den Jahren 2013 bis 2015 deutlich an Bedeutung verloren. Signifikante Zuwächse können hingegen die Segmente Oberklasse (maßgeblich bestimmt durch das Model S der Tesla AG) und Mini- / Maxi-Vans verzeichnen.

Bei den PHEV hat das Segment der Kompaktklasse Anteile an die Kleinwagen und insbesondere an die Bereiche Sports Utility Vehicle (SUV) und Geländewagen verloren. Die PHEV der Mittelklasse haben bei den Neuzulassungen ebenfalls Anteile hinzugewonnen.

Zusammenfassend lässt sich beobachten, dass bei den BEV ein Trend hin zu größeren Segmenten existiert. Dies ist maßgeblich auf die Entwicklung kostengünstigerer Batterien gepaart mit höheren Energiedichten zurückzuführen (vgl. Kapitel III.2). Der Trend bei den PHEV geht von der Kompaktklasse in Richtung der höheren Pkw-Segmente und insbesondere SUV, Geländewagen und Vans. Dies ist zum Teil auch durch die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für neu zugelassene Fahrzeuge nach Norm ECE R 101 bedingt. Der elektrische Strombedarf der Fahrzeuge wird erfasst, aber gemäß der Norm werden nur die direkten Betriebsemissionen bilanziert. CO<sub>2</sub>-Emissionen der vorgelagerten Stromerzeugung werden nicht in gebotener Weise berücksichtigt. So können auch Pkw der höheren Segmente mit vergleichsweise niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet werden.

Eine Bilanzierung der gesamten Umwandlungskette (Well-to-Wheel) verschiedener Pkw-Antriebstechniken enthält eine Studie von [Edwards et al., 2014]. Die im Rahmen der genannten Studie durchgeführten Szenario-Rechnungen zur Energieversorgung in Deutschland unter Berücksichtigung der Elektromobilität (siehe Kapitel VII) tragen diesem Aspekt in besonderer Weise Rücksicht, da durch die Systembetrachtung die Stromerzeugung zutreffend mit bilanziert wird.

Die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Datenbank erlaubt weitere Auswertungen von xEV-spezifischen Kennwerten. Eine verdichtete Auswahl ist in Tabelle III-1 zusammengefasst. Die Kennwerte der bis Ende 2016 marktverfügbaren xEV-Modelle sind mit dem jeweiligen Marktanteil des Jahres gewichtet. Das Jahr 2012 wurde nicht eingehend analysiert, da die Ergebnisse sehr stark durch einige wenige Modelle und ihre Merkmale geprägt waren.

Die elektrischen Reichweiten der neuverkauften BEV und PHEV im Normzyklus haben sich erhöht, so dass diese bei BEV knapp unter oder etwas über 200 km betragen. Für die PHEV werden rein elektrische Reichweiten um ca. 60 km angegeben. Der Strombedarf im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) liegt bei den neu verkauften BEV zwischen 13 und 15 kWh/100 km. Der Strombedarf der PHEV liegt nach ECE-Norm R 101 ebenfalls im selben Bereich. Die geringe Zahl an neu zugelassenen REEV lässt eine belastbare Auswertung nicht zu.

**Tabelle III-1: Batterie-Nennkapazitäten, Normreichweiten und Gesamtkapazität der Neufahrzeugflotte in Deutschland**

		Parameter der Neuzulassungen Deutschland			
		2013	2014	2015	2016
Normreichweite NEFZ Fahrzyklus [km] <sup>2</sup>	BEV	119	230	206	221
	PHEV (CDM)	76	82	64	59
Strombedarf im NEFZ [kWh/100km]	BEV	14,6	13,9	15,0	13,0
	PHEV	14,9	13,4	13,2	14,4
Mittlere Nennkapazität Batterie [kWh]	BEV	27,7	27,9	30,0	31,8
	PHEV	12,4	12,7	11,0	13,6

Quelle: [KBA, 2016a], Herstellerangaben und eigene Berechnungen

Eine Auswertung der Batteriekapazitäten der Neufahrzeugflotte zeigt Tabelle III-2. Im Jahr 2016 beläuft sich die Nennkapazität aller neu zugelassenen xEV in Deutschland auf 513 MWh und übersteigt – trotz geringer Zulassungszahlen – damit jetzt schon deutlich die bisher installierte Leistung der stationären Batteriespeicher in Deutschland [Stenzel et al., 2017]. Kumuliert über die letzten vier Zulassungsjahre ergibt sich daraus eine Kapazität von knapp 1,4 GWh. Die mittlere Batterie-Nennkapazität pro Pkw beträgt im Jahr 2016 ca. 32 kWh bei BEV bzw. ca. 14 kWh bei PHEV. Diese hat sich dabei in den vergangenen drei Zulassungsjahren durch neue Modelle und die Überarbeitung markteingeführter Modelle um über 12 % bei BEV und knapp 7 % bei PHEV erhöht.

**Tabelle III-2: Auswertung der Neuzulassungen von xEV und deren Batterienennkapazitäten**

Jahr	BEV und PHEV Neuzulassungen [#]	Anteil BEV [%]	Kumulierte Nennkapazität Neufahrzeugflotte in D [MWh]
2013	6.306	82,6	157,8
2014	10.349	63,7	232,0
2015	23.464	52,7	493,4
2016	25.154	45,4	513,4

Quelle: [EAFO, 2017], [KBA, 2014], [KBA, 2015], [KBA, 2016b], [KBA, 2017], Herstellerangaben und eigene Berechnungen

<sup>2</sup> Die realen Reichweiten weichen teilweise stark von den Normzyklus-Reichweiten ab. Extremer Winterbetrieb oder geänderte Fahrverläufe lassen eine hohe Bandbreite an tatsächlich erreichbaren Reichweiten ohne Nachladen erkennen. (vgl. [Linssen et al., 2012]). Ab dem 1. September 2017 ist das neue Testverfahren „Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure“ (WLTP) anzuwenden.

Neben den steigenden Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen und den steigenden Nennkapazitäten pro Fahrzeug gibt es einen weiteren Trend zu möglichen Batterie-Upgrades von gebrauchten Fahrzeugen. Zum Beispiel bietet die BMW AG seit dem Jahr 2016 für sein Modell i3 die Umrüstung auf eine größere Batterie von 22 kWh auf 33 kWh an [BMW, 2016]. Die Abmessungen der neuen Batterie sind identisch und die Batterie kann ohne weitere Umbauten ausgetauscht werden. Die gebrauchte Traktionsbatterie nimmt BMW in Zahlung.

#### **III.4 Anreizsysteme**

In diesem Kapitel werden mögliche Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes elektrischer Straßenfahrzeuge kurz beschrieben, da diese die Marktpenetration und die Käuferakzeptanz beeinflussen. Insbesondere wird der Schwerpunkt auf Maßnahmen gelegt, welche die private Nutzung von xEV gezielt fördern sollen. Die Liste der Maßnahmen erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern repräsentiert den Status quo bis Mai 2017.

##### **Kaufpreisminderung**

Eine Kaufpreisreduktion oder ein Investitionszuschuss können in verschiedenen Varianten ausgestaltet werden. So kann es sich um eine direkte Minderung des Kaufpreises handeln oder um ein zinsvergünstigtes Darlehen mit Tilgungszuschüssen. Bei der letztgenannten Option muss nur ein Teil der Kreditsumme zurückgezahlt werden.

Die Bundesregierung hat mit ihrem Marktanzreizpaket zur Elektromobilität u.a. ein Kaufanreizprogramm für BEV und PHEV im Frühjahr 2016 umgesetzt. Die Förderung steht auch für Brennstoffzellen-Fahrzeuge zur Verfügung. Das bis Ende des Jahres 2019 befristete und mit 600 Mio. € Fördersumme gedeckelte Kaufanreizprogramm fördert die Anschaffung von BEV-Pkw mit 4.000 € und von PHEV-Pkw mit 3.000 €. Die Zuschüsse werden jeweils zur Hälfte von der Bundesregierung und der Automobilindustrie finanziert. Der Zuschuss wird für einen Abschluss sowohl eines Kaufvertrags als auch eines Leasingvertrags gezahlt. Bis Ende Februar 2017 wurden 12.650 Anträge gestellt, wovon 56 % auf rein batterieelektrische Pkw entfielen. Nur knapp 47 % der Anträge wurden von Privatpersonen gestellt. Die meisten Anträge wurden für den BMW i3 und Renault Zoe eingereicht. [Bafa, 2017]

In verschiedenen Studien wurde untersucht, wie sich eine Kaufpreisminderung auswirken kann und welche Vor- und Nachteile bestehen. In der Untersuchung [Plötz et al., 2015a] werden direkte Kaufpreisminderungen von 1.000 € und 2.000 € untersucht. Das Ergebnis der Analyse zeigt, dass unter den getroffenen Annahmen bei einer Zugabe von 2.000 € ein Bestand von über 1,8 Mio. Elektrofahrzeugen bis 2020 generiert werden könnte. Die Studie weist eine große Sensitivität gegenüber der Höhe des Subventionsbetrages aus. Bei einem Neupreinschuss von 1.000 € sinkt laut der Analyse der erzielbare Effekt um über 50 % auf ca. 800.000 EV im Jahr 2020 ab. Im Vergleich zu anderen Anreizmaßnahmen zeigt die Pauschalsubvention den größten Einfluss auf die erreichbaren EV-Bestandszahlen. Es ist zu beachten, dass eine Pauschalsubvention nicht nur gewerbliche Halter erreicht, sondern alle Haltergruppen anspricht. Die Autoren der Studie gehen davon aus, dass eine Kaufpreissubvention deutlich höhere Mitnahmeeffekte als andere Anreizsysteme verursacht und damit nur eine bedingt zielgerichtete und nicht



kosteneffiziente Förderung ermöglicht. Dies ist damit zu erklären, dass auch jene Käufer subventioniert werden, die sich auch ohne Kaufprämie für ein Elektrofahrzeug entschieden hätten. Ein weiteres Argument gegen pauschale Kaufanreize ist die negative Beeinflussung von Kostensenkungen aufgrund von Lernkurven und Skaleneffekten in einem startenden Markt. Dies kann dazu führen, dass Produkte künstlich verteuert werden, da Pauschalsubventionen über den Preisdifferenzen von herkömmlichen und neuartigen Techniken liegen. Bezüglich der gewerblichen Nutzung von xEV kommt die Studie zum Ergebnis, dass sich durch Kaufpreisminderungen im gewerblichen Bereich höhere Effekte als im privaten Bereich erzielen lassen.

Eine weitere Analyse zu Kaufpreisminderungen ist in [Peters et al., 2013] zu finden. Die Studie untersucht ein Bonus-Malus-System als Weiterentwicklung einer starren Kaufprämie, welches sich an dem französischen Modell bei Fahrzeugneukäufen orientiert. Bei diesem System erhalten Autokäufer in Abhängigkeit von den CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer Fahrzeuge entweder einen Zuschuss oder zahlen einen Aufschlag auf den Kaufpreis. Beispielsweise beträgt der Malus in Frankreich 8.000 € bei einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß von mehr als 201 g/km [Französische Botschaft, 2015]. Dieses Fördersystem kann so ausgestaltet werden, dass es sich steueraufkommensneutral verhält. Da die in der EU neu verkaufte xEV aufgrund der Tank-to-Wheel-Bilanzierung des Verbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen (vgl. Kapitel III.3) als Null-Emissions-Fahrzeuge gelten, würden die Käufer dementsprechend einen Bonus für den EV-Neukauf bekommen. Ein entsprechendes Anreizsystem ist derzeit in Deutschland nicht vorgesehen.

### **Dienstwagenbesteuerung**

Die Dienstwagenbesteuerung betrifft die private Nutzung von gewerblich angeschafften Fahrzeugen (sogenannte Dienstwagen). Diese müssen bei privater Nutzung nach dem Einkommensteuergesetz (EStG) steuerlich geltend gemacht werden, da sie einen geldwerten Vorteil darstellen. Bei der monatlichen Besteuerung kann entweder ein Pauschalbetrag angesetzt oder mittels eines Fahrtenbuches nur der private Fahranteil besteuert werden.

Der Pauschalbetrag des geldwerten Vorteils wird durch die sog. Ein-Prozent-Regelung bestimmt. Es muss 1 % des angesetzten Bruttolistenpreises versteuert werden, unabhängig vom tatsächlichen Kaufpreis. Dazu addiert sich ein Zuschlag in Höhe von 0,03 % des Bruttolistenpreises je Entfernungskilometer zwischen Wohnung und Arbeitsplatz. Die Regelung wirkt sich nachteilig auf die Anschaffung und Besteuerung von EV-Dienstwagen aus, da die im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen höheren Listenpreise sich durch höhere zu versteuernde geldwerte Vorteile auswirken. Ein Kauf von xEV-Dienstwagen wäre dementsprechend für die private Nutzung nachteilig.

Die Dienstwagenbesteuerung für EV wurde im Jahr 2013 (veröffentlicht am 29.06.2013 im Bundesgesetzblatt) dementsprechend angepasst. Sie reduziert den Listenpreis um einen gestaffelten Pauschalbetrag in Abhängigkeit von der Batteriegröße und dem Erstzulassungsjahr. Der steuerlich wirksame Listenpreis von EV reduziert sich mit Erstzulassungsjahr 2013 um 500 € pro installierte kWh Batterie-Nennkapazität (vgl. § 6 Abs. 1 Nr. 4 S. 2 EStG). Die Minderungsbeiträge steigen dabei linear mit der Batteriegröße bis zum festgelegten Maximalbetrag von 10.000 € an. Die Reduktion des Listenpreises nimmt für Fahrzeuge mit späteren Zulassungsjahren um

50 €/kWh pro Jahr ab. Der Maximalbetrag wird pro Jahr um 500 Euro abgesenkt. Die Neuregelung ist auf BEV, REEV und PHEV anwendbar. Eine umfassende Bewertung der Effektivität dieser Maßnahme steht derzeit noch aus. Für die gewerbliche Anschaffung von xEV wirkt sich diese Maßnahme nicht aus, da sich für die gewerblichen Besitzer keine monetären Vorteile ergeben.

### **Nicht-monetäre Maßnahmen**

Im Jahr 2015 wurde das Elektromobilitätsgesetz (EmoG) verabschiedet. Ziel des Gesetzes ist der Aufbau von Privilegien für die Nutzung von EV, um die Markteinführung der Technik positiv zu beeinflussen. Es wird mit diesem Bundesgesetz der Rechtsraum sowohl für nicht-monetäre Anreize wie zum Beispiel Sonderparkrechte für xEV oder die Freigabe von Sonderfahrspuren (sogenannte Busspuren) für Elektrofahrzeuge als auch für monetäre Anreize (z. B. die Befreiung von Parkgebühren) geschaffen. Die nicht-monetären Maßnahmen zielen darauf ab, die Nutzer von EV im Alltag zu begünstigen. Die jeweilige Planung und Umsetzung der Maßnahmen obliegt den Kommunen vor Ort [Matthies et al., 2016].

Die Gewährung von nicht direkt monetären Anreizen durch die Privilegierung von EV im Straßenverkehr ist meist nicht mit einer Belastung des Haushaltes von Kommunen verbunden. Sehr wohl können jedoch indirekte Ausgaben z. B. durch wegfallende Parkgebühren entstehen. Je nach Maßnahme kann das individuelle Interesse am Kauf von EV erhöht werden. Jedoch entfalten diese Maßnahmen sehr unterschiedliche und meist nicht zielgerichtete Wirkungen. Eine Steuerbarkeit der Wirkung und der gesetzten politischen Ziele ist dadurch mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet. Dies muss bei Umsetzung nicht-monetärer Anreize beachtet werden. [Matthies et al., 2016].

Bezogen auf den Wirtschaftsverkehr kann sich beispielsweise die Nutzung von Busspuren positiv durch das schnellere Zurücklegen von insbesondere innerstädtischen Fahrten bemerkbar machen [Kuhr, 2014]. Ein weiterer Vorschlag zielt besonders auf Kurier- / Express- / Paket-Lieferdienste (kurz KEP) ab. Dieser eröffnet für Elektrofahrzeuge die Möglichkeit, längere Zufahrtszeiten für Innenstädte zu erhalten und so einen Teil der Lieferungen aufgrund von geringerer Lärmemissionen in den Nachstunden zuzustellen [Aichinger, 2015]. Weitere Anreize sind Parkplatzprivilegien für gewerblich genutzte xEV, welche kürzere Güterentladezeiten ermöglichen.

Die Studie [Peters et al., 2013] macht deutlich, dass nicht-monetäre Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität auch in Konkurrenz zum öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) stehen. Dies ist vor allem z. B. in Verbindung mit Sondernutzungsrechten von Busspuren zu sehen. Gleichzeitig macht die Studie deutlich, dass nicht-monetäre Anreize Mehrpreise von Elektrofahrzeugen weniger genau kompensieren können als monetäre Anreize. Insbesondere bei gewerblichen Kunden ist davon auszugehen, dass diese Ungleichgewichtung zwischen nicht-monetären und monetären Maßnahmen noch ausgeprägter ist. Mit der Erkenntnis, dass bei gewerblichen Käufern das Kostenkriterium über die Fahrzeugwahl entscheidet, lässt sich folgern, dass nicht-monetäre Anreize bei der Kaufentscheidung im Wirtschaftsverkehr eher eine untergeordnete Rolle spielen dürften.

Viele der nicht-monetären Anreize zielen auf Ballungsräume ab und sind häufig auf Innenstädte fokussiert. Auch bleibt die Frage offen, ob Städte und Kommunen ein Interesse an der Gewährung von Sonderrechten haben. Die derzeit eher auf einige wenige Kommunen konzentrierte Umsetzung deutet darauf hin, dass die mit den Maßnahmen verbundenen Zusatzkosten von einigen Kommunen nicht getragen werden können, da keine Möglichkeiten zur Gegenfinanzierung bestehen.

Es lässt sich also festhalten, dass nicht-monetäre Anreize zwar die Attraktivität von Elektromobilität steigern. Im Vergleich zu monetären Maßnahmen erzielen sie aber insbesondere für gewerbliche Käufer keine analogen Wirkungen. Sie ersetzen keine monetären Steuerungsinstrumente, sondern sind vielmehr als zusätzliche Maßnahmen einzuschätzen. Daneben kann die aktuelle Umsetzung der nicht-monetären Anreize hinterfragt werden, da das Elektromobilitätsgesetz in seiner jetzigen Form bisher kaum effektive Wirkungen erzielt hat.

### **Ladeinfrastruktur**

Als ein Grund für die derzeitige geringe Marktdurchdringung der Elektromobilität wird häufig das Fehlen einer gut ausgebauten öffentlichen Ladeinfrastruktur angeführt (siehe Kapitel III.5). Potenzielle Käufer von Elektrofahrzeugen fordern daher einen deutlichen Ausbau der Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum. Die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE, Gremium mit Vertretern aus Wirtschaft, Politik und Anwendern zur Förderung der Elektromobilität) fordert als wichtigen Eckpfeiler für den Markterfolg den „Aufbau einer bedarfsgerechten, flächendeckend verfügbaren und komfortablen öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur“ [Nationale Plattform Elektromobilität, 2014]. Das Marktanreizprogramm zur Elektromobilität enthält Fördermittel in Höhe von 300 Mio. € bis zum Jahr 2020 für den gezielten Ausbau der Ladeinfrastruktur zur Schnell-Ladung. Ziel ist der Aufbau von mindestens 15.000 Ladesäulen bis 2020. [BMVI, 2016a]

Für den Privatverkehr spielt eine flächendeckende Ladeinfrastruktur durchaus eine wichtige Rolle, da private Nutzer von Elektrofahrzeugen ein weniger planbares Fahrverhalten aufzeigen und zum Teil über keine Heimlademöglichkeiten verfügen. Laut Einkommenssteuergesetz werden nach dem Regierungsbeschluss vom 18. Mai 2016 die vom Arbeitgeber gewährten Vorteile des Ladens eines privat genutzten EV am Arbeitsplatz und der privaten Nutzung zeitweise überlassener betrieblicher Ladevorrichtungen steuerbefreit. Dies erleichtert das Laden und Abrechnen am Arbeitsplatz.

### **III.5 Nutzerperspektive der Elektromobilität**

Die Elektromobilität in Deutschland befindet sich derzeit in einer Phase der erhöhten Aufmerksamkeit. Die Bereitschaft zum Kauf eines Elektrofahrzeuges ist dennoch bisher gering. Dies konnte durch die bereits gezeigte Marktanalyse und die geringen Anteile an den Neufahrzeugverkäufen gezeigt werden (vgl. Kapitel III.3).

Durch die beschriebenen Anreizsysteme sollen wirtschaftliche Nachteile ausgeglichen und dem maßgeblichen Nachteil der Reichweiteinschränkung durch einen Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur insbesondere in urbanen Gebieten und an Autobahnen entgegengewirkt

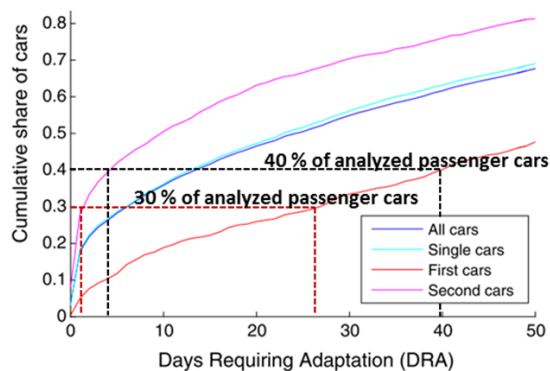
werden. Alle Maßnahmen zielen darauf ab, die Akzeptanz der Elektromobilität zu erhöhen und damit die Kaufentscheidung für ein Elektrofahrzeug zu unterstützen. Die bereits angestoßenen Aktivitäten der Politik und der Industrie verfehlen aber bisher ihre Wirkung. Der Prozess der Akzeptanzbildung und die Bereitschaft zum Kauf ist sehr vielschichtig und unterliegt immer einer Entwicklung. Es bleibt daher in den nächsten Jahren abzuwarten, ob die Maßnahmenpakete und das sich rasch entwickelnde Angebot der Fahrzeughersteller zu einem deutlich höheren Absatz an Elektrofahrzeugen führen wird.

Zur Einschätzung der Akzeptanz von Elektrofahrzeugen werden insbesondere in öffentlich geförderten Demonstrationsprojekten Befragungen zur Motivation, zu Treibern und zu Hemmnissen beim Kauf und der Nutzung von Elektrofahrzeugen durchgeführt. In den vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderten Modellregionen Elektromobilität [BMVI, 2012] wurde im Themenfeld Nutzerperspektive eine projektübergreifende, sozialwissenschaftliche Begleitforschung durchgeführt. Diese Aktivität hatte zum Ziel, wichtige Faktoren zu identifizieren, welche den Kauf und die Nutzung von Elektrofahrzeugen bestimmen [BMVI, 2015]. In der Befragung von privaten und gewerblichen Nutzern zeigte sich, dass die Aspekte Bedienungsfreundlichkeit, Komfort, Transportkapazität, Reichweite, Ladedauer und Handhabung der Ladung, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Fahrspaß, Höchstgeschwindigkeit und Umweltfreundlichkeit als sehr wichtig erachtet werden. Bei der Befragung von privaten Nutzern werden die Punkte Ladedauer und, Transportkapazität nur als zufriedenstellend und die Reichweite insbesondere von BEV als sehr negativ bewertet. Diese als Hemmnis eingestuften Merkmale beeinträchtigen den vielseitigen und flexiblen Einsatz der Fahrzeuge. Aus den Ergebnissen dieser Befragung kann abgeleitet werden, dass private Nutzer die Eignung und damit die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen vor allem hinsichtlich ihrer Flexibilität auch vor dem Hintergrund von nicht alltäglichen Fahrten bewerten. Die derzeitige Weiterentwicklung von xEV geht daher deutlich in Richtung Annäherung der Funktionalitäten an konventionelle Fahrzeuge, um die Käuferzustimmung zu erhöhen.

Eine weitere Schlussfolgerung der Studie [BMVI, 2015] ist, dass die privaten Nutzer nicht zu einer wichtigen Zielgruppe für Elektrofahrzeuge werden dürften, bis man ähnliche Reichweiten wie bei konventionellen Fahrzeugen realisieren kann. Die Zielgruppe der gewerblichen Nutzer mit Fahrzeugflotten äußert bei der Befragung eine deutlich höhere Akzeptanz von Elektrofahrzeugen. Grund dafür ist die geringere betrieblich notwendige Flexibilität bezüglich des Einsatzspektrums der Fahrzeuge, die sich aus der guten Planbarkeit der Routen und Entfernungen im Vergleich zum Privatverkehr ergibt. Die Eignung von Elektrofahrzeugen und deren Bewertung durch kommerzielle Nutzer ist Gegenstand der Studie [Arndt et al., 2016]. Die Untersuchung kommt zu dem Schluss, dass eine passgenaue Reichweite und die Verfügbarkeit einer Ladeinfrastruktur die wesentlichen Faktoren für einen gewerblichen Einsatz sind. Nachteilig wirkt sich im kommerziellen Bereich – insbesondere für Nutzfahrzeuge – das mangelnde Angebot an Neufahrzeugen aus. Als weiteres Hemmnis für den Einsatz von Elektrofahrzeugen im Wirtschaftsverkehr wird in den Befragungen die als mangelhaft wahrgenommene Informationslage zu Elektrofahrzeugen ermittelt. In der gewerblichen Nutzung sind die Anschaffungskosten nach wie vor der Hauptgrund, nicht in xEV zu investieren.

In der Studie [Jakobsson et al., 2016] werden das Mobilitätsverhalten von Pkw-Nutzern und die Eignung von xEV zur Befriedigung von Mobilitätsbedürfnissen untersucht. Die Studie basiert auf Primärerhebungen des Mobilitätsverhaltens in Deutschland und Schweden und bewertet auch die Total Cost of Ownership (TCO) aus Sicht potenzieller BEV-Besitzer. Ein besonderes Augenmerk der Studie liegt auf der Untersuchung, wie oft die verfügbare Reichweite von BEV im Jahr nicht für die Mobilitätsbedürfnisse der Haushalte ausreicht. Die Tage der Nichterfüllung der Mobilitätswünsche pro Jahr (Days Requiring Adaption – DRA) bei einer unterstellten elektrischen BEV-Reichweite von maximal 120 km ohne Nachladen werden als wichtiges Indiz für die Eignung der Fahrzeuge angesehen. Es wird eine Differenzierung nach Haushalten mit einem oder mehreren Pkw und der Klassifizierung als Erst- und Zweitfahrzeug durchgeführt. Die Einordnung in Erst- und Zweitfahrzeug wurde aus der Panelbefragung [IfV-KIT & TNS, 2016] übernommen und richtet sich nach der Jahresfahrleistung der Fahrzeuge (Abbildung III-12).

**Abbildung III-12: Nichterfüllung der Mobilitätswünsche (DRA) pro Jahr für Erst- und Zweit-Pkw**



Quelle: nach [Jakobsson et al., 2016], erweiterte Darstellung

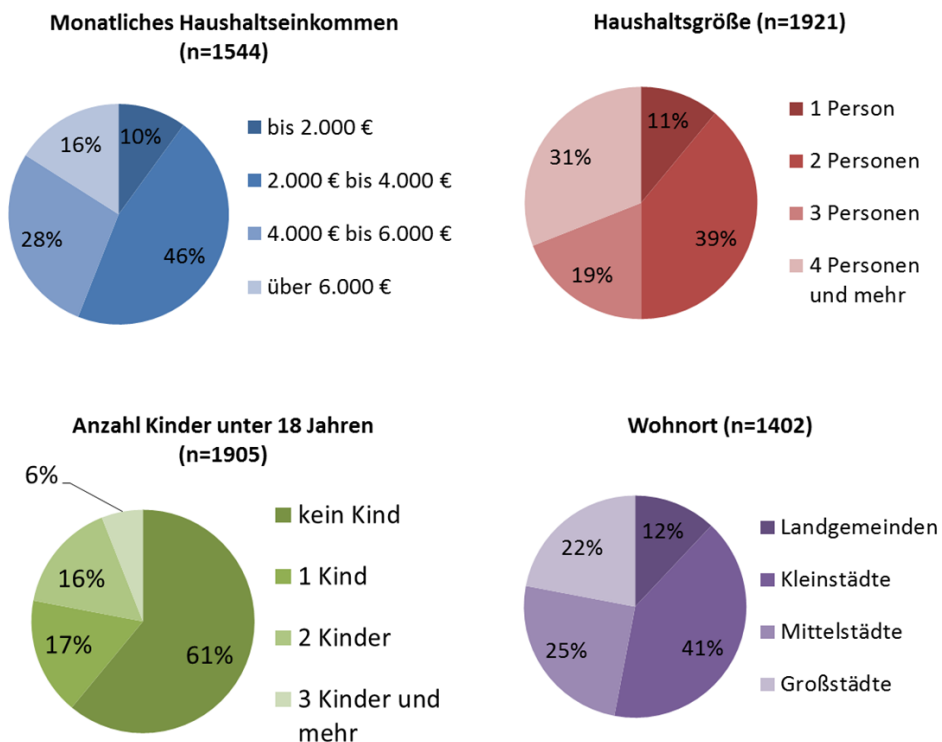
Der Verlauf der DRA zeigt für den Zweitwagen in einem Haushalt deutlich höhere Erfüllungsquoten der täglichen Mobilitätswünsche auf. So weisen beispielsweise 30 % der untersuchten Zweitfahrzeuge nur ca. 2 DRAs auf, wohingegen 30 % der Erstfahrzeuge ca. 27 DRAs aufweisen (rote, gestrichelte Linien in Abbildung III-12). Dieses Ergebnis ist robust gegenüber verschiedenen Jahresfahrleistungen der Fahrzeuge in den Haushalten. Die Autoren der Studie schätzen akzeptierte BEV-Reichweiten zwischen 220 km für Zweitfahrzeuge und 390 km für Erstfahrzeuge ab. Dementsprechend kann bei 70 % der untersuchten Stichproben eine volle Befriedigung aller Mobilitätsbedürfnisse erreicht werden und eine Anpassung des Verhaltens oder ein Ausweichen auf konventionelle Fahrzeuge ist nicht erforderlich.

Eine umfangreiche Befragung von [Frenzel et al., 2015] unter über 3.100 Erstnutzern von Elektrofahrzeugen (davon knapp 63 % private Nutzer) in den Jahren 2013 bis 2014 sieht das Interesse an innovativen Fahrzeugtechnologien und den Wunsch nach Reduzierung der Umweltbelastung als wichtigste Treiber für die Elektromobilität. Erst danach folgt das Motiv der günstigen kilometerspezifischen Kosten von xEV. Die derzeit bereits ergriffenen Anreizmaßnah-

men wie etwa die Befreiung von der Kfz-Steuer oder kostenloses Parken und Laden spielen bei der Kaufentscheidung eine eher untergeordnete Rolle. Die Auswirkungen der erst im Frühjahr 2016 von der Bundesregierung beschlossenen Anschaffungsprämie für Elektrofahrzeuge konnte noch nicht erfragt werden. Dies zeigt erneut, dass im privaten Bereich die Kaufentscheidungen nicht streng nach Kostengesichtspunkten getroffen werden, sondern ein Portfolio an Kaufmotiven besteht. Dies steht im Gegensatz zum gewerblichen Kauf und zur gewerblichen Nutzung von Elektrofahrzeugen.

Für die privaten Nutzer kann laut Studie festgehalten werden, dass die Elektrofahrzeuge wie herkömmliche Fahrzeuge genutzt werden. Die erfragte Jahresfahrleistung der Fahrzeuge liegt für BEV um über 30 % und für PHEV um über 10 % niedriger als bei konventionellen Neufahrzeugen. Die Studie führt dies auf den eingeschränkten Langstreckenbetrieb (z. B. fehlende Urlaubsfahrten) zurück. Für die gewerblichen Nutzer sind neben der begrenzten elektrischen Reichweite die geringeren Zuladungsmöglichkeiten von Gütern ein weiteres Hemmnis.

**Abbildung III-13: Soziodemografische Daten von privaten xEV-Erstnutzern**



Quelle: [Frenzel et al., 2015], eigene Darstellung

Die Befragung von Erstnutzern von Elektrofahrzeugen aus den Jahren 2013 bis 2014 [Frenzel et al., 2015] hat neben den Treibern und Hemmnissen für den Erwerb von Elektrofahrzeugen auch soziodemografische Profile und Fahrzeugnutzungsmuster der ca. 3.100 Befragten erfasst.

Die Erstnutzer von Fahrzeugen bilden dabei eine relativ homogene Gruppe, welche durch Männer im Durchschnittsalter von 51 Jahren mit überdurchschnittlichem Einkommen geprägt wird. Eine Zuordnung nach den siedlungsstrukturellen Kategorien Großstadt, Mittelstadt, Kleinstadt und Landgemeinde des Bundesinstituts für Bau, Stadt und Raumforschung (BBSR) zeigt eine deutliche Konzentration auf die Siedlungsstrukturen Klein- und Mittelstädte (ca. 66 % Fahrzeug-Erstnutzer bezogen auf alle Nutzer in der jeweiligen Kategorie), während der Anteil der privaten Erstnutzer von xEV in Großstädten nur 22 % ausmacht (Abbildung III-13). Die Elektrofahrzeugnutzer leben dabei überwiegend in Haushalten mit zwei oder mehr Personen.

Aus den Befragungsergebnissen der Studie ziehen die Autoren die Schlussfolgerung, dass derzeit vermehrt die Bevölkerungsgruppe mit Einfamilienhaus inklusive Stellplatz und Lademöglichkeit in Kleinstädten Elektrofahrzeuge anschaffen wird. Die Befragung ergab weiterhin, dass der Anteil der Haushalte, welche sich ein Elektrofahrzeug angeschafft haben, in 80 % der untersuchten Stichprobe über mindestens einen weiteren Pkw im Haushalt verfügen.

Die Studie [Franke, 2013] analysiert die Akzeptanz von begrenzten Reichweiten von Elektrofahrzeugen basierend auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt „MINI E Berlin powered by Vattenfall“. Die Erkenntnisse der Studie zeigen, dass die gewünschten Reichweiten sich aus den derzeitigen Reichweiten von konventionellen Pkw ableiten und weniger den tatsächlichen Bedarf widerspiegeln. Jedoch verringern sich die präferierten Reichweiten mit steigenden Erfahrungswerten im Umgang mit xEV.

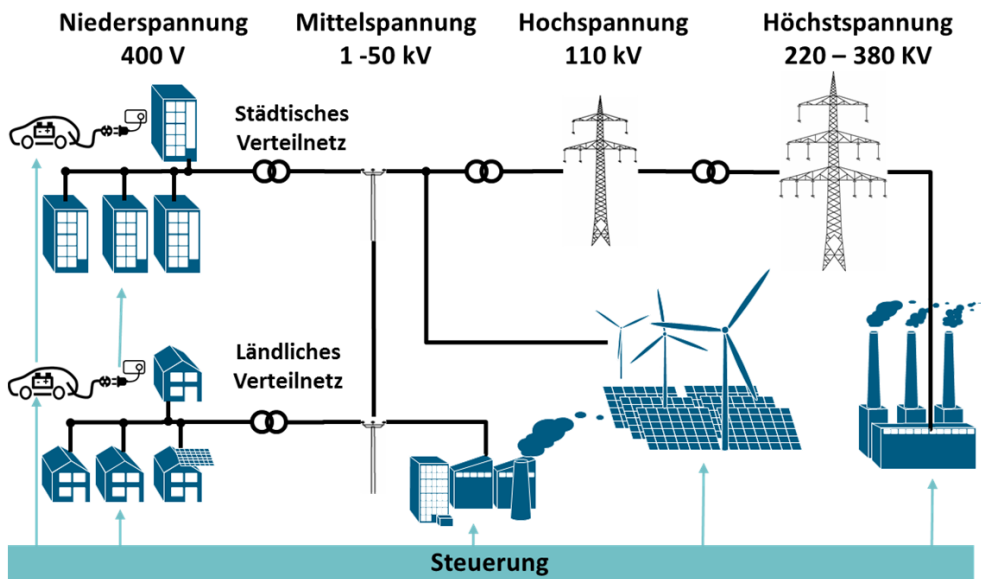
Zusammenfassend kann aus den gesichteten Studien für die vorliegende Analyse gefolgert werden, dass für private Nutzer durch eine größere elektrische Reichweite bei Angleichung der Anschaffungspreise zu konventionellen Fahrzeugen wesentliche Hemmnisse beseitigt werden können. Die analysierten Studien gehen außerdem davon aus, dass die alltägliche Nutzung der Elektrofahrzeuge der derzeitigen Nutzung konventioneller Fahrzeuge entspricht. Des Weiteren wird die Markteinführung von BEV als eher wahrscheinlich in Haushalten mit mehreren Pkw gesehen, in denen die Reichweitenbegrenzung durch einen vorhandenen weiteren Pkw ausgeglichen werden kann. Die Ableitung von Nutzungs- und resultierenden Ladeprofilen aus historischen Mobilitätsprofilen konventioneller Pkw ist somit valide.

### **III.6 Ladeoptionen der xEV**

Die bisherige Beschreibung des Status quo hat sich auf die Fahrzeuge und Komponenten sowie deren Nutzung konzentriert. Da die Elektromobilität durch den Ladevorgang eine enge Kopplung zum Stromsystem erfährt, wird folgend auf wichtige Trends beim Laden eingegangen. Die Einbindung der xEV an die Stromversorgung erfolgt über das Verteilnetz und wird daher als zusätzliche Last zu bereits bestehenden Nachfragen aufgeschaltet. Zudem können in Zeiten einer hohen Einspeisung durch erneuerbare Stromerzeuger die Elektrofahrzeuge zur lokalen Nutzung des Stroms eingesetzt werden. Abbildung III-14 zeigt schematisch die Integration von

xEV in das bestehende Stromversorgungssystem. Da die Schwerpunkte der vorliegenden Forschungsarbeit auf der Analyse von möglichen Ladeprofilen und einer Szenarioanalyse des gesamten Energiesystems liegen, stehen Fragen der Netzbelastung nicht im Vordergrund. An dieser Stelle sei auf die vertiefende Studien z. B. [Nobis, 2016] oder [Götz, 2016] verwiesen.

**Abbildung III-14: Schematische Darstellung der xEV als Element der Stromversorgung**



Quelle: eigene Darstellung

Zum Laden der Fahrzeugbatterie muss während der Standzeiten der Fahrzeuge eine Verbindung mit dem Verteilnetz hergestellt werden, um die elektrische Energie an die Batterie übergeben zu können. Diese Ladevorgänge erfolgen derzeit ausschließlich durch konduktives Laden per Kabel und Stecker-Buchse-Verbindungen. Im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit wird daher ausschließlich das konduktive Laden betrachtet. Die induktive Ladung von Elektrofahrzeugen ist erprobt und robust, erfährt aber derzeit aus Gründen der Effizienz und Kosten keine nennenswerte Verbreitung. Da die Ladevorgänge bei den xEV bedingt durch die geringe Reichweite der Fahrzeuge und lange Ladezeiten deutlich häufiger erfolgen müssen als der Tankvorgang von Verbrennungsmotor-Pkw, ist eine einfache und sichere Anwendung zwingende Voraussetzung für eine hohe Kundenakzeptanz.

Die Stecker-Belegung und Kommunikation inklusive Kommunikationsprotokolle sind weltweit standardisiert. Bedingt durch frühzeitige Standardisierungsaktivitäten konnte die Zahl der weltweit etablierten Systeme gering gehalten werden. Der Aufbauprozess der öffentlichen Ladeinfrastruktur wurde dadurch vereinfacht. Die Konzeption der Ladepunkte ist in der Norm IEC 61851 festgeschrieben. Dabei wird zwischen den in Tabelle III-3 gezeigten Lademodi unterschieden. Die vier Lademodi unterscheiden sich durch den Netzanschluss, das Kommunikations-



konzept und die maximal mögliche Ladeleistung. Den Lademodi werden in der Tabelle typische Ladeorte zugeordnet. Die in der Analyse betrachtete Heimladung von Fahrzeugen wird durch die Ladebetriebsarten Mode1 und Mode2 abdeckt.

**Tabelle III-3: Lademodi nach IEC-61851-1, typische Ladeleistungen und Ladeorte**

Lade-modus	Ladepunkt, IKT	Ladeorte	Typische Ladeleis-tungen
<b>Mode1</b>	Langsame Ladung an Haushaltssteckdosen mit Schutzkontakt (Schuko- oder CE-Steckdose); keine IKT-Anbindung	Heimladen ohne Zählpunkt, Abrechnungssystem oder Ladesteuerung	2 -3,7 kW, 230 V Wechselstrom mit maximalem Strom von 16A; keine Pilotfunktion
<b>Mode2</b>	Wallbox mit ein- bis dreiphasiger Ladung; steckerseitig fest codiertes Signal; Kommunikation xEV und Ladestelle	Einfache oder steuerbare Netzanbindung in rein privaten oder Gemeinschaftsgaragen; Abrechnung- oder Ladesteuerung möglich; Kommunikation xEV und Ladestelle	3,7 bis 22 kW, ein- oder mehrphasiger Anschluss bis 32 A; Pilotfunktion
		Firmengelände oder Parkplätze im semi-öffentlichen oder öffentlichen Bereich; Abrechnung- oder Ladesteuerung möglich	
<b>Mode3</b>	Ladung mit spezifischen Ladestecksystemen für Elektrofahrzeuge; Kommunikation xEV und Ladestelle	Halböffentliche Ladepunkte auf öffentlich zugänglichen Flächen im Privatbesitz wie z. B. Supermarktparkplätzen oder Parkhäusern	290 V / 250 A, Wallbox oder Ladesäule), mit Pilot- und Kontrollkontakt
		Im öffentlichen Raum befindliche Ladepunkte, zum Beispiel für Laternenparker oder an zentralen Stellen	
<b>Mode4</b>	DC-Schnellladung mit Steuerung durch ein externes Ladegerät; Kommunikation xEV und Ladestelle	Öffentlich an wenigen für Langstreckenmobilität wichtigen Punkten z. B. Autobahn-Raststätten oder Autohöfe	Schnellladepunkte DC bis 60 kW (ggf. bis 100 kW) bis 600 V 400 A mit externem Ladegerät

Quelle: nach IEC-61851-1, eigene Darstellung

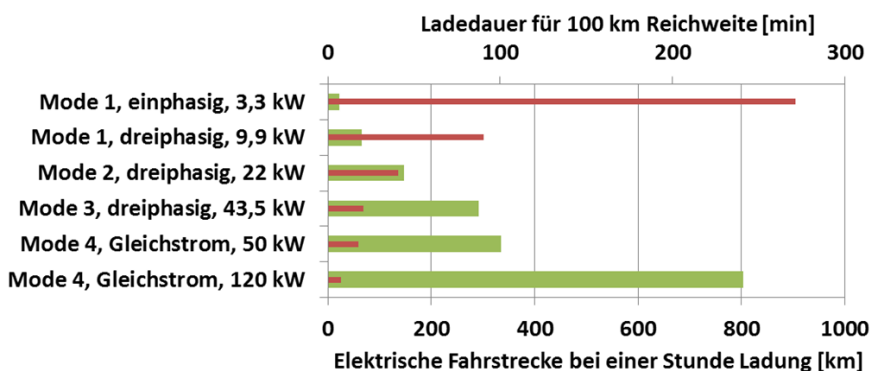
Bei den Ladeanschlüssen ist zu unterscheiden zwischen dem Anschluss auf privatem, gewerblichen oder öffentlichem Gelände. Beim Anschluss am eigenen Stellplatz ist in der Basisvariante kein separates Zähl- und Abrechnungssystem erforderlich und eine relativ kostengünstige Installation ausreichend. Bei einigen heute erhältlichen xEV genügt die standardmäßig in der Hausinstallation integrierte Schutzkontakt-Steckdose. Mittelfristig ist zu erwarten, dass Wallboxen (wandhängende Einheit) installiert werden, die eine Kommunikation zwischen dem

Ladepunkt und dem Fahrzeug ermöglichen. Die Kommunikation ist eine Voraussetzung für die Steuerung von Ladevorgängen. Demgegenüber erfordern gewerbliche Ladepunkte (z. B. am Einkaufsmarkt oder an der Arbeitsstelle) oder öffentliche Ladesäulen einen Anschlusspunkt mit Zugangskontrolle, ein Zähl- und Abrechnungssystem und ein Schutzsystem (z. B. gegen unberechtigtes Ziehen der Steckverbindung).

Wie bereits beschrieben, werden bei den derzeit marktverfügbaren BEV und PHEV ausnahmslos Lithium-Ionen-Traktionsbatterien eingesetzt. Bei diesem Batterietyp wird eine Kombination aus Konstant-Strom- und mit anschließendem Konstant-Spannungsladeverfahren eingesetzt. In der ersten Phase der Ladung wird mit einem konstanten Strom geladen. Bedingt durch die hohen Batteriekapazitäten und den daraus resultierenden hohen möglichen Ladeleistungen ist in den allermeisten Fällen die verfügbare Ladeleistung des Ladepunktes der limitierende Faktor. Bei Erreichen einer Ladeschlussspannung wird durch das Batteriemanagementsystem (BMS) auf eine Ladung mit Konstant-Spannung umgeschaltet. Die Phase der Konstant-Stromladung endet bei ca. 80 % des Ladezustands [Günther et al., 2010] und ist damit für den größten Teil der geladenen Energiemenge bestimmend. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird für die Analyse der Ladevorgänge somit von der Annahme einer durch die Ladestelle vorgegebenen konstanten Ladeleistung ausgegangen.

Damit bestimmt die an der Ladestelle netzseitig verfügbare maximale Leistung die Dauer des Ladevorgangs. Abbildung III-15 vergleicht verschiedene gängige Ladeleistungen bezüglich der Dauer für 10 km Reichweite bzw. Fahrstrecke bei einer Stunde Ladezeit. Unterstellt wird ein BEV mit einem Strombedarf von 14,9 kWh/100km. Dieser Wert wird in dieser Forschungsarbeit als mittlerer realer Verbrauch für einen Pkw im Jahr 2030 angenommen und entspricht den Werten der Studie von [Arndt et al., 2016].

**Abbildung III-15: Vergleich von Ladezeiten und Fahrstrecken für verschiedene Ladeleistungen im Vergleich**



Quelle: eigene Berechnungen

Laut einem Bericht einer Arbeitsgruppe zu Ladeinfrastruktur und Netzintegration der nationalen Plattform Elektromobilität [NPE, 2015] können aus den Erfahrungen der Demonstrationsvorha-

ben „Schaufenster Elektromobilität“ und „Modellregionen“ folgende drei Kategorien für das Ladeverhalten von xEV-Nutzern abgeleitet werden .

### Regelmäßige Nachtladung (privat / öffentlich)

Die xEV werden vorwiegend an Standorten mit hohen Standzeiten geladen. Hohe Standzeiten werden vorwiegend am Wohnort und am Stellplatz beim Arbeitgeber erreicht. Die Installation von Ladeoptionen am privaten Stellplatz der Fahrzeuge ist meist einfach möglich und erfordert kein aufwendiges Abrechnungs- und Zugangskontrollsystem. Eine Ladeoption beim Arbeitgeber erfordert in der Regel ein Zugangskontroll- und Abrechnungssystem und ist somit mit höherem Aufwand verbunden. Zudem werden die Stellplätze beim Arbeitgeber nur an einem Teil der Wochentage genutzt. Dies gilt insbesondere für Teilzeitbeschäftigte oder Lösungen mit Home Office.







### Schnellladung (öffentlich)

Mit Schnellladepunkten (Mode 3 und 4) kann die begrenzte Tagesreichweite der xEV erweitert werden. Sie ermöglichen Fahrtweiten, welche die elektrische Batteriereichweite überschreiten. Die Schnellladung dient damit zur Erweiterung der xEV-Einsatzbereiche jenseits der alltäglichen Fahrten und gestattet eine Erhöhung der Flexibilität von xEV. Eine weitere wichtige Funktion, welche insbesondere die Akzeptanz beim Nutzer erhöhen soll, ist das Notfall-Laden, falls unerwarteter Ladebedarf zum Beispiel durch nicht geplante Fahrten oder Ereignisse auftritt.

### Zwischendurchladung (öffentlich)

Neben den hohen Standzeiten am Wohnort oder beim Arbeitgeber weist die Pkw-Nutzung mögliche Standzeiten über den Tag bei zwischenzeitlichen Stopps beim Einkaufen oder bei Freizeitaktivitäten auf. Die Zwischenladung (Mode 2 und 3) mit eher dezentralen Anordnungen der Ladeoptionen ergänzt an Einkaufsorten, Parkhäusern etc. das eher zentral ausgerichtete Schnellladernetz. Diese Ladeoptionen werden bei sich ergebenden Gelegenheiten genutzt. Eine täglich wiederkehrende Nutzung ist eher selten.

**Abbildung III-16: Mögliche Ladeoptionen an verschiedenen Standorten**

Verteilung Ladevorgänge	Privater Aufstellort 85%			Öffentlich zugänglicher Aufstellort 15%		
Typische Standorte für Ladeinfrastruktur						
	Einzel- / Doppelgarage bzw. Stellplatz beim Eigenheim	Parkplätze bzw. Tiefgarage von Wohnanlagen, Mehrfamilienhäusern, Wohnblocks	Firmenparkplätze / Flottenhöfe auf eigenem Gelände	Autohof, Autobahn-Raststätte	Einkaufszentren, Parkhäuser, Kundenparkplätze	Straßenrand / öffentliche Parkplätze

Quelle: [NPE, 2015]

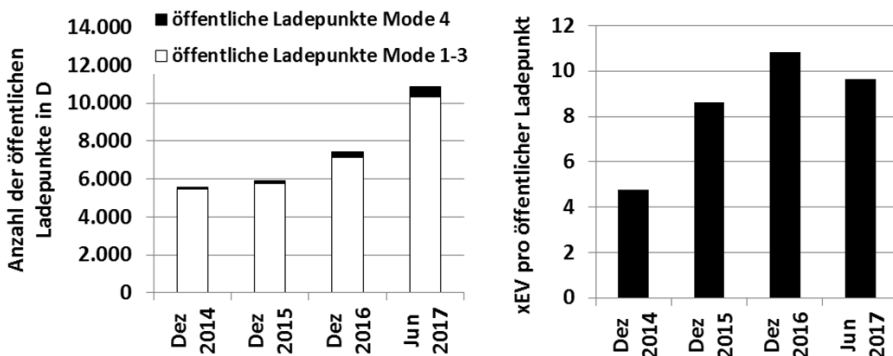
Zusammenfassend zeigt Abbildung III-16 die möglichen Aufstellorte von Ladeoptionen. Die Standorte können hierbei privat, gewerblich oder öffentlich sein. Die Autoren der Studie [NPE, 2015] kommen zu dem Schluss, dass 85 % der Ladevorgänge auch in der Zukunft an privaten Aufstellorten durchgeführt werden könnten. Der Schwerpunkt wird hierbei in der Ladung am nächtlichen Stellplatz gesehen. Für neun von zehn geplanten Fahrten ist die Reichweite der derzeitigen BEV-Modelle vollkommen ausreichend und eine untertägige Nachladung der Fahrzeuge nicht notwendig.

Der einfacher Zugang zu öffentlicher Ladeinfrastruktur ist ein wichtiges Kriterium für die Nutzerakzeptanz. Zur Umsetzung der EU-Richtlinie zum Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe müssen ab 2017 alle neu errichteten öffentlich zugänglichen Ladepunkte mit einem Ad-hoc-Zugang ausgestattet sein. Dieser ermöglicht das Laden ohne Fahrstromvertrag mit einem Energieversorger. Als Abrechnung können dazu verschiedene Systeme wie SMS, Kreditkarte, Smartphone-Apps oder spezielle Chipkarten dienen. [NPE, 2015]

Eine flächendeckend verfügbare Ladeinfrastruktur wird auf der einen Seite als notwendige Voraussetzung für die Marktpenetration der Elektromobilität gesehen. Auf der anderen Seite geht die Präferenz in Richtung privater Ladung zu Hause oder halböffentlicher Ladung beim Arbeitgeber [Stöckl, 2014] (vgl. Abbildung III-16). Dieser Umstand gestaltet die Entwicklung von möglichen Geschäftsmodellen an öffentlichen Ladepunkten schwierig, da von einer niedrigen Auslastung dieser Infrastruktur ausgegangen werden muss.

Eine im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführte Analyse der bereits installierten Ladeinfrastruktur gibt Aufschluss über den Status Quo. Abbildung III-17 zeigt die vom Bundesverband der Elektrizitäts- und Wasserwirtschaft (BDEW) erhobene Statistik zu den installierten Ladepunkten in Deutschland. Sie basiert auf einer regelmäßigen Befragung der Mitgliedsunternehmen sowie der Mitglieder der Nationalen Plattform Elektromobilität. Als Ladepunkt wird jeweils ein Steckplatz definiert. Eine Ladestelle kann mehrere Ladepunkte aufweisen.

**Abbildung III-17: Entwicklung der Ladestellen in Deutschland, 2014 bis 2017**



Quelle: [BDEW, 2017], eigene Darstellung

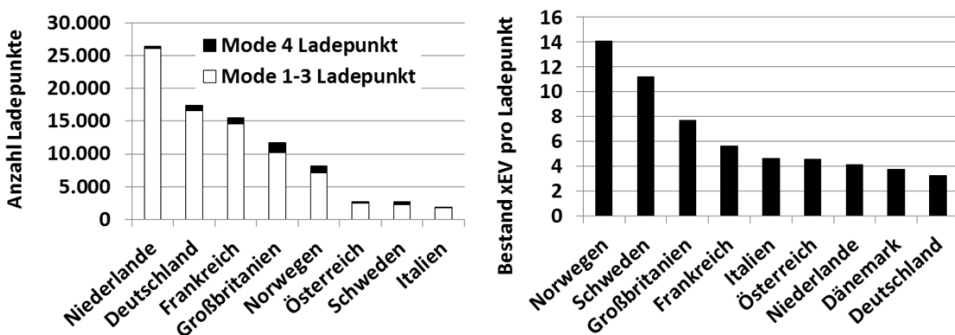
Ende Juni 2017 waren nach dieser Statistik insgesamt knapp 11.000 Ladepunkte öffentlich verfügbar. Zusammengenommen mit dem Bestand der Elektrofahrzeuge (vgl. Kapitel III.3) ergibt sich ein steigendes Verhältnis von xEV pro Ladestelle bis Ende 2016. Danach fällt das mittlere Verhältnis von xEV pro Ladesäule leicht ab. Dies ist ein Resultat von unterschiedlichen Entwicklungen beim Aufbau der öffentlichen Ladepunkte und des Bestands an Elektrofahrzeugen.

Die Bundesnetzagentur hat Mitte April 2017 eine Liste und eine Karte mit öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur veröffentlicht [Bundesnetzagentur, 2017]. In dieser Karte sind nur die Ladepunkte erfasst, welche im Rahmen der Ladesäulenverordnung (LSV) als öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur in Deutschland gemeldet wurden. Die im März 2016 in Kraft getretene Ladesäulenverordnung schreibt den Betreibern von Normal- und Schnellladepunkten eine schriftliche Meldung von neu installierten Ladesäulen oder der Außerbetrieb-Setzung von bestehenden Ladesäulen vor. Die Ladepunkte sind differenziert nach Ladeleistungen und geografisch verortet. Ladepunkte, die vor dem Zeitpunkt des Inkrafttretens der LSV installiert waren, werden dementsprechend nicht systematisch erfasst. Dieser Umstand erklärt die teilweise sehr großen Diskrepanzen bei der Erfassung der verfügbaren Ladestellen in Deutschland.

Verschiedene Internetportale, bei denen die Ladestellenbetreiber selbst ihr Daten einstellen, weisen deutlich höhere Zahlen an Ladepunkten und -stellen auf. Der Kritikpunkt hier ist, dass teilweise auch semi-öffentliche oder sogar private Ladestellen gemeldet werden, die für Nutzer nur eingeschränkt verfügbar sind. Das Portal Goingelectric.de weist für Deutschland 5.850 Ladestellen mit 18.053 Ladepunkten für das erste Quartal 2017 aus. ChargeMap.com gibt für den gleichen Zeitpunkt 6.564 öffentlich zugängliche Ladepunkte mit verfügbaren 18.448 Ladepunkten an. Allen Informationsportalen und Statistiken ist gemein, dass sie eine signifikante Steigerung der Ladepunkte in Deutschland in den letzten beiden Jahren verzeichnen.

Ein Vergleich des Status Quo in Deutschland mit anderen europäischen Ländern (Abbildung III-18) zeigt, dass Deutschland im europäischen Vergleich eine gute Ausstattung mit Ladestellen auch bezogen auf den xEV-Bestand aufweist.

**Abbildung III-18: Status Quo der öffentlichen Ladepunkte in ausgewählten Ländern der EU und EFTA im Jahr 2016**



Quelle: [EAFO, 2017]

Während sich in Norwegen im Schnitt ca. 14 xEV einen öffentlichen Ladepunkt teilen, kommen in Deutschland nur knapp über 3 xEV auf einen Ladepunkt.

Die Zahl der privaten Ladepunkte ist derzeit nicht bekannt und schwer zu ermitteln, da es keine einheitliche Erfassung gibt. Dies wird sich bei steigender Durchdringung ändern, da insbesondere die Verteilnetzbetreiber bei den Überlegungen zur Ladesteuerung und Genehmigung von Ladestellen involviert werden müssen.

Die EU-Direktive 2014/94 (Alternative Fuels Infrastructure Directive) fordert einen gezielten Infrastrukturausbau für alternative Kraftstoffe in den Mitgliedstaaten. Neben der Erweiterung der Ladepunkte für xEV wird auch eine Ausweitung der Tankstellennetze für Flüssigerdgas (LNG), für komprimiertes Erdgas (CNG) und für Wasserstoff gefordert. Zudem soll die europaweite Standardisierung der Betankungs- und Ladesysteme deutlich vorangetrieben werden. Die EU-Direktive sieht für die Elektromobilität ein einheitliches Ladesystem für das Gebiet der EU vor. Dies ist für den grenzüberschreitenden Verkehr mit Elektrofahrzeugen und die Entwicklung eines gemeinsamen Fahrzeugmarktes für xEV wichtig.

Die Zeitvorgaben, bis wann die Tankstellennetze ausgebaut sein müssen, variieren je nach Kraftstoff, Fahrzeugart und Einsatzgebiet zwischen 2020 und 2030. Als ungefähre Zielvorgabe werden eine Ladestation pro zehn Elektroautos, alle 400 km eine LNG- und alle 150 km eine CNG-Station genannt. Die Mitgliedstaaten mussten bis Ende 2016 ihre Ziele zur Umsetzung der Richtlinie definieren und veröffentlichen sowie eine nationale Strategie vorlegen.

Die Bundesregierung hat entsprechend der EU-Direktive Ende des Jahres 2016 den nationalen Strategierahmen für den Ausbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe auf den Weg gebracht [BMVI, 2016b]. Dieser Plan sieht für den flächendeckenden Ausbau der Ladeinfrastruktur ein Netz von 5.000 Schnellladeoptionen (Mode 3 und Mode 4) sowie die Errichtung von 10.000 öffentlichen Normalladestellen (Mode 2) bis 2020 vor. Es sollen alle der derzeit über 400 Autobahnraststätten mit Schnellladeoptionen ausgestattet werden. Ende 2016 waren bereits 60 Schnellladestellen an Autobahnraststätten installiert. Wie bereits beschrieben, stellt der Bund dafür 300 Mio. € Fördermittel zur Verfügung. Weiterhin wurde ein Förderprogramm für den kommunalen Aufbau der Ladeinfrastruktur aufgelegt.

Die Steuerung der Ladevorgänge wird derzeit als wichtige Option diskutiert, um die Elektromobilität besser in das bestehende System von Erzeugung und Verteilung integrieren zu können und somit Bestandteil der Sektorkopplung zu werden. Dabei sind verschiedene Strategien zur Steuerung der Ladung denkbar. Tabelle III-4 enthält mögliche Ladestrategien, deren Ziele, Anforderungen sowie Vor- und Nachteile.

Alle Ladestrategien bis auf die nutzerorientierte Variante erfordern eine Installation einer IKT-Infrastruktur inklusive eines Aggregators, der die Steuerungsstrategien entsprechend den Kriterien umsetzt. Wer die Rolle des Aggregators in der Zukunft übernehmen soll, ist derzeit Untersuchungsgegenstand von Entwicklungsarbeiten. Die Ladestrategien „Nutzer-orientiert“ und „Netz-orientiert“ werden im Rahmen der Analyse der Ladeleistung-Tagesgänge von privaten xEV-Nutzer untersucht, da diese sehr unterschiedliche Anforderungen an die Stromerzeugung und -verteilung aufweisen.

**Tabelle III-4: Beschreibung möglicher Ladestrategien**

Ladestrategie	Beschreibung	Ziele und Anforderungen	Vor- und Nachteile
<b>Nutzer orientiert</b>	Maximierung der xEV-Reichweite durch sofortiges Laden	Keine Verschiebung der Ladung; keine IKT notwendig	+ Keine Nutzungseinschränkung xEV durch verzögertes Laden -Hohe Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen -Ladeleistungspeak zeitgleich mit Nachfragepeak der Haushalte
<b>Erneuerbar orientiert</b>	Verringerung der Emissionen bei der Stromerzeugung und Erhöhung des EE-Anteils	Verschiebung der Ladung in Zeiten hoher EE-Stromerzeugung / Überschuss-Situationen; IKT im Übertragungs- und Verteilnetz	+ Reduzierung der fossilen Stromerzeugung + Verbesserte Integration der EE-Stromerzeugung - Örtlich sehr unterschiedliche Potenziale - Deutliche Einschränkung der xEV-Nutzung
<b>Kosten orientiert</b>	Optimierung der Kosten des Strombezugs	Verschiebung der Ladung in Zeiten niedriger Strompreise; IKT im Übertragungs- und Verteilnetz	+ Kostengünstige Ladung der xEV + Glättung der Nachfrage durch Offpeak-Zeiten mit niedrigen Strompreisen - Mögliche Verschiebung hin zur fossilen Stromerzeugung
<b>Netz orientiert</b>	Vermeidung von Netzengpässen, von Überlastung Betriebsmittel, von Spannungsabfällen	Glättung der Netzbelastung durch Verschiebung der Ladung in Offpeak-Zeiten; IKT im Verteilnetz	+ Erhöhung der Netzstabilität, + Vermeidung von Netzausbau - mögliche Verschiebung hin zur fossilen Stromerzeugung

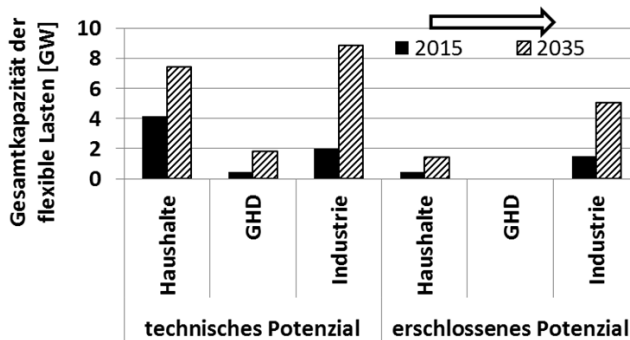
Quelle: eigene Darstellung

Die Darstellung der verschiedenen Ladestrategien von xEV verdeutlicht, dass eine deutliche Flexibilisierung von Ladevorgängen möglich ist. Wie hoch die Bereitschaft der Nutzer zur Teilnahme an solchen Laderegeln ist, ist derzeit nicht bekannt. Eine erste Einschätzung dazu liefert [Geske, 2014]. Bedingt durch die hohen Standzeiten der Fahrzeuge (vgl. Kapitel V.2.1) und die damit einhergehende Möglichkeit zur Verschiebung von Ladevorgängen über einen Tag, der erwarteten hohen Fahrzeugzahlen und der sich daraus ergebenden hohen Gesamtleistung ist ein Vergleich mit Flexibilitäten in anderen Sektoren interessant.

Eine Studie von [Frontier Economics, 2014b] analysiert die Potenziale des Lastmanagements in den Sektoren Industrie, Gewerbe / Handel / Dienstleistung (GHD) und Haushalte. Die Potenziale werden hierbei nach den Kosten der Erschließung der Flexibilitäten ausgewählt und ein Szenario bis zum Jahr 2035 entwickelt. Es wird zwischen den bereits erschlossenen und den technisch möglichen Potenzialen unterschieden. Abbildung III-19 zeigt die Ergebnisse für das Lastreduktionspotenzial. Für den Sektor der Haushalte (ca. 8 GW) wird ein ähnlich hohes technisches

Potenzial wie für die Industrie (ca. 9 GW) errechnet. Für ein Lastmanagement mit Elektrofahrzeugen mit einem angenommenen Bestand von 6 Mio. xEV (Mode 1 Ladung) ergibt sich ein rechnerisches Potenzial von knapp 4 GW. Unterstellt wird dabei eine Beteiligung von 20 % der xEV-Nutzer an einer Flexibilitätsregelung. Restriktionen im Verteilnetz sprechen jedoch gegen die volle Erschließung des Potenzials.

**Abbildung III-19: Entwicklung der Lastreduktionspotenziale nach Sektoren**



GHD: Gewerbe, Handel und Dienstleistung

Quelle: eigene Darstellung nach [Frontier Economics, 2014a]

Für eine vertiefende Analyse des Lastverschiebungspotenzials wird z. B. auf die Studien [Stöckl, 2014], [Heinrichs, 2013] verwiesen.

### III.7 Zusammenfassung Status Quo

Die Analyse des Stands der Technik und der Trends bei den Antriebskonzepten zeigt klar den Stellenwert der Batterietechnik. Diese entscheidet wesentlich über Performance, Reichweiten und Kosten der Fahrzeuge. Die Weiterentwicklung der Li-Ionen-Technik und neue lithiumbasierte Systeme haben das Potenzial, batterie-elektrische Fahrzeuge weiter an die Kundenbedürfnisse anzupassen.

Eine Analyse des derzeitigen xEV-Marktes lässt zum Zeitpunkt der durchgeführten Arbeit nur eine sehr geringes Käuferinteresse erkennen. Die Anzahl der angebotenen BEV und insbesondere der PHEV steigt deutlich an und es gibt einen deutlichen Trend in Richtung höhere Reichweiten, höhere Fahrzeugsegmente und PHEV. Die Analyse der Nutzerperspektive liefert Hinweise zu möglichen Parametern, welche die Kundenakzeptanz fördern. Neben den elektrischen Reichweiten und dem Fahrzeugpreis wird auch der Zugang zu einer gut ausgebauten Ladeinfrastruktur angeführt. Außerdem wird die Flexibilität der Fahrzeugnutzung als wichtiges Kriterium angesehen. Daraus entsteht eine Diskrepanz zwischen gewünschten Reichweiten und tatsächlichem Bedarf an Tagesfahrleistungen, der die Marktpenetration derzeit negativ beeinflusst. Die gestarteten Anreizsysteme sind vielfältig und haben eine Markteinführung ermöglicht. Bisher haben die Maßnahmen aber die Kundenakzeptanz in Deutschland noch nicht deutlich beeinflussen können.



Als Ladeoption hat sich die konduktive Ladung durchgesetzt. Das Laden am nächtlichen Stellplatz mit moderaten Leistungen zeichnet sich als bestimmende Ladeoption ab. Öffentliche Ladepunkte erhöhen die Akzeptanz der xEV, tragen aber nur unwesentlich zur Erhöhung der maximalen Tagesfahrleistungen der Nutzer bei. Der Vorteil der öffentlichen Ladeinfrastruktur mit höheren Leistungen liegt in der Nutzungserweiterung der Fahrzeuge bei nicht geplanten Fahrten. Die Möglichkeiten zur Refinanzierung der hohen Investitionen in eine öffentliche Ladeinfrastruktur sind derzeit durch erhebliche Unsicherheiten bezüglich der Auslastung dieser Ladeoption unklar.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die Elektromobilität einen Beitrag zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Minderung von Emissionen leisten kann. Die derzeitigen Entwicklungen lassen allerdings eine Einschränkung auf den Einsatz im Pkw-Bereich und im städtischen Straßengüterverkehr mit leichten Lkw erkennen. Der Schwerlastverkehr auf der Straße über mittlere und lange Strecken muss durch weitere Optionen wie z. B. Oberleitungsfahrzeuge oder strombasierte, flüssige Kraftstoffe erschlossen werden.

## IV. Analyse der Ist-Situation der privaten Pkw-Nutzung

Startpunkt für die Entwicklung eines Modellansatzes zur Abbildung des Ladeverhaltens von privaten xEV-Nutzern mit zeitlicher Auflösung und des darauf aufbauenden Data-Mining-Verfahrens zur Clusterung von nutzungshomogenen Gruppen ist eine Zusammenstellung von verfügbaren empirischen Daten zum Mobilitätsverhalten von Personen und zum Verkehr. Diese werden einer Eignungsbewertung bezüglich der Fragestellung unterzogen. In Anlehnung an [Becker et al., 1999] wird im Rahmen der Forschungsarbeit unter Mobilität die allgemeine Beweglichkeit von Personen zur Befriedigung von Bedürfnissen verstanden. Der Verkehr ist das Instrument, welches die Realisierung der Mobilität ermöglicht. Das Verkehrssystem umfasst die Fahrzeuge, die notwendige Kraftstoffversorgung und die Verkehrswege.

Da die Erfassung der Daten zur Mobilität und des resultierenden Verkehrs nur für bestimmte Teilbereiche erfolgt, sei eine Definition und Abgrenzung des im Rahmen der Arbeit untersuchten privaten Pkw-Verkehrs voran gestellt. Der öffentliche Straßenverkehr findet auf öffentlich-rechtlichen Verkehrsflächen statt und dient der Beförderung von Personen und Gütern. Als Verkehrsteilnehmer werden diejenigen bezeichnet, welche diese Flächen benutzen. Verkehr, der auf privatem oder gewerblichem Gelände stattfindet, zählt zum nicht öffentlichen Verkehr und wird statistisch derzeit nur unzureichend erfasst. Teilnehmer des Straßenverkehrs sind im Wesentlichen Fußgänger, Fahrräder und Kraftfahrzeuge. Der Straßenverkehr bildet zusammen mit dem Luft-, Schienen- und Wasserverkehr das System des materiellen Verkehrs. [Nuhn & Hesse, 2006]

Abbildung IV-1 zeigt eine mögliche Aufteilung des Straßenverkehrs mit Kraftfahrzeugen. Der Straßenverkehr mit Kraftfahrzeugen ist im Vergleich zum Fußgänger- und Fahrrad-Verkehr vergleichsweise gut erfasst. Die hier vorgestellten Erhebungen von Mobilitäts- und Verkehrsdaten beschränkt sich auf den öffentlichen Straßenverkehr mit Kraftfahrzeugen. Der dunkelgrau hinterlegte Bereich kennzeichnet den Untersuchungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Der Wirtschaftsverkehr (hellgrau hinterlegter Bereich) wird nicht im Detail analysiert. Lediglich die Übertragbarkeit der Modellansätze für private Nutzer auf gewerbliche Nutzer von Pkw und leichten Lkw wird in Kapitel VI.5 diskutiert.

**Abbildung IV-1: Aufteilung der Verkehre und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes**

Immaterieller Verkehr	Materieller Verkehr				
	Personenverkehr		Güterverkehr		
Datenverkehr durch Kommunikation und Information	Privater Personenverkehr	Wirtschaftsverkehr			Privater Güterverkehr
	Berufs-, Einkaufs-, Freizeitverkehr,...	Personenwirtschaftsverkehr	Dienstleistungsverkehr	Güterwirtschaftsverkehr	Privater Umzugs-, Entsorgungsverkehr

Quelle: nach [Arndt et al., 2016], eigene Darstellung

Derzeitige Studien oder Erhebungen verwenden unterschiedliche Definitionen des motorisierten Individualverkehrs und im Speziellen des privaten Pkw-Verkehrs. Im Rahmen der vorliegenden Analyse wird der private Personenverkehr definiert als alle Ortsveränderungen von Personen, die weder erwerbswirtschaftlichen noch dienstlichen bzw. geschäftlichen Zwecken dienen. Der private Pkw-Verkehr wird dabei als Bestandteil des privaten Personenverkehrs verstanden. Ein Pkw kann sowohl im Privatverkehr als auch im Wirtschaftsverkehr eingesetzt werden. Wichtig für die Zuordnung ist der Hauptzweck der Pkw-Fahrt. Dies ergibt die Schwierigkeit, dass sowohl private als auch gewerblich zugelassene Pkw Fahrstrecken im Privatverkehr und auch im Wirtschaftsverkehr zurücklegen können.

Um eine Vorauswahl von geeigneten Mobilitäts- und Verkehrserhebungen treffen zu können, werden folgende Kriterien angewendet:

- Öffentliche Verfügbarkeit der Daten
- Stichprobenumfang der Erhebung
- Periodizität der Datenerhebung zur Aktualisierung und Trendanalyse
- Repräsentativität der Erhebung
- Zeitlich aufgelöste Erfassung der Verkehrswege im Tagesverlauf
- Erfassung von Nutzerdaten von Pkw

Generell lässt sich festhalten, dass die quantitative Erfassung und die Datenverfügbarkeit gut sind. Derzeit kann auf mehrere Primärerhebungen auf Basis von Befragungen, Messungen und Zählungen zurückgegriffen werden kann.

Als Ergebnis einer umfangreichen Recherche von möglichen Datenquellen, die eine vertiefende Charakterisierung der privaten Pkw-Nutzung erlauben, werden die in Tabelle IV-1 gelisteten Erhebungen unter Berücksichtigung der genannten Kriterien ausgewählt. Bei den Erhebungen handelt es sich ausschließlich um Studien, welche durch das Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) initiiert und finanziert werden. Es kann daher von einer qualifizierten Erhebung, Prüfung und Auswertung der Daten bei gleichzeitiger Kontinuität ausgegangen werden.

**Tabelle IV-1: Auswahl geeigneter Datenerhebungen für die Fragestellung**

<b>Datenerhebung</b>	<b>Quelle</b>
Mobilität in Deutschland 2008	[infas & DLR, 2009]
Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010	[WVI & BMVBS, 2012]
Mobilitätspanel	[IfV-KIT & TNS, 2016]
Fahrleistungserhebung 2002	[Hautzinger et al., 2005]

Quelle: eigene Recherche

Die „Clearingstelle Verkehr“ ist der zentrale Ansprechpartner für die kontinuierlichen Erhebungen Mobilitätspanel (MOP), Mobilität in Deutschland (MiD) und Kraftfahrzeuge in Deutschland (KiD) und organisiert u. a. Datenverfügbarkeit, Rücklauf und Koordination der Befragungswellen.

Bedingt durch den derzeitigen frühen Stand der Marktpenetration von xEV (vgl. Kapitel III.3) sind zum Erstellungszeitpunkt der vorliegenden Forschungsarbeit noch keine systematischen Erhebungen bezüglich batterie-elektrischer Pkw verfügbar. Mit steigenden Marktanteilen werden die Elektromobilität und ihre Spezifika aber Einzug in die Standarderhebungen finden.

Als Anmerkung sei an dieser Stelle auf die aktuelle Diskussion hingewiesen, ob die Erhebung von Primärdaten zum Pkw-Verkehr nicht durch vernetzte Fahrzeuge und eine Auswertung der Daten über eine zentrale Sammelstelle erfolgen kann. Dem stehen derzeit aber deutliche Bedenken zum Datenschutz entgegen, da durch die Bewegungsprofile ein sehr großer Bereich der persönlichen Privatsphäre betroffen ist. Es ist daher fraglich, ob solche Daten öffentlich verfügbar und nutzbar sein werden. Bedingt durch eine nicht sichergestellte Repräsentativität der Daten für bestimmte Gruppen von Pkw-Nutzern, können diese Daten nur eingeschränkt für wissenschaftliche Zwecke eingesetzt werden.

#### **IV.1 Beschreibung der Pkw-Mobilitätsstatistiken**

Basierend auf der Vorauswahl der Mobilitätsstatistiken werden im Folgenden die einzelnen Datenerhebungen kurz vorgestellt und einer weitergehenden Eignungsbewertung bezüglich der Fragestellung unterzogen. Bei der Eignungsprüfung wird auch auf Erkenntnisse aus weiteren Studien zur Bildung von Ladeleistungsprofilen (u.a. [Heinrichs, 2013], [Dallinger, 2012], [Pregger et al., 2012]) zurückgegriffen.

##### **IV.1.1 Mobilität in Deutschland**

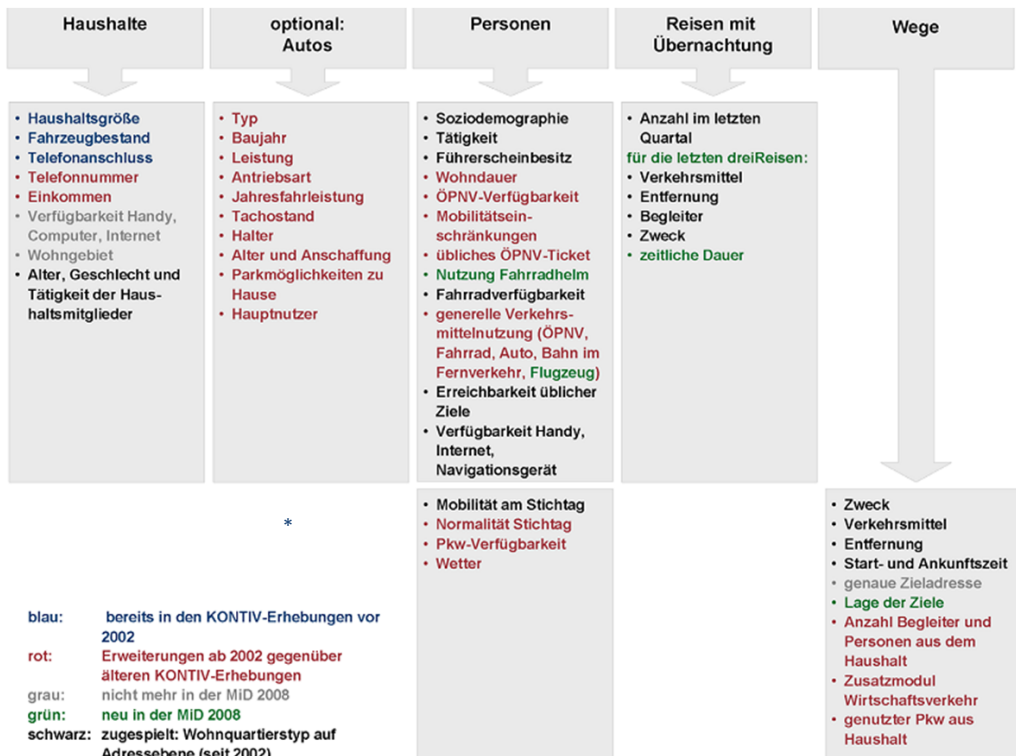
Die periodische Erhebung „Mobilität in Deutschland“ (MiD) ist eine repräsentative Erhebung des Mobilitätsverhaltens der in Deutschland lebenden Menschen. Ziel der Erhebung ist die Erfassung der privaten Alltagsmobilität. Ein wichtiger Bestandteil der Fragebogen- bzw. Telefonerhebung ist die Erfassung von zurückgelegten Wegen an einem Stichtag. Neben den beschreibenden Größen wie Weglänge, Uhrzeiten, Geschwindigkeiten werden zusätzlich die Wahl des Verkehrsmittels, der Zweck des Weges, Start und Zielorte erfragt. Zusätzlich zu diesen Daten werden sozioökonomische Merkmale der befragten Person und, haushaltstypisierende und siedlungsstrukturelle Merkmale erfasst. Die MiD ist die derzeit vom Stichprobenumfang her größte Querschnitterhebung zum Mobilitätsverhalten in Deutschland.

Die letzte veröffentlichte Erhebungswelle, die im Rahmen der Forschungsarbeit genutzt werden kann, stammt aus dem Jahr 2008 (Stand Mai 2018). Dabei wurden rund 25.900 Haushalte mit 60.700 Personen befragt und über 193.000 Wege, 34.600 Fahrzeuge und 36.200 Reisen erfasst. Durch den Vergleich mit der Vorgängererhebung im Jahr 2002, die ein weitgehend identisches Design hatte, können Veränderungen der wichtigsten Mobilitätskenngrößen ermittelt werden. Die nächste MiD-Erhebung fand im Jahr 2016 statt. Die Daten waren zum Abschluss der Arbeit noch nicht öffentlich verfügbar. Ein Vergleich der Modellierung von Ladevorgängen auf Basis der MiD 2002 und 2008 ist Bestandteil der Arbeit (siehe Kapitel V.4).

Bei der Erhebung werden siedlungsstrukturelle, haushaltsbeschreibende und soziodemografische Merkmale wie Einkommensverteilung und Altersstruktur bei der Auswahl der Probanden berücksichtigt und die Befragten gezielt danach ausgewählt. Dieses Vorgehen sichert eine hohe

Repräsentativität der Erhebung. Die Datensätze inklusive siedlungsstruktureller Daten dürfen für wissenschaftliche Zwecke ausgewertet werden. Der Datenschutz gebietet, dass bei den Auswertungen keine Rückschlüsse auf die einzelnen Befragten möglich sein dürfen. Die Analysen geben Hinweise auf typische Stand- bzw. Nutzermuster von Fahrern in Abhängigkeit von z. B. Wohn- oder Lebenssituation. Abbildung IV-2 gibt eine Übersicht der erfassten Daten.

**Abbildung IV-2: Befragungssystematik der Mobilität in Deutschland Studie 2008**



\*KONTIV: Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten (MiD-Vorgängerstudie)

Quelle: [infas & DLR, 2010a]

Von den über ca. 193.000 erfassten Wegen sind 94,0 % privat bedingt und erfüllen keine gewerblichen Zwecke. Sehr wohl sind jedoch die Wege zur Arbeitsstätte erfasst, welche als private Fahrten gelten. 37,6 % der privaten Wege wurden mit einem Pkw als Fahrer zurückgelegt. Die Erfassung von Fahrzeugdaten wie Hersteller, Antriebsart oder Abstellmöglichkeit des Fahrzeuges und deren Zuordnung zu den jeweiligen Wegen erfolgte für ca. 34.600 Pkw. Bedingt durch den Zeitraum der Erhebungswelle im Jahr 2008 wurde nur ein batterieelektrisches Fahrzeug in der gesamten Erhebung erfasst.

Die noch nicht veröffentlichten Daten und Ergebnisse der "Mobilität in Deutschland 2016" (MiD 2016) nehmen ausdrücklich neue Mobilitätsformen wie Carsharing, Elektromobilität und Fern-

busse mit in die Befragung auf. Innerhalb der einjährigen Erhebungswelle im Jahr 2016 wurden insgesamt 135.000 Haushalte bundesweit befragt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die Datenbasis aufgrund der Stichprobengröße, der Repräsentanz und der detaillierten Erfassung von Wegen über einen Stichtag gut für eine Abbildung des Ladeverhaltens der privaten Nutzung von xEV eignet. Die bereits erwähnten Studien zur Abbildung der Ladeleistung (vgl. Kapitel II) stützen sich zum Teil ebenfalls auf diese Erhebung. Als kritisch ist die Beschränkung auf einen Stichtag zu sehen, da so immer nur ein Längsschnitt der Nutzer über einen Tag gebildet und nicht nachvollzogen werden kann, ob sich das Nutzerverhalten an einem anderen Tag deutlich unterscheidet.

#### **IV.1.2 Kraftfahrzeuge in Deutschland**

Die periodische Erhebung „Kraftfahrzeuge in Deutschland“ (KiD) erfasst die Einsatzzwecke und Einsatzmuster von Fahrzeugen in Deutschland. Im Vordergrund der fahrzeugbezogenen Befragung stehen die Analyse des Straßenwirtschaftsverkehrs (vgl. Abbildung IV-1) und die Quantifizierung der Anteile der privaten bzw. gewerblichen Fahrzeugnutzung, Personen- und Güterverkehrsleistung, Wegstreckenentfernung und Fahrleistung. In der jüngst veröffentlichten Erhebung aus dem Jahr 2010 wurden 70.200 Fahrzeuge erfasst. Der Schwerpunkt lag dabei auf gewerblich genutzten Pkw und leichten Lkw mit einer Nutzlast von maximal 3,5 t.

Die Datenerhebung wird mit Hilfe eines Fragebogens zu einem vorgegebenen Stichtag erfasst. Als Auswahlbasis zur Bestimmung der Probanden wird das zentrale Fahrzeugregister des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) herangezogen. Die Auswahl der Stichprobe wird nach dem Kriterium der Repräsentativität im Vergleich zum Gesamtbestand aller Kraftfahrzeuge (Pkw und Lkw) ausgerichtet. Die Datensätze dürfen für wissenschaftliche Zwecke ausgewertet werden.

Eine Auswertung der Fahrleistungen nach verschiedenen Fahrzeugarten zeigt Tabelle IV-2. Sie lässt eine Hochrechnung der Jahresfahrleistung pro Fahrzeugart für das Jahr 2010 zu. Die Auswertung ermöglicht die Bestimmung des Anteile des privaten Verkehrs.

Die Fahrleistung des Pkw-Verkehrs mit privaten und gewerblichen Haltern dominiert deutlich die gesamte Fahrleistung mit 86 % gefolgt von den Lkw mit einer Nutzlast von kleiner 3,5 t (entsprechend 5,4 %). Die Fahrleistung, welche dem Privatverkehr zugerechnet werden kann, liegt für privat zugelassene Pkw bei knapp 88 % der gesamten Fahrleistung bzw. für gewerbliche Halter bei deutlich geringeren 35,7 %. Zusammengenommen ergibt sich dabei ein Anteil des privaten Verkehrs mit Pkw von 78,9 %. Im Vergleich zur Erhebung KiD aus dem Jahr 2002 [Wermuth et al., 2003] bleibt der Anteil der privaten Fahrleistungen nahezu unverändert.

Da der Schwerpunkt der KiD 2010 auf der Erfassung des Wirtschaftsverkehrs liegt, ist die Datenbasis für eine Modellierung der Ladeleistung von privaten Pkw nur bedingt nutzbar. Der Anteil der privaten Fahrten an den erfassten Fahrten beträgt nur 27,0 % und ungefähr die Hälfte der Fahrten davon werden mit Pkw zurückgelegt. Damit ergibt sich keine ausreichend hohe Stichprobengröße, um eine repräsentative Grundgesamtheit nachzubilden. Da die Erfassung bezogen auf die Fahrzeuge erfolgt, werden keine soziodemografischen oder haushaltsbestimmenden Merkmale der Nutzer erfasst.

**Tabelle IV-2: Auswertung der KiD 2010; mit Fahrzeugbeständen hochgerechnete Jahresfahrleistungen nach Fahrzeugart und deren Zuordnung zum Privatverkehr**

	Mo-Fr Gesamt- fahrleistung 2010 [Mio. km/a]	davon Anteil PV [%]	Sa-So Gesamtfahr- leistung 2010 [Mio. km/a]	davon Anteil PV [%]	Gesamt- fahrleistu- ng 2010 Mio. km/a	davon Anteil PV[%]
Krad private Halter	10.114	k. A.	5.299 <sup>1</sup>	k. A.	15.413	k. A.
Pkw gewerbliche Halter	73.501 <sup>1</sup>	31,4	10.951	64,6	84.452	35,7
Pkw private Halter	315.991	86,7 <sup>1</sup>	106.922 <sup>1</sup>	90,1 <sup>3</sup>	422.913	87,6 <sup>3</sup>
Lkw ≤ 3,5t NL gewerb. Halter	21.121	7,7	1.255	8,5	22.376	7,7
Lkw ≤ 3,5t NL private Halter	8.580	22,5	1.031 <sup>2</sup>	46,8 <sup>2</sup>	9.611	25,1
Lkw > 3,5t NL	11.269	1,2	682 <sup>1</sup>	0,1	11.951	1,1 <sup>1</sup>
Sattelzugmaschinen	16.399	0,5	1.085 <sup>1</sup>	0,2	17.484	0,5 <sup>1</sup>
Reisebusse	1.896	1,2	410	0,0	2.306	1,0 <sup>1</sup>
Sonstige	2.636 <sup>1</sup>	k. A.	k. A.	k. A.	2.636	k. A.
Gesamt	461.507		127.635		589.142	

<sup>1</sup> Stark eingeschränkte Repräsentativität aufgrund unzureichender Stichprobengröße

<sup>2</sup> Eingeschränkte Repräsentativität aufgrund geringer Stichprobengröße

<sup>3</sup> Eigene Abschätzung

k. A. – keine Angaben, PV – Privatverkehr; NL – Nutzlast

Quelle: nach [Wermuth, 2012], eigene Auswertung

Mit Blick auf die Modellierung von nutzungshomogenen Gruppen von privaten Pkw können die Daten daher nicht im Rahmen der Analyse verwendet werden. Die KiD-Studie wird aber in Studien zur Modellierung gewerblicher Elektrofahrzeugnutzung angewendet (u.a. [Arndt et al., 2016], [Hacker et al., 2015]). Im Rahmen der Forschungsarbeit wird die Datenbasis dazu verwendet, um die Übertragbarkeit der entwickelten Modellansätze zur Nachbildung von Ladelastverläufen privater xEV-Nutzer auf gewerbliche Nutzer von Pkw und leichten Lkw mit einem zulässiges Gesamtgewicht (zGG) kleiner als 3,5 t zu prüfen.

### **IV.1.3 Mobilitätspanel**

Die Erhebung „Mobilitätspanel für Deutschland“ (MoP) wird seit 1994 jährlich durchgeführt und erfasst die Mobilität von knapp 1.000 Haushalten über eine komplette Woche hinweg. Die Erfassung der Wege wird schriftlich in einem Tagebuch aufgezeichnet und für ausgewählte Pkw in den Haushalten wird zusätzlich über eine achtwöchige Periode ein Tankbuch geführt. Durch die Konzeption als Panelbefragung, welche sich durch eine Erfassung von Merkmalen derselben Individuen über mehrere Jahre hinweg auszeichnet, und die jährliche Wiederholung ist die Identifikation von Trends und Verhaltensänderungen im Mobilitätsgeschehen möglich. Im Gegensatz zur MiD-Erhebung handelt es sich hierbei um eine Längsschnitterhebung.

Eine Auswertung bezüglich der mittleren Tagesfahrleistung, der Startzeit der ersten Fahrt und der Ankunftszeit nach der letzten Fahrt des Tages zeigt Tabelle IV-3.

**Tabelle IV-3: Auswertung des Panels aus der MoP für das Jahr 2012**

	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag
Mittlere Tagesfahrleistung [km]	64	61	61	58	66	56	61
Erste Startzeit des Weges	8:37	8:40	8:34	8:39	8:32	9:44	11:10
Ende der letzten Fahrt	17:31	17:33	17:33	17:38	17:28	17:06	16:40

Quelle: [IfV-KIT & TNS, 2016]

Die Mittelwerte der Tagesfahrleistung, Startzeit der ersten Fahrt und Endzeit der letzten Fahrt weisen von Montag bis Freitag eine eher geringe Streuung auf. Für den Samstag werden geringere Fahrleistungen bei späteren Abfahrtszeiten und früheren Ankunftszeiten des Panels beobachtet. Der Sonntag ist geprägt durch die spätesten Abfahrtszeiten in der Woche und die frühesten Rückkehrzeiten.

Da die MoP eine Querschnitterhebung des Mobilitätsverhaltens eines Panels über eine Woche darstellt, ist vom Grundsatz her eine gute Eignung für die Modellierung von Ladeleistungen für xEV gegeben. Weiterhin werden sozioökonomische, haushaltstypisierende und siedlungsstrukturelle Merkmale der Personen erhoben. Für die Auswertung nach Wochentagen getrennt bleiben ca. 600 bis 800 Tagesgänge. Eine Aufteilung der Grundgesamtheit in nutzungshomogene Cluster würde zu sehr kleinen Stichprobengrößen führen, die eine Repräsentativität der Analysen nicht mehr gewährleisten können.

#### **IV.1.4 Fahrleistungserhebung**

Die Fahrleistungserhebung (FLE), durchgeführt von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), ermittelt durch Tachostandablesung an den Fahrzeugen die zurückgelegte Wegstrecke der Fahrzeuge des motorisierten Straßenverkehrs. Die Datenerhebung stellt eine wichtige Planungsgrundlage für die langfristige Infrastrukturplanung im Bundesverkehrswegeplan dar. Die Erhebungsperiode beträgt im Schnitt zehn Jahre. Zusätzlich werden Halterbefragungen zur Ermittlung der "Inländerfahrleistung" (Fahrleistung deutscher Kraftfahrzeuge im In- und Ausland) durchgeführt. Im Jahr 2014 wurde die jüngste Fahrleistungserhebung durchgeführt. Die Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgte im August 2017 und konnte im Rahmen dieser Auswertung nicht berücksichtigt werden. Für die vorliegenden Forschungsarbeit wurde die verfügbare Fahrleistungserhebung aus dem Jahr 2002 genutzt.

Die FLE umfasst alle Fahrzeugarten. Insgesamt werden 156.000 Fahrzeuge für die Befragung per Zufall aus dem zentralen Fahrzeugregister ausgewählt. Fahrleistungen, Einsatzzwecke und ausgewählte Nutzermerkmale werden in mehrwöchigem Abstand erfragt. Tabelle IV-4 zeigt eine Auswertung der Fahrleistungen von privaten Pkw differenziert nach dem Merkmal Erwerbstätigkeit aus dem Jahr 2002.

Man erkennt, dass Vollzeit-Erwerbstätige eine um 18,4 % höhere Fahrleistung im Jahr aufweisen als der Durchschnitt der Stichprobengröße. Die niedrigsten jährlichen Fahrleistungen weisen Nicht-Erwerbstätige (z. B. Hausmann, Rentner) auf.



**Tabelle IV-4: Bestand und Jahresfahrleistung von privaten Pkw für das Jahr 2002**

Erwerbstätigkeit des Hauptnutzers	Gesamtfahrleistung privat 2002		Fahrzeugbestand zur Jahresmitte 2002		Fahrleistung pro Jahr
	Mrd. km	%	# 1.000	%	km/a
Teilzeit erwerbstätig	48,7	9,8	4.021	10,1	12.100
Vollzeit erwerbstätig	206,2	52,4	17.665	44,3	14.728
Nicht erwerbstätig	114,1	23,0	12.146	30,5	9.391
Arbeitsuchend	16,1	3,2	1.404	3,5	11.486
Keine Angabe	57,3	11,5	4.652	11,7	12.322
Insgesamt	496,3	100,0	39.888	100,0	12.443

Quelle: nach [Hautzinger et al., 2005], eigene Auswertung

Da die Fahrleistungserhebung bisher keine zeitliche Auflösung nach Tagen oder sogar im Tagesgang vorsieht, ist sie als Datengrundlage für die Modellierung nicht geeignet. Außerdem sind die Erhebungsdatensätze nicht für wissenschaftliche Zwecke zugänglich, sondern werden nur in ausgewerteter Form veröffentlicht. Der Zeitraum zwischen den Erhebungen ist mit etwa zehn Jahren sehr lang und erlaubt nur sehr punktuell die Ableitung von Trends.

#### IV.2 Datenerhebungen und deren Vergleich

Einen Vergleich von statistischen Kennwerten zum Mobilitätsverhalten von privaten Haushalten und Personen verschiedener Befragungen und Zeitpunkte zeigt Tabelle IV-5. Basis des Vergleichs sind die Erhebungen MoP und MiD zu jeweils verschiedenen Erhebungsjahren. Die dargestellten Werte beinhalten alle Wege mit allen Verkehrsmitteln und berücksichtigen nur Personen, welche an dem Erhebungsstichtag mobil waren.

**Tabelle IV-5: Statistische Kenngrößen des Verkehrs in den Mobilitätsstatistiken im Zeitverlauf**

		Einheit	MoP 1998	MoP 2002	MoP 2008	MiD 2002	MiD 2008
Anteil mobiler Personen		%	91	91	92	85	89
Wege pro mobiler Person und Tag		#	3,9	3,8	3,7	3,9	3,9
Tagesstrecke pro mobiler Person und Tag		km	43	42	44	45	46
Unterwegszeit pro mobiler Person		h	1,47	1,43	1,45	1,45	1,5
Durchschnittliche Wegelänge		km	11,1	11,0	11,8	11,7	11,8
Modal-Split – Basis Wege	Zu Fuß	%	22	24	22	22	23
	Fahrrad	%	8	10	11	9	10
	MIV <sup>1</sup> -Fahrer	%	45	43	42	48	47
	MIV <sup>1</sup> -Mitfahrer	%	14	14	13	13	12
	Öffentlicher Verkehr	%	10	9	11	9	9

<sup>1</sup> Motorisierter Individualverkehr

Quelle: [infas & DLR, 2010a]

Beim Anteil mobiler Personen und der Weganzahl am Tag gab es zwischen den Erhebungsjahren keine stetigen Trends. Lediglich die erfasste durchschnittliche Weglänge in der MoP-Erhebung ist in den vergangenen 20 Jahren kontinuierlich um +6,3 % angestiegen. Ein ähnlicher Trend kann bei der Tagesfahrleistung nicht erkannt werden, so dass die Anzahl der Wege pro mobiler Person um -5,4 % im gleichen Zeitraum zurückgegangen ist.

Der Modal-Split der mobilen Personen hat sich in beiden Erhebungen in Richtung weniger Fahrer im Individualverkehr mit Kraftfahrzeugen zu mehr Fußgänger und Fahrradverkehr entwickelt. Der öffentliche Verkehr legt um 10 % bei der MoP-Erhebung zu, während die MiD eine gleichbleibende Verteilung auf die Verkehrsträger ausweist.

Deutliche Unterschiede zwischen den beiden Erhebungen sind beim Anteil der mobilen Personen am Tag und bei der Modal-Split-Verteilung zu erkennen. Diese dürften mit der unterschiedlichen Zusammensetzung der Stichproben und Panels begründet sein, dies zeigt aber auch die Grenzen der Mobilitätsstatistiken auf.

Trends im Mobilitätsverhalten sind über längerfristige Zeiträume zu betrachten, da sich Änderungen im Nutzerverhalten meist erst durch den Wechsel von Altersgenerationen und Lebens- und Arbeitsstilen oder durch unterschiedliche Technikoptionen ausbilden. Insbesondere die zunehmende Digitalisierung der Arbeitswelt mit einer möglichen Flexibilisierung der Arbeit in zeitlicher, organisatorischer und räumlicher Hinsicht kann zukünftig das Mobilitätsverhalten deutlich beeinflussen (vgl. [Hirsch-Kreinsen, 2016]).

### IV.3 Zusammenfassung Mobilitätsstatistiken

Eine eingehende Datenanalyse der jeweiligen Erhebungen und eine Eignungsanalyse für die Modellierung von zeitlich aufgelösten Ladeverläufen privater xEV-Nutzer mit der Möglichkeit einer Clusterung in nutzungshomogene Gruppen sind die Grundlage für die in Tabelle IV-6 dargestellte qualitative Bewertungsmatrix.

**Tabelle IV-6: Bewertungsmatrix der Datenerhebungen zur Pkw-Nutzung**

Datenerhebung	Erhebungsperiode	Private Pkw-Nutzung	Öffentliche Verfügbarkeit	Erhebungsumfang	Repräsentativität
Mobilität in Deutschland 2008	-	++	++	++	++
Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010	-	-	++	++	++
Mobilitätspanel, jährlich	++	+	++	-	-
Fahrleistungserhebung 2002	--	+	--	++	+

Quelle: eigene Recherche

Insgesamt bietet die MiD-Erhebung eine gute Datenverfügbarkeit und hohe Repräsentativität für den privaten Verkehr mit Pkw. Sie ist für Forschungszwecke verfügbar und wird periodisch wiederholt, um Änderungen im Mobilitätsverhalten aufzudecken. Nachteile sind die Erhebung des Mobilitätsverhaltens an Stichtagen ohne mehrtägige Erfassung und die Periodizität der Erhebung mit einem Zeitabstand von sechs Jahren.

Bei der Analyse der Daten wurden einige Punkte festgestellt, die zu Problemen geführt und die Anwendbarkeit der Daten negativ beeinflusst haben. Ein wesentlicher Punkt ist die Periodizität der Datenerhebungen, die im Falle der MiD und KiD mit sechs Jahren einen sehr lange Zyklus aufweist. Weiterhin wäre eine Kombination der Erhebungssystematiken der MiD und MoP sehr wünschenswert, um das Nutzerverhalten nicht nur an einem Stichtag, sondern über einen längeren Zeitraum und mit Bildung von Zeitreihen zu beobachten. Die MoP weist das Problem der geringen Stichprobengrößen auf. Alternativ wäre auch eine Stichtagsbefragung der gleichen Nutzer an mehreren Tagen denkbar. Zudem würde der Einsatz von Messtechnik mit Datenerfassung in den Erhebungen die Genauigkeit der bisherigen schriftlichen Erfassung von Daten per Fragebogen deutlich erhöhen und zum Beispiel das Problem der Häufung von Abfahrtszeiten zu vollen Stunden umgehen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass eine Vielzahl an Messungen von Bewegungsprofilen einzelner Stichproben existiert (z. B. [Nobis et al., 2011], [Linssen et al., 2012], [Arndt et al., 2016]). Die Nutzung der gemessenen Daten von Stichproben derzeitiger Verkehrsteilnehmern weist das Problem auf, dass die Validität teilweise unzureichend ist und eine Repräsentanz der Ergebnisse bedingt durch eine unzureichende Transparenz bezüglich der Stichprobenauswahl nur schwer beurteilt werden kann.

## V. Modellierung der Ladeleistung der Grundgesamtheit aller Nutzer

Gegenwärtig existieren keine ausreichenden Erfahrungswerte bezüglich des Ladenverhaltens von xEV-Nutzern. Da die resultierende Ladeleistung eines Bestands an Elektrofahrzeugen eine wichtige Voraussetzung zur Abbildung der Elektromobilität in Energiesystemmodellen ist, gilt es, diese Wissenslücke durch entsprechende modellbasierte Analysen zu schließen. Erst mit deren Hilfe ist es möglich, die Elektromobilität als Bestandteil des Verkehrs- und des Stromsystems in Energieszenarien als eine mögliche Maßnahme zum Klimaschutz zu bewerten. Bei der Modellierung der Ladeleistung ist – neben dem zeitlichen Verlauf – auch die räumliche Auflösung bei entsprechend ausgerichteten Energiesystemmodellen von Interesse. Das im Rahmen der Forschungsarbeit eingesetzte Energiesystemmodell erlaubt keine räumliche Auflösung, so dass die Modellierung von Tagesprofilen im Vordergrund steht.

Der Schwerpunkt der in diesem Kapitel vorgestellten Modellierung liegt auf der Gewinnung typischer Tagesprofile, die eine Gesamtheit aller Pkw-Nutzer repräsentieren. Eine Auswahl nach besonders geeigneten Nutzern für elektrische Fahrzeuge erfolgt nicht. Die Grundgesamtheit wird dabei durch die derzeitige Pkw-Nutzung nachgebildet. Eine Erweiterung dieses Ansatzes mit der Möglichkeit, nutzungshomogene Gruppen zu betrachten, wird in Kapitel VI aufgezeigt.

### V.1 Eingrenzung des Analyserahmens

Die Konzentration der Modellierung auf privat genutzte xEV ist dadurch begründet, dass private Halter im Jahr 2015 einen Anteil von 89,6 % am Pkw-Bestand aufwiesen [Kraftfahrtbundesamt, 2016] und der Privatverkehr einen Anteil von knapp 79 % der gesamten Fahrleistung aller Pkw ausmachte (vgl. Kapitel IV.1.2). Die Gruppe der gewerblichen Halter mit einem deutlich höheren Anteil an wirtschaftlich bedingten Fahrten wird im Rahmen der Analyse nicht betrachtet.

Für die Pkw-Nutzergruppe im Wirtschaftsverkehr ergeben sich teils deutlich abweichende Kennwerte und Tagesprofile [Arndt et al., 2016]. Diese Gruppe stellt bei den Neuzulassungen in Deutschland einen Anteil von 65,7 % dar [Kraftfahrtbundesamt, 2017b]. Im Vergleich zu privaten Haltern zeichnet sich die gewerbliche Haltergruppe durch eine kurze Haltedauer der Neufahrzeuge aus, was den deutlich geringeren Bestandsanteil von Fahrzeugen mit gewerblichen Haltern im Bestand von 10,5 % zum Stichtag 1.1.2017 [Kraftfahrtbundesamt, 2017b] erklärt. Eine Konzentration auf den Privatverkehr mit Pkw ist somit zielführend. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass Ansätze zur Modellierung der Ladevorgänge von wirtschaftlich bedingtem Verkehr z. B. in [Arndt et al., 2016] oder [Plötz et al., 2015b] entwickelt wurden. Eine Übertragbarkeit der hier entwickelten Ansätze zur Modellierung der Ladeleistung von privaten Pkw-Nutzern auf gewerblich genutzte Fahrzeuge wird in Kapitel VI.5 geprüft und diskutiert.

Die Ladeleistung wird außer durch technische Parameter wie Nennleistung des Ladepunktes oder Strombedarf des xEV entscheidend durch die Nutzung des Pkws beeinflusst. Zu den nutzungsbestimmten Größen der Ladung von xEV zählen neben den täglich gefahrenen Wegen und dem daraus resultierenden Energiebedarf auch die möglichen Zeiträume und Orte, zu bzw. an denen elektrisches Laden möglich ist. Die Ladevorgänge können untertäglich an öffentlichen oder

teilöffentlichen (z. B. Einkaufszentrum) Ladepunkten oder privat am nächtlichen Stellplatz des Fahrzeuges stattfinden.

Die Modellierung der Ladevorgänge beschränkt sich in dieser Forschungsarbeit auf die Analyse des Mode 1-Ladens (vgl. Tabelle III-3) der Fahrzeuge am nächtlichen Stellplatz, da dies derzeit und wohl auch in Zukunft die deutlich überwiegende Ladeoption sein wird. Die Studie [Frenzel et al., 2015] befragte knapp 2000 private Erstnutzer von xEV zu den Orten des täglichen Ladevorgangs. 96 % der Befragten gaben dabei an, dass sie ihr xEV in unmittelbarer Nähe zu ihrem Haus oder ihrer Wohnung laden. Die wenigen Ladungen in öffentlichen Bereichen werden laut Studie zu 41 % im öffentlichen Straßenraum, zu 36 % am Arbeitsplatz und zu 24 % beim Einkaufen erledigt. Über 60 % der Befragten gaben an, jeweils täglich am Stellplatz in unmittelbarer Nähe zur Wohnung oder zum Haus zu laden. Weitere 33 % der Befragten gaben an, ihr Fahrzeug zu Hause an mindestens drei Tagen pro Woche zu laden. Eine Abschätzung eines Energieversorgers [Peukert, 2012] geht davon aus, dass der Anteil der Ladeenergie an Mode 1-Ladepunkten zu Hause und am Arbeitsplatz 80 % der gesamten Energienachfrage ausmachen wird. Die restlichen 20 % der Ladenergie werden an öffentlichen Ladepunkten übergeben. Die Szenario-Studie [Anderson et al., 2016] zeigt basierend auf einer Markt-, Nutzer- und Infrastrukturanalyse, dass das private Laden zu Hause im Vergleich zu semi-öffentlichen oder öffentlichen Ladenstellen bis 2030 klar dominieren wird. Der in der Studie [Anderson et al., 2016] ausgewiesene Anteil der xEV, welche gleichzeitig am Netz angeschlossen sind, beträgt für das Heimladen 36 % in den Abendzeiten und nur 3 % an öffentlichen Ladepunkten.

Für die Modellierung der Ladeleistung wird weiterhin unterstellt, dass die elektrische Reichweite ohne Nachladen für reine Batterie-Fahrzeuge die Auswahl möglicher Nutzer bestimmt. Pkw-Nutzer mit täglichen Fahrleistungen, welche die elektrische BEV-Reichweiten übersteigen, werden nicht als potentielle Nutzer in Betracht gezogen und ausselektiert. Diese Einschränkung gilt für potentielle Nutzer von Plug-In-Hybriden nicht. Bei ihnen wird vereinfachend unterstellt, dass zuerst die elektrische Reichweite (CDM) ausgeschöpft wird, bevor die restliche Tagesfahrleistung im kombinierten Modus (Charge Sustaining Mode, CSM) absolviert wird.

Im Sinne einer Worst-Case-Abschätzung in Bezug auf das Heimladen wird davon ausgegangen, dass der gesamte elektrische Energiebedarf der xEV am Heimplatz während der nächtlichen Standzeit gedeckt wird. Eine übertägige Ladung kann die maximal möglichen Tagesfahrleistungen erhöhen. Eine Auswertung von gemessenen Profilen potentieller Pkw-Nutzer zeigt jedoch, dass untertägliches Laden die Tagesfahrleistung im Mittel über alle Nutzer nur geringfügig erhöhen kann. Die Begründung liegt im hohen Anteil an niedriger Tagesfahrleistung und dem nur sehr geringen Anteil an Tagesfahrten, die deutlich über der elektrischen Reichweite liegen [Linszen et al., 2012].

Die Konzentration der Heimladung am privaten Stellplatz in direkter Nähe zur Wohnung wird weiterhin durch eine Auswertung der MiD 2008 bezüglich der nächtlichen Abstellorte gestützt. Für privat genutzte Pkw ergibt sich danach ein Anteil von 23,8 % mit einem festen Stellplatz auf dem eigenen Grundstück und von weiteren 55,9 % mit einem festen Stellplatz in der Nähe zur

Wohnung. Die Einordnung als fester Stellplatz wird aus der Befragung zur Parkplatzsuche abgeleitet, bei der die Befragten mit „Nie“ geantwortet haben.

Wie bereits in Kapitel III.5 beschrieben, kann für die private Nutzung von xEV-Pkw davon ausgegangen werden, dass die Nutzung der Elektrofahrzeuge den Verhaltensmustern konventioneller Pkw entspricht. Eine Nutzung der empirischen Daten der MiD-Befragungen zum derzeitigen Mobilitätsverhalten ist daher möglich. Einschränkend sei angemerkt, dass je nach elektrischer Reichweiteneinschränkung die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen der Fahrzeuge niedriger ausfallen, da ein Langstreckenbetrieb (z. B. Urlaubsfahrten) fehlt.

## V.2 Modellansatz

Die in diesem Kapitel im Detail beschriebene Modellierung der Grundgesamtheit aller Pkw-Nutzer ermöglicht keine Berücksichtigung von Trends in der Soziodemografie (z. B. ein steigender Anteil an Rentnern in der Zukunft) oder in der Bildung von xEV-Käuferschicht durch Personen in ähnlichen Lebensphasen (z. B. Berufstätige). Sie dient daher als Ausgangspunkt für die weiterführende Modellierung von verhaltenshomogenen Gruppen (siehe Kapitel VI). Der gewählte Modellansatz entspricht einer Makro-Simulation des xEV-Einsatzes basierend auf empirisch gewonnenen Daten und eignet sich zur Abbildung der Ladeleistung von xEV in Energiesystemmodellen ohne regionale Auflösung. Der Modellansatz grenzt sich daher deutlich ab von Mikro-Simulationen mit hoher räumlicher Auflösung wie zum Beispiel für die Belastung von Verteilnetzen. Diese Modelle werden meist auf der Basis von stochastischem Verhalten nachgebildet. Beispiele hierfür sind in [Arndt et al., 2016] oder [Nobis, 2016] zu finden.

Um die Ladevorgänge von xEV nachzubilden und daraus typische Tagesgänge der notwendigen Ladeleistung für das Heimpladen nachzubilden, sind Informationen zu Stillstandszeiten, Abstellorten und dem Bedarf an Ladeenergie im Tagesverlauf für eine möglichst hohe und repräsentative Anzahl an PKW-Nutzern erforderlich. Der Ladeenergiebedarf ergibt sich dabei aus den zurückgelegten Wegen und dem daraus resultierenden Strombedarf der Fahrzeuge.

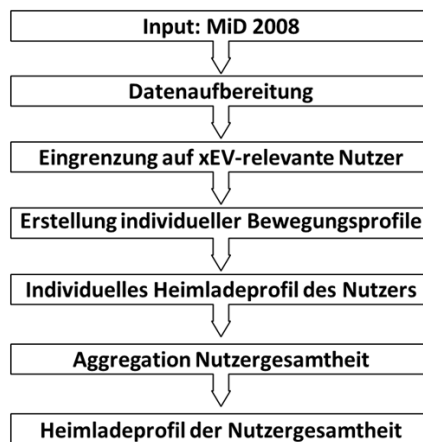
Mit der bereits beschriebenen Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands auf private Nutzer und mit Blick auf Datenverfügbarkeit, -qualität und -umfang sowie Repräsentativität für Deutschland ist die Wahl der Datenbasis MiD 2008 [infas & DLR, 2010a] für die Modellbildung am besten geeignet (vgl. Kapitel IV.3). Die empirische Erhebung bietet eine gute Ausgangslage zur Erstellung von Bewegungsprofilen, da sie umfangreiche Wegedaten zur Rekonstruktion von Bewegungsprofilen der Pkw-Nutzer enthält. Die ausführliche Beschreibung der Daten und deren Auswertung erfolgt in Kapitel IV.1.1.

Für die Modellierung der Ladeleistung werden die Wegedaten von Nutzern herangezogen, welche einen Pkw als Fahrer im Laufe eines Tages genutzt haben. Die Verwendung von Nutzerdaten hat den Vorteil, dass eine Zuordnung von haushaltsspezifischen und soziodemografischen Merkmalen wie Alter, Haushaltseinkommen, Lebensphase etc. zu den individuellen Bewegungsprofilen möglich ist. Beachtet werden muss dabei allerdings, dass eine Nutzung von einem Pkw durch mehrere Nutzer in den individuellen Bewegungsprofilen so nicht berücksichtigt wird. In Kapitel V.4 wird gezeigt, dass die Abweichung zwischen den Bewegungsprofilen der Pkw (Fahr-

zeugmodellierung) und denen der Nutzer (Nutzermodellierung) gering ist, da eine signifikante Zuordnung zwischen den Haushaltsbewohnern und den im Haushalt vorhandenen Pkw vorhanden zu sein scheint.

Die Wahl der Nutzermodellierung ist Voraussetzung für eine Zuordnung der spezifischen Ladeprofile zu haushalts- oder soziodemografischen Parametern. Abbildung V-1 fasst die prinzipielle Vorgehensweise der Datenaufbereitung und Modellierung des Ladelastprofils der Nutzer-gesamtheit zusammen.

**Abbildung V-1: Schematische Vorgehensweise der Modellbildung**



Quelle: eigene Darstellung

Die Datenstruktur der MiD 2008 ist in die Oberstruktur Haushalt, Person, Auto, Wege und Urlaubsfahrten eingeteilt. Durch die Vergabe von eindeutigen Haushaltskennziffern und zugeordneten Personenkennziffern können die jeweiligen Wege des Stichtags der Befragten eindeutig personen- oder haushaltsbezogenen Daten zugeordnet werden. Die vollständige Liste der verwendeten Erfassungsmerkmale kann Tabelle XIII-3 im Anhang entnommen werden.

Ziele der Modellbildung und der Analyse der Ergebnisse in Kapitel V sind die Identifikation von wichtigen Parametern, welche die Nachfrage nach Ladeleistung im Tagesgang signifikant beeinflussen, und die quantitative Erfassung des Einflusses dieser Parameter.

### **V.2.1 Aufbereitung der Daten**

Die ca. 193.000 erfassten Wegeinterviews werden in einem ersten Schritt jeweils zu individuellen Tagesprofilen der mobilen Person am Stichtag zusammengesetzt. Um nur die Wege zu erfassen, welche auch durch xEV zurückgelegt werden könnten, sind die Datensätze nach folgenden Kriterien selektiert worden:

- nur Wege, die eindeutig Personen und Haushalten zugeordnet werden können,
- nur private Wege; Ausschluss von dienstlich oder gewerblich bedingten Wegen,

- nur Wege, welche als Fahrer (nicht Mitfahrer) eines Pkw absolviert wurden,
- nur Wege mit Pkw, deren Zuordnung zum jeweiligen Haushalt eindeutig ist, und
- nur Wege, welche typisch für das persönliche, tägliche Mobilitätsverhalten sind.

Die Grundgesamtheit der Bewegungsprofile wird durch die weitere Bedingung eingeschränkt, dass die letzte Fahrt nach Hause am Stellplatz endet und die erste Fahrt des Tages wieder von dort beginnt. Wege zur Arbeitsstelle sind durch den Ausschluss von dienstlichen und gewerblichen Wege nicht betroffen und sind Bestandteil der Analyse. Aus den möglichen 51.333 Bewegungsprofilen werden durch die Anwendung der zuvor genannten Kriterien und einer Plausibilitätsprüfung der Angaben zu Anzahl der Wege, Durchschnittsgeschwindigkeit pro Weg und Tagesfahrleistung 18.107 mögliche Nutzerprofile identifiziert. Die verbleibenden Bewegungsprofile erfüllen ein oder mehrere der genannten Kriterien nicht (z. B. Beifahrer im Pkw oder Nutzung des öffentlichen Personenverkehrs).

Die individuellen Bewegungsprofile enthalten dabei Informationen zur Durchschnittsgeschwindigkeit der zurückgelegten Wege, zu Start- und Endzeiten der Wege, zu Abstellorten der Pkws während Stillstandszeiten und zu kumulierten Tagesfahrleistungen. Daraus lassen sich in einem weiteren Schritt mögliche Ladeleistungsprofile des jeweiligen Nutzers ableiten.

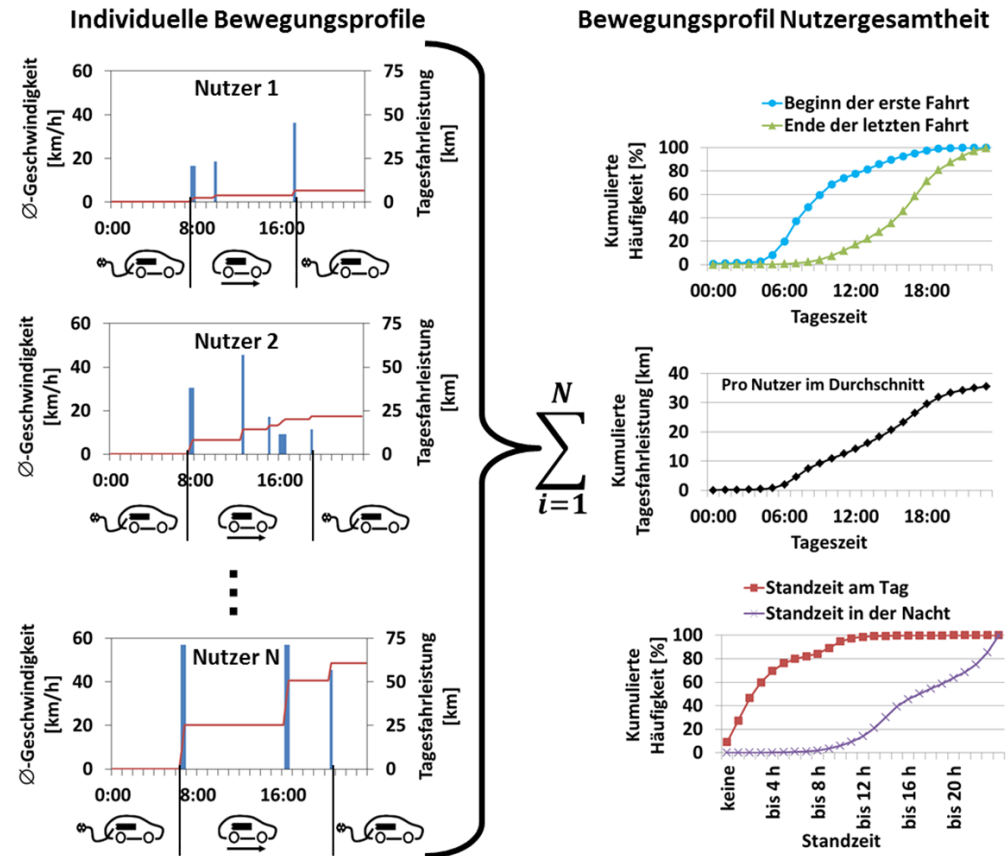
Das Schema in Abbildung V-2 verdeutlicht die Aggregation zu Bewegungsprofilen von konventionellen Pkws und damit auch die von potentiellen xEVs. Wesentliche Annahme bei dieser Vorgehensweise ist, dass der Einsatz eines xEV anstelle des konventionellen Fahrzeugs die Pkw-Nutzung nicht beeinflusst, sondern das Nutzerverhalten unverändert bleibt. Die Annahme ist weitgehend; sie wird aber durch die Auswertung von Befragungen von derzeitigen xEV-Nutzern gut gestützt (vgl. Kapitel III.5). Die Vorgehensweise wird auch in anderen Studien und Analysen (z. B. [Heinrichs, 2013], [Nobis, 2016]) angewandt. Der Unterschied zu diesen Untersuchungen liegt in der Betrachtung der Pkw-Nutzer und nicht der Fahrzeuge. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Zuordnung von individuellen Kriterien wie Altersgruppen oder Lebensphasen, welche bei der Clusterung zu nutzungshomogenen Gruppen im (siehe Kapitel VI) wichtige Rückschlüsse liefern können.

Weitere für die Modellierung des Ladeleistungsprofils wichtige Parameter können aus den individuellen Bewegungsprofilen gewonnen werden. Der Beginn und die Dauer des Heimpladevorgangs wird durch die zurückgelegten Wege am Tag und den damit einhergehenden Ladeenergiebedarf, durch die Ankunftszeit am Heimplatz und die zur Verfügung stehende Ladeleistung bestimmt. Zur Berechnung des Ladeenergiebedarfs der Fahrzeuge wird auf Werte aus [Arndt et al., 2016] zurückgegriffen (siehe Kapitel VII). Die Energiebedarfsdaten der Fahrzeuge wurden in der Studie durch realitätsnahe Fahrzyklen errechnet und berücksichtigen auch den Einsatz von Nebenaggregaten. Sie entsprechen nicht den NEFZ-Normverbrauchswerten. Für eine mögliche Verschiebung des Ladevorgangs zur Erbringung von Systemdienstleistungen wie Verteilnetzauslastung oder Flexibilisierung der Stromnachfrage sind mögliche Verschiebezeiten der Ladung ebenfalls von Interesse. Aus diesem Grund sind auch die Stillstandszeiten am Tag und am nächtlichen Stellplatz von Interesse. Die nächtliche Standzeit ist hier definiert als die



Zeitspanne zwischen der Ankunftszeit des letzten Weges am Tag und der Startzeit des ersten Weges (vgl. Abbildung V-2, linke Seite).

**Abbildung V-2: Modellbildung der individuellen Nutzungsmuster**



Quelle: eigene Darstellung

Die Auswertung der Startzeiten der ersten Fahrt und des Endes der letzten Fahrt am Stellplatz der Wohnung oder des Wohnhauses über alle Wochentage zeigt, dass ca. 80 % der Pkw-Nutzer ihr erste Fahrt vor 12:00 Uhr antreten und bis 19:00 Uhr wieder zu ihrem nächtlichen Stellplatz zurückkehren (vgl. Abbildung V-2, Grafik rechts unten). Tabelle V-1 beinhaltet arithmetische Mittelwerte von Parametern, die eine potenzielle Nutzung von xEV und damit auch den Tagesgang der aus dem Netz entnommenen Ladeleistung bestimmen. Der in diesem Kapitel vorgestellte Modellansatz lässt nur die Auswertung der Nutzergesamtheit untergliedert nach Wochentagen zu. Durch die Aufteilung nach Wochentagen ergeben sich zwischen 1.661 und 2.695 Pkw-Nutzerprofile für die jeweiligen Tage. Die durchschnittliche Tagesfahrleistung für die Auswahl der Pkw-Nutzer liegt bei 35,8 km über alle Tage mit 3,1 Wegen am Tag.

Die mittlere Tagesfahrleistung der verschiedenen Wochentage weist für die Wochenendtage Samstag eine um -16 % bzw. Sonntag eine um -5 % niedrigere Tagesfahrleistung auf. Die Werk-tage Dienstag bis Donnerstag weisen ähnliche Werte für Tagesfahrleistung, Tagesfahrdauer, Start- und Endzeit auf. Der Freitag zeichnet sich durch höhere Tagesfahrleistungen gepaart mit früheren Endzeiten der letzten Fahrt nach Hause aus. Die mittleren Standzeiten zwischen zwei Fahrten am Tag liegen in der Woche bei knapp 4 h, während sie an den Wochenendtagen nur knapp über 2 h beträgt. Die mittlere Standzeit am Tag ist definiert als die gesamte untertägige Stillstandszeit dividiert durch die Zahl der untertägigen Parkvorgänge. Eine Auswertung individuell unterschiedlich langer Standzeiten erfolgt somit nicht.

Bedingt durch die späteren Startzeiten und die früheren Rückkehrzeiten zum nächtlichen Stellplatz am Wochenende sind die nächtlichen Standzeiten mit 19,4 h im Vergleich zu den Werktagen mit 16,4 h deutlich höher. Zusammen mit der niedrigeren Tagesfahrleistung ergibt sich somit eine bessere Ausgangsposition zur Verschiebung von Ladevorgängen am Wochenende. Gleichzeitig dürfte aber auch die Zahl der nicht geplanten, spontanen z. B. freizeitbedingten Fahrten am Wochenende höher sein und sich damit auch die Bereitschaft zur Teilnahme der Nutzer an Ladesteuerungen verringern. Die Analyse der Bereitschaft der Nutzer zur Teilnahme an Laderegelnstrategien ist allerdings nicht Bestandteil der hier durchgeführten Analyse. Eine vertiefende Untersuchung dieser Thematik ist zum Beispiel in [Geske, 2014] zu finden.

**Tabelle V-1: Auswertung von Kenngrößen des Gesamtnutzerprofils nach Stichtagen**

Durchschnittswerte Nutzer-gesamtheit am Stichtag	Wochentag des Wegedatensatzes								Wochentag-Aggregate		
	Alle	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Mo-Fr	Di-Do	Sa-So
Losgröße Pkw-Nutzer	18107	2888	2917	2923	2771	2695	2252	1661	14194	8611	3913
Tagesfahrleistung [km/Tag]	35,8	36,2	34,7	35,8	37,1	39,8	30,7	34,7	36,7	35,8	32,4
Tagesfahrdauer [min/Tag]	60,2	60,3	60,3	61,8	61,5	66,2	53,9	53,6	62,0	61,2	53,8
Tageswegezahl [# /Tag]	3,1	3,2	3,2	3,2	3,2	3,3	3,0	2,4	3,2	3,2	2,7
Mittlere Startzeit der ersten Fahrt in hh:mm	9:56	9:29	9:26	9:26	9:33	9:33	10:56	12:18	09:29	09:28	11:30
Mittlere Endzeit der letzten Fahrt in hh:mm	16:46	16:51	17:01	16:56	17:08	16:46	15:56	16:20	16:56	17:01	16:06
Mittlere Standzeit Tag [h]	3,4	3,7	3,9	3,9	3,8	3,3	2,1	2,0	3,7	3,9	2,1
Mittlere Standzeit Nacht [h]	17,2	16,6	16,4	16,5	16,4	16,8	19,0	20,0	16,5	16,4	19,4

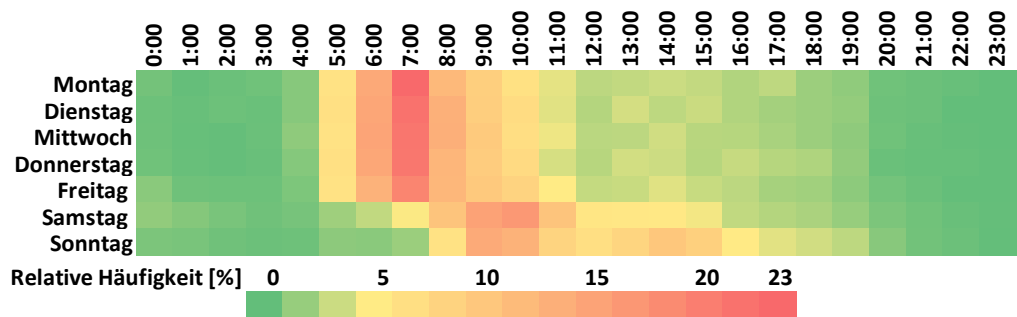
Quelle: eigene Berechnungen

Der Mittelwert der Startzeiten der ersten Fahrt des Tages als spätester Zeitpunkt für die Beendigung des Ladevorgangs bei einer Flexibilisierung der Ladung ist in der Woche 9:29 Uhr und verschiebt sich am Wochenende um ca. 1,5 h am Samstag und 1,75 h am Sonntag hin zu späteren Tageszeiten.

Für die Bewertung der Verteilung der Parameter über den Tagesverlauf werden weitere Analysen durchgeführt. Die Bewegungsprofile im Tages- und Wochengang werden im Folgenden in Heatmaps für die Häufigkeiten des Auftretens der Parameter im Tagesverlauf dargestellt. Die Verwendung von Heatmaps zur Visualisierung der Parameterausprägungen in den zwei Dimensionen Tageszeit und Wochentag ermöglicht die übersichtliche Darstellung komplexer Datenmengen und die Erkennung möglicher markanter Bereiche.

Die Auswertung der Startzeiten der ersten Fahrt vom nächtlichen Stellplatz aus zeigt die Abbildung V-3. Die Uhrzeit im Diagramm ist als Start der Periode zu verstehen, so dass zum Beispiel die Uhrzeit 6:00 Uhr die Periode von 6:00 bis 7:00 Uhr markiert. Während die Startzeiten unter der Woche eine maximale Häufung in der Periode von 7:00 bis 8:00 Uhr aufweisen, ist die Verteilung der relativen Häufigkeit der Abfahrtszeiten am Samstag und insbesondere am Sonntag deutlich breiter mit einer weniger ausgeprägten maximalen Häufigkeit des Auftretens.

**Abbildung V-3: Heatmap-Darstellung der relativen Häufigkeit „Startzeit der ersten Fahrt“**



Quelle: eigene Darstellung

Die Mittelwerte der Startzeiten an den Wochentagen (vgl. Tabelle V-1) weisen im Vergleich zur maximalen relativen Häufigkeit der Nutzergesamtheit spätere Tageszeitpunkte auf. Dies deutet darauf hin, dass die Verteilung der Startzeitpunkte an allen Stichtagen asymmetrisch ist. Die Bewertung der Verteilung der Daten mit dem Schiefheitsmaß SI nach Gleichung V-1 als Maß für die Symmetrie einer Verteilung zeigt für alle Wochentage Montag bis Samstag positive Werte zwischen 0,16 für den Samstag und 1,09 für den Mittwoch. Die Verteilung ist somit für diese Wochentage rechtsschief. Die Häufung der Startzeiten um die Periode 7:00 Uhr entspricht somit nicht dem arithmetischen Mittelwert. Ein Vergleich der arithmetischen Mittelwerte der Nutzergesamtheit ist nur bedingt aussagekräftig. Für den Sonntag ergibt sich ein Schiefheitsmaß von -0,15 und somit eine größere Häufung für Startzeiten, welche größer sind als der Mittelwert der Grundgesamtheit.

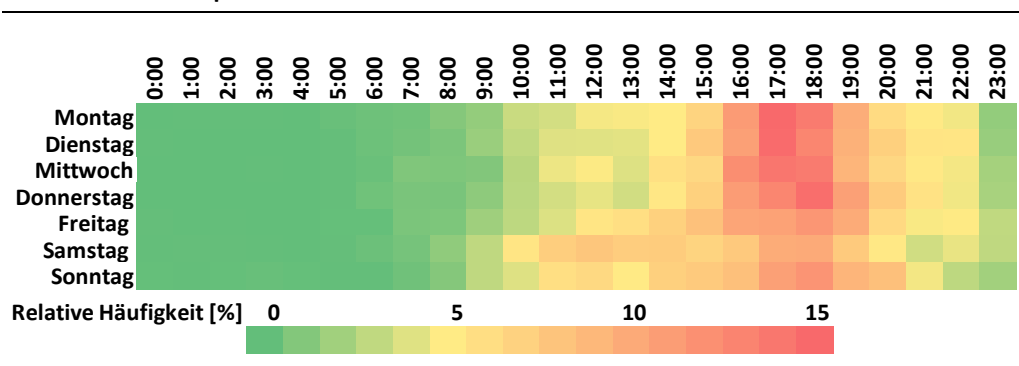
$$SI = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - \bar{x}}{S} \right)^3$$

Gleichung V-1

mit Anzahl der Stichprobengröße N, Standardabweichung der Stichprobe S und Mittelwert der Stichprobe  $\bar{x}$

Analog zur Auswertung der Startzeit-Verteilung zeigt die Abbildung V-4 die grafische Auswertung der relativen Häufigkeiten der Rückkehrzeitpunkte zum nächtlichen Stellplatz. Die meisten Nutzer kehren in den Perioden 17:00 und 18:00 Uhr zurück. Auch hier erkennt man ein ähnliches Nutzerverhalten an den Wochentagen Montag bis Donnerstag. Der Freitag unterscheidet sich durch einen im Tagesgang etwas zu früheren Zeitpunkten verschobenen Rückkehrzeitpunkt mit einer breiten Verteilung der Häufigkeiten. Eine ähnliche Verteilung der Rückkehrzeiten weist auch der Sonntag auf. Der Samstag wird durch eine sehr breite Verteilung der Rückkehrzeiten bestimmt.

Abbildung V-4: Heatmap-Darstellung der relativen Häufigkeit der „Ankunftszeiten am nächtlichen Stellplatz“



Quelle: eigene Darstellung

Alle Verteilungen der Rückkehrzeiten weisen negative Werte für das Schiefheitsmaß zwischen -0,6 für den Montag und -0,11 für den Samstag auf. Man findet daher eine Häufung der Endzeiten der letzten Fahrt zum Stellplatz, welche größer ist als der Mittelwert der Grundgesamtheit.

Um eine Einschätzung zu möglichen Ladevorgängen auch außerhalb der Ladung am nächtlichen Stellplatz vornehmen zu können, wird die Fahraktivität der Nutzergesamtheit im Tagesgang definiert. Diese basiert ebenfalls auf der Auswertung der individuellen Bewegungsprofile und wird mit Hilfe der Gleichung V-2 berechnet. Die Fahraktivität ist als der Anteil der Nutzer zu verstehen, die in einer Periode zeitgleich am Verkehr teilnehmen und somit nicht für mögliche Ladevorgänge auch außerhalb des nächtlichen Stellplatzes infrage kommen.

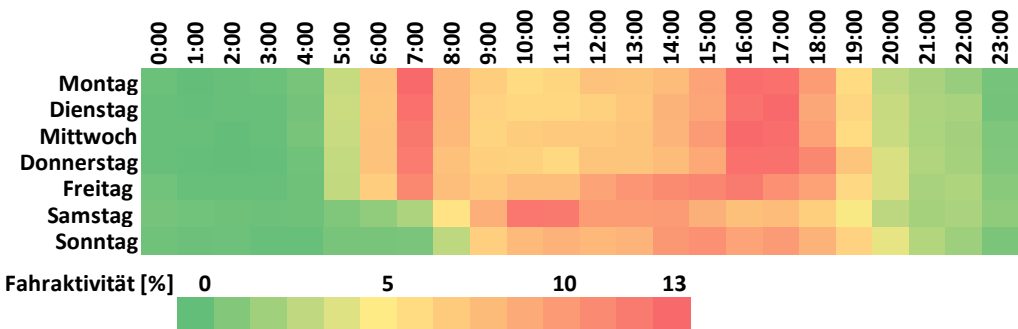
$$FA_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{ij} \begin{cases} a_i = 1 \rightarrow v_{ij} > 0 \\ a_i = 0 \rightarrow v_{ij} = 0 \end{cases}$$

Gleichung V-2

in der Zeitperiode i des Nutzers j für die Nutzergesamtheit N

Abbildung V-5 zeigt den Verlauf der Fahraktivitäten der Nutzergesamtheit im Tages- und Wochengang. Die Fahraktivität hat während der Woche von Montag bis Donnerstag die höchsten Werte für die Gesamtheit aller Bewegungsprofile in den Perioden 7:00 Uhr, 16:00 Uhr und 17:00 Uhr. Der Maximalwert der Fahraktivität an allen Tagen wird mit 13,2 % am Dienstag in der Zeitperiode 17:00 Uhr erreicht, d. h. in jeder untersuchten Periode des Tages nehmen mindestens 86,8 % der Nutzer nicht aktiv am Verkehr teil und ihre Pkw befinden sich im geparkten Zustand. Die MiD 2008 Datenerhebung enthält keine detaillierte Erfassung der Abstellorte der Pkw während des Tagesverlaufs. Es werden nur die Kategorien „zu Hause“, „Arbeitsplatz“ oder „anderswo“ in den Wegeinterviews erfasst. Daher können nur sehr begrenzte Aussagen zu den untertägigen Abstellorten getroffen werden.

**Abbildung V-5: Heatmap-Darstellung der relativen Häufigkeit der „Fahraktivität“**



Quelle: eigene Darstellung

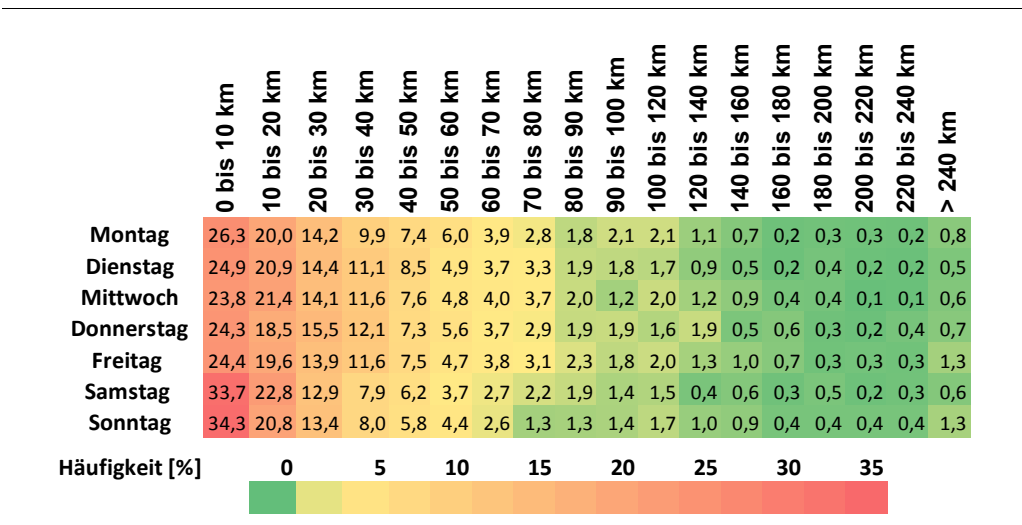
Die geringsten Fahraktivitäten sind tagsüber an den Tagen Montag bis Donnerstag zwischen 9:00 und 11:00 Uhr zu verzeichnen und die Fahraktivität liegt im Bereich zwischen 6,0 und 7,2 %. Diese ausgeprägte „Talbildung“ der Fahraktivität ist hingegen an den Tagen Freitag bis Sonntag nicht zu erkennen. In den Tagesperioden von 20:00 bis 22:00 Uhr ist das Maximum der Fahraktivität an Sonntagen mit 4,2 % am höchsten. In der Periode von 22:00 Uhr bis zum nächsten Tag 5:00 Uhr überschreitet das Maximum der Fahraktivität an allen Tagen den Wert von 2,5 % nicht. Für die Modellierung der gesamten Ladeleistung einer Nutzergesamtheit bedeutet dies, dass in dieser Periode potenziell mehr als 97 % der Pkw bei vorhandener Ladeoption am Stellplatz einen Ladevorgang durchführen können.

Die Auswertung der Verteilung der mittleren Stillstandszeiten am Tag liefert für 80 % der Nutzer einen Wert von bis zu 6 h. Am nächtlichen Stellplatz werden hohe Standzeiten von bis zu 22 h erreicht. Diese hohen nächtlichen Standzeiten sind geprägt durch einen hohen Anteil an Nutzern, welche nur einen Weg am Tag mit dem Pkw zurücklegen. Zu beachten ist, dass nur Stillstandszeiten größer als 15 Minuten berücksichtigt werden, so dass Fahrten z. B. für kurze Einkäufe oder Holen bzw. Bringen von Personen als ein Weg gewertet werden.

Neben den potenziellen Standzeiten am nächtlichen Stellplatz sind für die Modellierung der Ladeenergienachfrage von xEV auch die Abschätzung der täglichen Fahrstrecken und der damit

einhergehende Strombedarf des Fahrzeugs erforderlich. Basierend auf den gebildeten Nutzungsmustern kann die kumulierte Tagesfahrleistung aus den einzelnen Wegen des Tages berechnet werden (vgl. Abbildung V-2; Grafik rechts, Mitte). Die Auswertung der mittleren Tagesfahrleistungen der Wochentage über alle Nutzer aus Tabelle V-1 ergibt für das Jahr der Befragung 2008 zusammengesetzt aus der Anzahl der Wochentage eine Jahresfahrleistung pro Nutzer von 13.022 km/a. Der Vergleich mit der Jahresfahrleistung aller Pkw aus dem Jahr 2008 von 14.100 km/a [Radke, 2017] ergibt eine Abweichung von -7,6 %. Diese Abweichung lässt sich durch die Fokussierung der Analyse auf private Nutzer begründen, welche eine deutlich niedrigere Fahrleistung als gewerbliche Nutzer von Pkw aufweisen [Wermuth, 2012]. Außerdem können mehrere Nutzer auch den gleichen Pkw nutzen, was zu höheren fahrzeugspezifischen Fahrleistungen führt (vgl. Kapitel V.4).

**Abbildung V-6: Heatmap-Darstellung der relativen Häufigkeit der täglichen Fahrleistung am Stichtag**



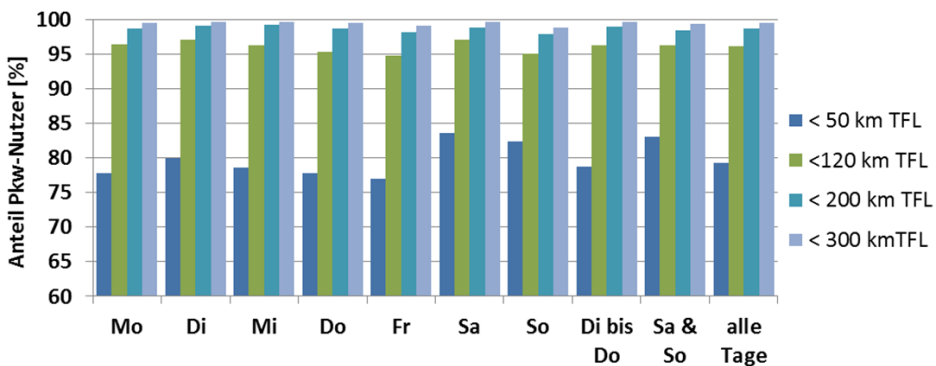
Quelle: eigene Berechnungen

Die Auswertung der Tagesfahrleistungen der Nutzer nach der relativen Häufigkeit in Entfernungsklassen ist in Abbildung V-6 grafisch aufbereitet dargestellt. An allen Wochentagen liegen mindestens 77,0 % der Tagesfahrleistungen unter 50 km und 94,8 % unter 120 km am Tag. Insbesondere an den Wochenendtagen ist die Tagesfahrleistung noch deutlich mehr auf die Klasse der Tagesfahrleistungen unter 10 km fokussiert. Allerdings finden mit einer Häufigkeit von 1,3 % am Sonntag auch etwa doppelt so viele Tagesfahrleistungen größer 250 km als in der Woche statt. Auch diese Darstellung verdeutlicht, dass eine differenzierte Betrachtung der Tagesfahrleistungen nach Wochentagen notwendig ist.

Wie sich eine Begrenzung der Tagesfahrleistungen durch elektrische Reichweiten ohne Nachladen von BEV auswirken könnte, zeigt Abbildung V-7. Mit einer Erhöhung der elektrischen Reichweite von BEV ohne Nachladen von 50 auf 120 km steigt der Anteil von potenziellen xEV-

Nutzern deutlich von 79,3 % auf 96,1 % an (Abbildung V-7). Eine weitere Steigerung der elektrischen Reichweiten auf einen Wert bis 300 km lässt den Anteil nur noch gering ansteigen. Auf der anderen Seite wird zur Erhöhung der Kaufbereitschaft von BEV eine deutliche Steigerung der elektrischen Reichweite als sehr wichtig eingestuft. Eine Befragungen zu Wunscreichweiten [Vogt & Bongard, 2015] hat ergeben, dass sich nur 51 % der befragten potenziellen Käufer von BEV mit einer Reichweite kleiner als 300 km zufrieden geben würden. 89 % der Befragten wären mit Reichweiten von kleiner als 500 km zufrieden. Der Nutzer orientiert sich beim Kauf eher an den gewohnten Reichweiten der konventionellen Fahrzeuge als am tatsächlichen individuellen Tagesfahrleistungsbedarf im Alltag. Das derzeitige Angebot an BEV mit Normreichweiten im Jahr 2016 von ca. 220 km (gewichtet mit den Neufahrzeugverkäufen, vgl. Kapitel III.3) entspricht damit nicht den Erwartungen der Käufer. Als Anmerkung sei hier nochmals angefügt, dass die realen Reichweiten im Alltag deutlich niedriger ausfallen als die Normreichweiten.

**Abbildung V-7: Zuordnung der Tagesfahrleistung (TFL) von Pkw-Nutzern, Grundgesamtheit**



Quelle: eigene Berechnungen

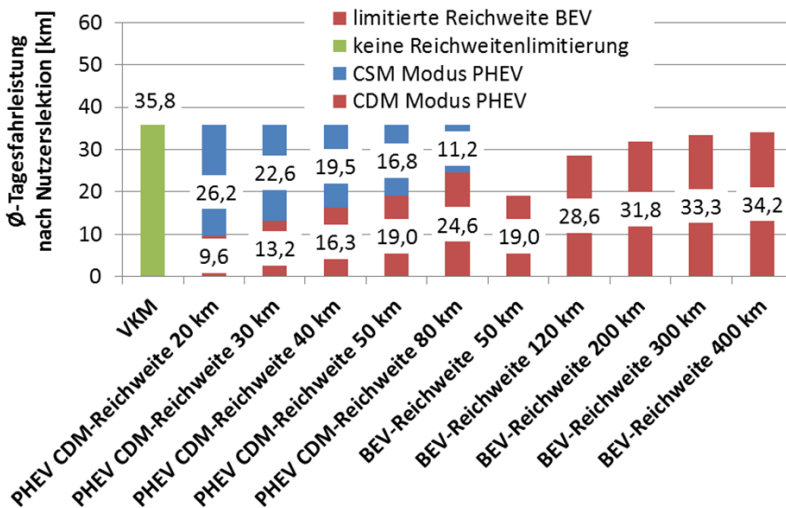
Das Wochentagsaggregat Dienstag bis Donnerstag zeigt einen guten Kompromiss bei den gezeigten Parametern der Nutzerprofile. Die Profile sind daher repräsentativ für die Werktage Montag bis Freitag und werden in den folgenden Analysen als Wochentagsaggregat innerhalb der Woche verwendet.

Für die Modellierung des Energiebedarfs der xEV im Energiesystemmodell sind die Zusammensetzungen zwischen CDM- und CSM-Reichweiten (vgl. Kapitel III.1) für PHEV wichtig, da diese für die Berechnung sowohl des Strom- als auch des Kraftstoffbedarfs der Fahrzeuge in den Szenarien als Trend entwickelt werden müssen. Weiterhin müssen für die Abbildung der Fahrzeuge im Energiesystemmodell Jahresfahrleistungen angegeben werden, welche eine wichtige ökonomische Inputgröße zur Bewertung der Kosten darstellen.

Eine Auswertung der Einschränkung von möglichen Tagesfahrleistungen durch limitierende elektrische Reichweiten und eine dementsprechende Selektierung der Nutzer für alle Wochentage zeigt Abbildung V-8. Sie verdeutlicht die Auswirkungen von nicht ausreichenden elektrischen Reichweiten zur Erbringung der täglichen Fahrleistung. Für Pkw ohne Reichweiten-

einschränkung (VKM und PHEV) ergibt sich die durchschnittliche Tagesfahrleistung von 35,8 km für alle Nutzer. Die Tagesfahrleistungen der PHEV-Nutzer teilen sich dabei in die CDM-Reichweite und die zu erbringende restliche Reichweite im CSM-Modus auf. Für eine limitierte elektrische Reichweite der BEV-Nutzer ergeben sich niedrigere mögliche Tagesfahrleistungen, da eine Ausselektion von Nutzern mit höherer Tagesfahrleistung als der maximalen elektrischen Reichweite erfolgt.

**Abbildung V-8: Potenzielle Tagesfahrleistung für angenommene Reichweiten; BEV und PHEV**



Quelle: eigene Rechnungen

Für eine BEV-Reichweite kleiner als 50 km am Tag ergibt sich eine mögliche durchschnittliche Tagesfahrleistung von nur 19 km bedingt durch die Ausselektion von nicht geeigneten Nutzern. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass keine untertägige Ladung vom Nutzer vorgenommen wird. Die gezeigten Tagesfahrleistungen sind damit als Worst-Case-Abschätzung für die resultierenden Tages- und Jahresfahrleistungen zu verstehen. Eine Steigerung der Reichweite auf 120 km bringt ca. eine Verdopplung der möglichen Tagesfahrleistung mit rein elektrischen Fahrzeugen, während deutliche Steigerungen über 300 km nur noch geringe Zuwächse bei der möglichen Tagesfahrleistung erwirken.

Vereinfachend wird bei der Nutzung von PHEV unterstellt, dass sich die Tagesfahrleistungen aus einer rein-elektrischen Reichweite und einer nachfolgenden restlichen Tagesfahrstrecke im CSM-Modus zusammensetzen. Im realen Fahrbetrieb der PHEV werden diese Fahrmodi je nach Betriebszustand und Anforderungen an Beschleunigung oder Geschwindigkeit kombiniert eingesetzt.

Die mögliche Tagesfahrleistung für PHEV-Nutzer entspricht der konventioneller Pkw, da die Limitierung der batterie-elektrischen Reichweiten durch den rein verbrennungsmotorischen Betrieb mit der Möglichkeit des Nachtankens von Kraftstoffen aufgehoben wird. Für eine



unterstellte elektrische CDM-Reichweite der PHEV von 50 km können im Durchschnitt über alle Tage 53,2 % der Tagesfahrleistung (entsprechend durchschnittlich 19,0 km am Tag) rein elektrisch zurückgelegt werden. Für 80 km CDM-Reichweite ergibt sich ein Wert von 68,6 % (entsprechend 24,6 km am Tag). Die mittlere CDM-Reichweite der verkauften Neufahrzeuge lag laut Auswertung in Kapitel III.3 im Jahr 2016 bei knapp 60 km. Die Reichweiten der Fahrzeughersteller beziehen sich dabei auf die Verbrauchswerte des europäischen Fahrzyklus und können teilweise erheblich von den Reichweiten im realen Betrieb abweichen.

Für die weiteren Schritte der Analyse und auch für die Abbildung der xEV im Energiesystemmodell wird in Anlehnung an die Studien [Linssen et al., 2012] und [Arndt et al., 2016] eine CDM-Reichweite im realen Straßenverkehr von 120 km für BEV und von 50 km für PHEV als Referenzwert für eine beginnende Marktpenetration angenommen. Diese Reichweiten bilden einen Kompromiss aus realer Reichweite, Kosten der Fahrzeuge und Kundenwunsch. Bedingt durch die teilweise deutlichen Degressionen bei den Batteriekosten und steigende Energiedichten der Batteriesysteme (vgl. Kapitel III.2) sind die Abschätzungen bezüglich Reichweiten der xEV und der damit verbundenen strukturellen Daten sowie Kosten als eher konservativ zu werten.

Die modellierten Bewegungsprofile der Grundgesamtheit bilden die Grundlage für die Modellierung möglicher Ladeleistungen eines xEV-Bestands für die Szenarien zur Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems in Deutschland (siehe Kapitel VII).

### ***V.2.2 Modellbildung der Heimladung im Tagesgang***

Mit Hilfe der gewonnenen Tagesprofile von Pkw-Nutzern werden im nächsten Schritt der Modellbildung der Strombedarf der xEV berechnet und mögliche Ladevorgänge zu Hause abgeleitet. Die Entscheidungslogik zur Modellierung möglicher Ladevorgänge am nächtlichen Stellplatz der Pkw ist in Abbildung V-9 beschrieben. Die Entscheidung, ob ein BEV oder ein PHEV für das Bewegungsprofil gewählt wird, wird nur von der Überschreitung der elektrischen Reichweite durch die Tagesfahrleistung des Nutzers abhängig gemacht. Es wird keine TCO-Kostenrechnung für ein ökonomisches Entscheidungskalkül zugrunde gelegt.

Zur Bestimmung des Beginns und der Dauer der Ladevorgänge wird für jeden Zeitschritt der Nutzerprofile geprüft, ob der Pkw des Nutzers aktiv am Straßenverkehr teilnimmt. Falls sich das Fahrzeug im geparkten Zustand befindet, wird je nach Antriebsart entschieden, ob der jeweilige Nutzer mit einem BEV die Tagesfahrleistung bewältigen kann. Für PHEV wird die benötigte Ladeenergie am Tag bei Überschreitung der CDM-Reichweite auf die mögliche Reichweite beschränkt. Befindet sich der Pkw am Stellplatz zu Hause und wurde die letzte Fahrt des Tages absolviert, wird je nach Ladeprämisse der Ladevorgang sofort gestartet oder der Ladevorgang, falls möglich, je nach Vorgabe durch die Steuerung verschoben. Der sofortige Start des Ladevorgangs nach Ankunft am nächtlichen Stellplatz entspricht dabei einer eher nutzerorientierten Ladung (vgl. Tabelle III-4), bei der eine möglichst schnelle Wiederherstellung der vollen elektrischen Reichweite des xEV und damit eine hohe Einsatzflexibilität des Fahrzeuges erreicht wird.

Die weiterhin untersuchte Ladung der Fahrzeuge zu Offpeak-Zeiten des Verteilnetzes entspricht einer netzorientierten Ladestrategie (vgl. Tabelle III-4) und wird bei sehr hohen Bestandsdurch-



vorliegenden Forschungsarbeit nicht betrachtet, da derzeit davon ausgegangen wird, dass der deutlich überwiegende Anteil der Ladeenergie am Heimplatz übergeben wird (vgl. [Peukert, 2012], [NPE, 2015]). Angemerkt sei an dieser Stelle, dass eine Schnell-Ladung sehr wohl für die Steigerung der Nutzerakzeptanz einen hohen Stellenwert hat und deutlich zur Nutzungserweiterung der Fahrzeuge bei nicht geplanten Fahrten beiträgt.

Da die Modellierung der Grundgesamtheit der Nutzergesamtheit im Vordergrund der Ladeleistungsmodellierung steht, wird jeweils ein Tagesverlauf der Ladeleistung für einen Bestand an reinen BEV und PHEV gebildet. Die Höhe des jeweiligen Bestands an BEV bzw. PHEV ist abhängig von den gesetzten Rahmenbedingungen der Verkehrs- und Energieversorgungsszenarien (siehe Kapitel VII). Für den Energiebedarf der Fahrzeuge werden die Verbrauchswerte der Studien [Linszen et al., 2012] und [Arndt et al., 2016] angenommen. Diese Verbrauchsdaten wurden mit Hilfe von längsdynamischen Simulationsmodellen errechnet, um eine Vergleichbarkeit der Verbrauchsdaten zu den konventionellen Antriebsarten mit Benzin- und Dieselmotor zu ermöglichen und Trends im Verbrauch berücksichtigen können. Bestandteil der Dimensionierung der Traktionsbatterie waren Entwicklungstrends der Energie- und Leistungsdichten. Der unterstellte Strombedarf der Fahrzeuge (siehe Anhang D) enthält bereits die Ladeverluste, so dass die Werte den Strombezug aus dem Netz angeben.

#### V.2.2.2 Ladestrategie „ungesteuertes Heimladen“

Für diese Ladestrategie wird angenommen, dass die xEV am nächtlichen Stellplatz ans Netz angeschlossen werden. Dieser Vorgang wird unmittelbar nach Rückkehr von der letzten Fahrt des Tages gestartet und die am Tag genutzte elektrische Energie vollständig wieder nachgeladen. Die Ladezeiten werden durch die angenommene Ladeleistung bestimmt. Basis für die Berechnung des Tagesgangs der Ladeleistung sind die Bewegungsprofile der Grundgesamtheit.

Das maximale Zeitfenster für das Laden bilden der Beginn der ersten Fahrt mit dem Pkw und der Rückkehrzeitpunkt nach der letzten Fahrt des Tages. Die Rückkehrzeitpunkte können den Wegeprofilen entnommen werden, wohingegen der Beginn der nächsten Fahrt am auf den Stichtag der Befragung folgenden Tag nicht in der MiD 2008 erfasst wurde. Daher wird angenommen, dass der erste Weg des folgenden Tages zur gleichen Uhrzeit beginnt wie der erste Weg des Stichtags. Diese Annahme ist bezogen auf einzelne Nutzerprofile wahrscheinlich oft nicht zutreffend. Für eine Grundgesamtheit von Nutzern ermöglicht sie dennoch eine realistische Verteilung der Ankunfts- und Abfahrtszeitpunkte vom nächtlichen Ladeplatz.

Die erforderliche Ladedauer wird berechnet aus der angenommenen Mode 1-Ladeanschlussleistung, der Tagesfahrleistung des Nutzers und dem angenommenen Strombedarf des jeweiligen xEV-Typs. Die Tagesfahrstrecke der BEV ist begrenzt auf 120 km und es werden nur Nutzer berücksichtigt, deren Tagesfahrleistung kleiner als 120 km ist. Bei PHEV ist die elektrische Reichweite begrenzt, aber nicht die Tagesfahrstrecke. Hier werden alle Fahrzeuge berücksichtigt, aber der Ladebedarf auf die CDM-Reichweite begrenzt.

Die in der MiD 2008 erhobenen Uhrzeiten für Beginn und Ende der Wege an den Stichtagen werden von den Befragten oft gerundet angegeben. Es kommt daher zu Häufungen insbesondere zu den Viertelstunden- und Stunden-Werten. Eine geringere Auflösung als 15 Minuten ist

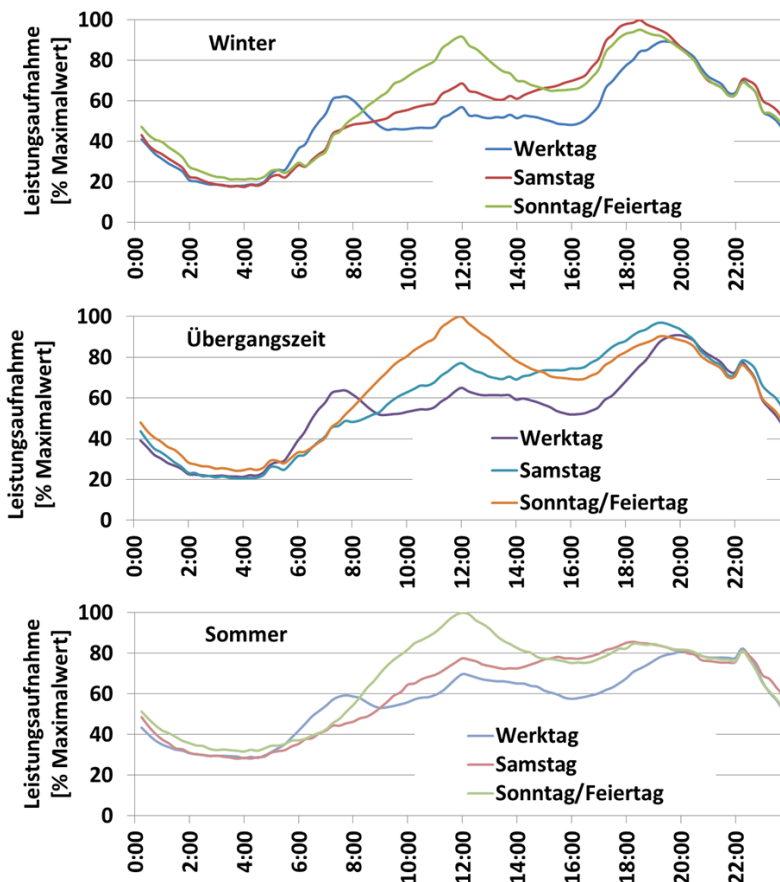
daher nicht zielführend. Die Nutzerprofile werden deshalb nur für 15-Minuten-Zeitschritte ausgewertet.

### V.2.2.3 Ladestrategie „Offpeak-Heimladen“

Der Beginn der Ladung wird bei allen xEV so verschoben, dass die durch den Ladebedarf bedingte zusätzliche Last im Verteilnetz in den Zeitraum des Netzlast-Minimums verschoben wird und in diesem Zeitraum eine möglichst gleichmäßige Netzbelastung verursacht. Für die untersuchte Heimladung der xEV ist die Stromnachfrage der Haushalte bestimmend für die Netzbelastung.

Abbildung V-10 zeigt Standardlastprofile für Haushalte in den Perioden Winter, Übergangsperiode und Sommer. Die Werte sind hierbei auf die Maximalleistung in der Jahresperiode normiert.

**Abbildung V-10: Standardlastprofile Haushalt (H0), dynamisch für verschiedene Wochentage und Jahreszeiten**



Quelle: [BDEW, 2012]

Die zeitlich aufgelöste Energienachfrage von privaten Haushalten wird durch Standardlastprofile (SLP) abgebildet. Das Lastprofil H0 für Haushalte gibt den Lastgang einer Gesamtheit von

Haushalten im Tagesverlauf wieder. Standardlastprofile stellen eine Vereinfachung dar, da nicht jeder Haushalt ein entsprechendes Abnahmeprofil aufweist. Die Profile sind als Überlagerung von Einzelprofilen zu verstehen.

Die Profile für Haushalte werden für Werktage, Samstage sowie Sonn- und Feiertage getrennt ausgewiesen. Außerdem erfolgt eine Unterscheidung nach den Jahresperioden Winter, Sommer und Übergangsperioden (Frühjahr und Herbst). [BDEW, 2012] In den Jahresabschnitten Winter und Übergang ist eine ausgeprägte Abendspitze der Nachfrage gegen 19:00 Uhr zu erkennen. In den Sommermonaten ist diese Spitze weniger ausgeprägt.

Die im Rahmen der Forschungsarbeit entwickelten Lastprofile der xEV-Heimladung sollen einen Beitrag dazu leisten, zukünftige zusätzliche Stromnachfragen durch das Laden von xEV in SLPs zu integrieren.

Ein deutlicher Rückgang der Stromnachfrage von Haushalten ist in allen Jahresperioden im Zeitraum zwischen 23 Uhr abends und 06:00 am Morgen des nächsten Tages zu verzeichnen. Die im Rahmen der Arbeit entwickelten Ladeleistungsprofile werden in einem Energiesystemmodell angewendet (siehe Kapitel VII). Die zeitliche Auflösung des Optimierungsmodells ermöglicht nur eine Berücksichtigung von vereinfachten Verläufen von Lastprofilen. Dies ist bedingt durch die Komplexität und den Datenumfang, der für eine zeitliche Auflösung aller Sektoren im Energiesystems erforderlich ist. Die Energienachfragen im Tagesverlauf werden im verwendeten Energiesystemmodell in nur zwei Zeitscheiben von 06:00 bis 21:59 Uhr (Tag) und von 22:00 bis 05:59 Uhr (Nacht) für die Jahresperioden Sommer, Winter und Übergang aggregiert berücksichtigt. Um den Zeitscheiben des Energiesystem-Modells gerecht zu werden, wird die Offpeak-Ladung in den Zeitraum zwischen 22 und 6 Uhr morgens verschoben. Dies entspricht nach Abbildung V-10 auch dem Zeitraum geringer Auslastung in einem von Haushalten dominierten Verteilnetz und erfüllt somit das Kriterium einer Off-Peak-Ladung. Die Berechnung der Ladedauern der Nutzerprofile erfolgt analog zur Ladestrategie „ungesteuertes Heimladen“.

### **V.3 Auswertung der Modellergebnisse zur Ladeleistung der Nutzergesamtheit**

Basierend auf den beschriebenen Daten und Modellansätzen werden Kennwerte und Tagesprofile ausgewertet, welche für die Abbildung der Ladeleistungsnachfrage eines xEV-Bestands im Energiesystemmodell notwendig sind. Weiterhin zeigen Parametervariationen, wie sich derzeit nur unsicher zu bestimmende Parameter wie xEV-Reichweiten, verfügbare Ladeleistungen der Ladestellen, der Strombedarf der xEV oder die Bestandszusammensetzung BEV zu PHEV auf die Ladeenergienachfrage im Tagesverlauf auswirken.

Für die Ladestrategien „ungesteuertes Heimladen“ und „Offpeak-Heimladen“ werden in diesem Kapitel als Referenzparameter eine Ladeanschlussleistung von 3,3 kW als gängige Ladeleistung für ein Mode 1-Heimladen (vgl. Tabelle III-3), ein elektrischer Strombedarf von 17,5 kWh/100 km für BEV und von 19,9 kWh/100 km für PHEV (fahrleistungsgewichteter Mittelwert der Bedarfswerte im Nah- und Fernverkehr für BEV bzw. PHEV für das Jahr 2020, Tabelle XIII-6 im Anhang) und eine gesicherte elektrische Reichweite ohne Nachladen von 120 km für BEV und CDM-Reichweite von 50 km für PHEV angenommen. Wie bereits erwähnt,

entsprechen die genannten Reichweiten nicht den Reichweiten des NEFZ, sondern stellen die minimale Reichweite für eine ganzjährige Pkw-Nutzung in allen Fahrsituationen dar, die auch durch den Fahrzeugbetrieb im Winter mitbestimmt wird.

Tabelle V-2 zeigt die Ergebnisse für die mittlere Ladedauer, die Ladeenergie und das Verhältnis der Ladezeit zur Standzeit am nächtlichen Stellplatz des Pkw als wichtige Kennwerte für die Beschreibung der Ladevorgänge. Die Tabelle enthält ebenfalls Werte für die Wochentag-Aggregate Dienstag bis Donnerstag und Samstag bis Sonntag. Das Aggregat Dienstag bis Donnerstag bildet das Ladeverhalten an Werktagen (Mo bis Fr) gut ab. Das Aggregat aus Samstag und Sonntag unterschätzt den Ladeenergiebedarf am Samstag und überschätzt ihn am Sonntag im Vergleich zur Einzelauswertung der jeweiligen Tage. Die Einführung von Wochentagsaggregaten macht dahingehend Sinn, da die Stichprobengrößen deutlich erhöht werden (vgl. Tabelle V-1). Dies ist auch für die Clusterung in nutzungshomogene Gruppen (vgl. Kapitel VI) wichtig, da es sonst zu sehr geringen Stichprobengrößen kommen kann. Die Zusammenfassung von typischen Tagen erhöht die Zahl an auswertbaren Bewegungsprofilen und erhöht damit die Repräsentativität der gebildeten Profile.

**Tabelle V-2: Auswertung der mittleren Ladedauern, Ladeenergien und Stillstandszeiten**

	Wochentag							Wochentag-Aggregate		
	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Di-Do	Sa-So	Alle
Durchschnittswerte der <b>BEV</b> -Nutzergesamtheit am Stichtag; @ Heimpladen 3,3 kW, Strombedarf 17,5 kWh/100km, Reichweite 120 km										
Verhältnis Ladezeit zu Standzeit am nächtlichen Stellplatz	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,09	0,07	0,12	0,08	0,11
Mittlere Ladedauer [h]	1,56	1,55	1,57	1,57	1,59	1,30	1,12	1,56	1,22	1,49
Mittlere Ladenergie pro Tag pro Nutzer [kWh]	5,16	5,12	5,19	5,17	5,23	4,31	4,23	5,16	4,27	4,97
Durchschnittswerte der <b>PHEV</b> -Nutzergesamtheit am Stichtag; @ Heimpladen 3,3 kW, Strombedarf CDM 19,9 kWh/100 km, CDM-Reichweite 50 km										
Verhältnis Ladezeit zu Standzeit am nächtlichen Stellplatz	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,06	0,04	0,08	0,05	0,07
Mittlere Ladedauer [h]	1,15	1,19	1,20	1,20	1,18	1,01	0,76	1,19	0,89	1,11
Mittlere Ladenergie pro Tag pro Nutzer [kWh]	3,81	3,92	3,95	3,95	3,90	3,33	3,29	3,94	3,31	3,76

Quelle: eigene Berechnungen

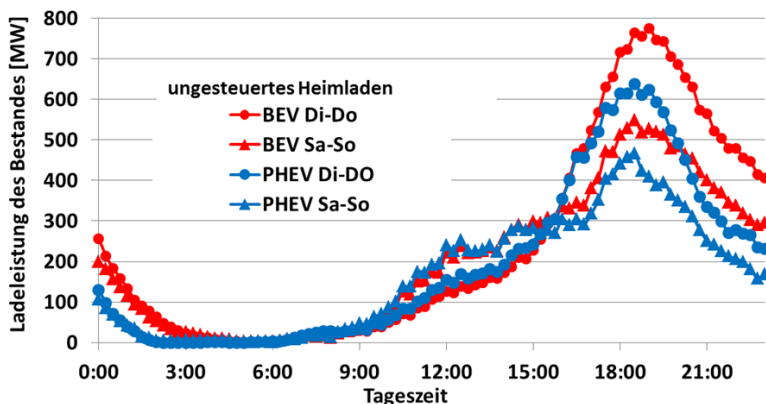
Der Vergleich der Mittelwerte für Nutzer aller Ladeprofile für BEV und PHEV zeigt, dass durch die niedrige CDM-Reichweite der PHEV der mittlere Ladeenergiebedarf am Tag um knapp 24 % geringer ist als bei BEV-Nutzern. Dafür verantwortlich ist die hohe Anzahl von Nutzern mit relativ niedrigen Tagesfahrleistungen (vgl. Abbildung V-6). Sowohl potenzielle BEV- als auch PHEV-Nutzer weisen geringe mittlere Ladezeiten und hohe mittlere, nächtliche Standzeiten am Stellplatz auf. Daraus ergibt sich das Potenzial, die Ladung entsprechend per Steuerung zu verschieben. Jedoch ist im Falle der BEV-Nutzer die Bereitschaft zur Teilnahme an solchen

gesteuerten Ladestrategien auch an die Bereitschaft gekoppelt, auf nicht geplante oder spontane Fahrten zu verzichten.

Die modellierten Ladeleistungsprofile werden im Folgenden jeweils für einen Bestand von 1 Mio. xEV hochgerechnet und als absolute zusätzliche Energienachfrage dargestellt. Wie bereits beschrieben, wird hierbei eine zeitliche Auflösung über dem Tagesgang von 15 Minuten gewählt. Der Anteil von nicht mobilen Nutzern am Tag ist in den Berechnungen der Ladeleistung berücksichtigt (vgl. Tabelle IV-5). Abbildung V-11 stellt den resultierenden Ladelaufverlauf des Bestands von 1 Mio. xEV über den Tagesverlauf dar.

Die Ladeleistung eines Bestands von 1 Mio. BEV erreicht ihr Maximum von 776 MW um 19 Uhr unter der Woche. Ein entsprechender Bestand an PHV erreicht eine niedrigere Gesamtladeleistung von 638 MW eine halbe Stunde früher im Tagesgang. Dies ist bedingt durch die niedrigeren elektrischen Fahranteile. Bei gemischten Fahrzeugbeständen – bestehend aus BEV und PHEV sind die Ladeleistungen gewichtet mit ihren Anteilen – additiv zu betrachten. An den Wochenenden wird eine um knapp 30 % geringere maximale Ladeleistung eine halbe Stunde früher im Tagesgang erreicht.

**Abbildung V-11: Resultierende Ladeleistung eines Bestands von 1 Million xEV, ungesteuertes Heimladen**



Quelle: eigenen Berechnungen

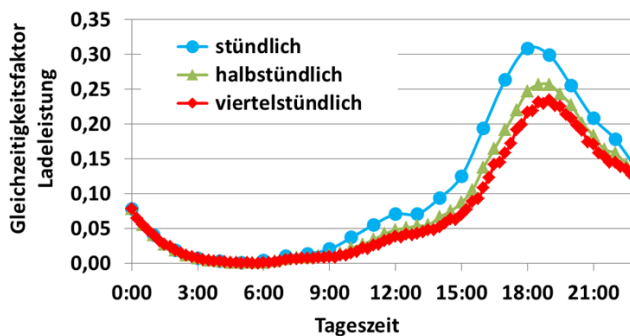
Bedingt durch den geringeren Ladebedarf der Plug-In-Hybride und die daraus resultierenden kürzeren Ladezeiten ist das Maximum der Ladeleistung eines entsprechenden PHEV-Bestands um 17,7 % geringer im Vergleich zum BEV-Bestand. Weiterhin wird die Spitze der Ladeleistung eine halbe Stunde eher im Tagesverlauf erreicht. Die unterstellte maximale Ladeleistung der Fahrzeuge am Stellplatz ist bei beiden Antriebsvarianten gleich angenommen. Der unterschiedliche Verlauf der kumulierten Ladeleistung ist bedingt durch kürzere Ladezeiten und die daraus resultierende niedrigere Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge bei PHEV. Der Gleichzeitigkeitsfaktor der Ladevorgänge wird als Verhältnis der tatsächlichen nutzungsbedingten Ladeleistungen zur installierten Kapazität aller Ladestellen definiert. Er überschreitet bei den BEV- bzw. PHEV-

Nutzern nicht den Wert von 0,235 bzw. 0,193. D. h. zu keinem Zeitpunkt werden mehr als 23,5 % der xEV gleichzeitig geladen. Diese Werte gelten für die Grundgesamtheit aller xEV-Nutzer und können bei einer deutlichen Häufung bestimmter Nutzergruppen (z. B. von Berufspendlern in Vororten) deutlich abweichen (vgl. Kapitel VI).

Der Vergleich der Verlaufsformen in der Woche und an den Wochenenden zeigt sowohl für BEV als auch für PHEV ähnliche Ausprägungen. Am Wochenende ist die Ladeleistung dabei deutlich mehr über den Tagesverlauf verteilt. Es bildet sich bei allen Verlaufsformen ein Maximum der Ladeleistung im Zeitraum 18:30 bis 19:00 Uhr aus. Vergleicht man diesen Verlauf mit den Standardlastprofilen der Haushalte (vgl. Abbildung V-10), so fallen für die Winter- und Übergangsperioden die Spitzen der Nachfragen der Haushalte und Elektrofahrzeuge zusammen. Bei hohen Durchdringungen von xEV im Bestand in Wohngebieten kann dies zu ungünstigen Netzbelastungen führen, welche einen Netzausbau oder eine Verteilnetz-orientierte Ladesteuerung unter Umständen erforderlich machen könnten.

Die gewählte zeitliche Auflösung des Modells in Bezug auf die Ladeleistung hat Auswirkungen auf die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen. Einen Vergleich der Tagesganglinien für das Wochentag-Aggregat Dienstag bis Donnerstag der BEV-Nutzer mit unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen zeigt Abbildung V-12.

**Abbildung V-12: Gleichzeitigkeitsfaktor von BEV-Ladevorgängen für das ungesteuerte Heimladen mit unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen, Dienstag bis Donnerstag**



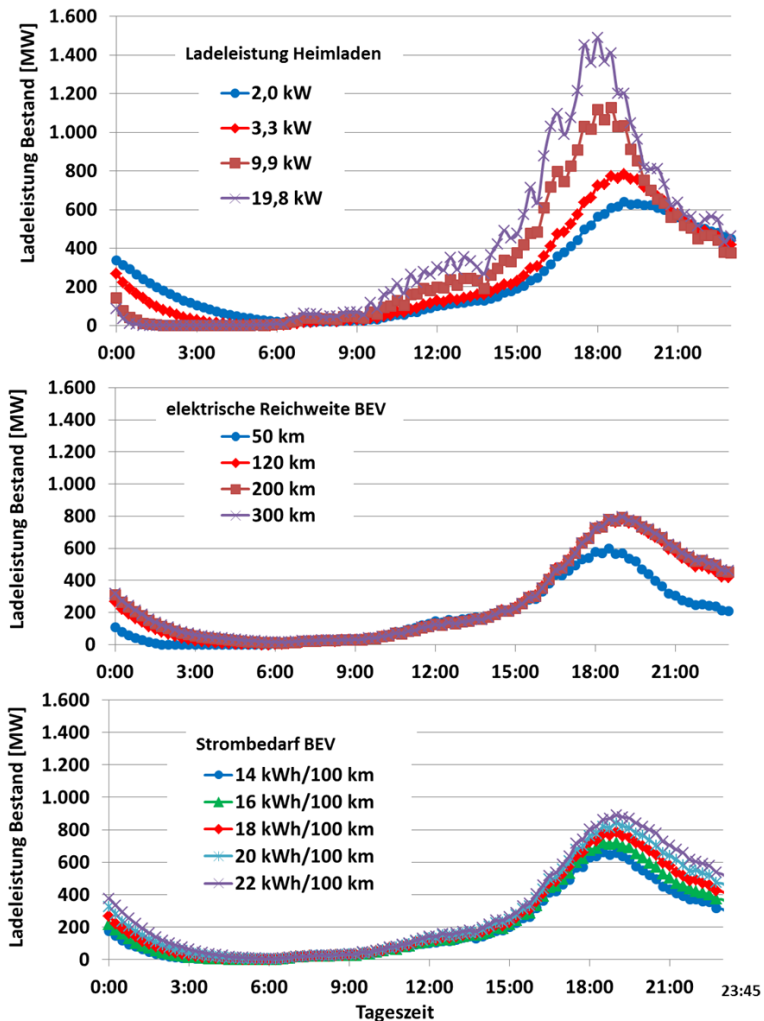
Quelle: eigenen Berechnungen

Der Tagesgang der Gleichzeitigkeit entspricht der ungesteuerten Heimladung von BEV. Für die Modellierung mit stündlichen Mittelwerten ergibt sich eine um knapp 24 % höhere Gleichzeitigkeit im Vergleich zur gewählten Auflösung von 15 Minuten. Dies ist dadurch begründet, dass alle Ladevorgänge, die in der Periode stattfinden, gewertet werden. Damit finden in einer Periode von 60 Minuten deutlich mehr Ladevorgänge gleichzeitig statt. Die Längen der Ladezeiten in der Periode werden dabei nicht berücksichtigt. Kurze Ladevorgänge werden somit im Stundenverlauf nicht adäquat abgebildet. Ein weiterer Grund für die gewählte Auflösung von 15 Minuten für die resultierende Ladeleistung liegt in der Vergleichbarkeit der Tagesprofile mit den Standardlastprofilen. Diese werden ebenfalls im Viertelstundenraster veröffentlicht (vgl. [BDEW,



2012]). Die Gleichzeitigkeit von Ladungen der xEV kann insbesondere in Verteilnetzen mit ungünstiger Topologie oder unzureichender Dimensionierung der Leitungen und weiterer Netzkomponenten bei höheren Durchdringungen von xEV zu Problemen führen. Für eine vertiefende Abhandlung der Verteilnetzbelastungen durch Elektromobilität wird auf Arbeiten von [Nobis, 2016] oder [Robinius et al., 2018] verwiesen.

**Abbildung V-13: Resultierende Ladeleistung für 1 Mio. BEV-Nutzer durch ungesteuertes Heimladen, Wochentagsaggregat Di bis Do, Parametervariationen der verfügbaren Leistung des Ladepunktes, elektrische Reichweite und Strombedarf BEV**



Quelle: eigene Berechnungen

Der Tagesverlauf der Ladeleistung hängt auch von den unterstellten Reichweiten und Strombedarfen der xEV ab. Beide Parameter sind derzeit noch mit deutlichen Unsicherheiten behaftet

und es kann nur bedingt auf historische Daten und Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Der Einfluss dieser Parameter wird durch eine Sensitivitätsanalyse nach der Ceteris-Paribus-Methode untersucht. In Abbildung V-13 werden die Ergebnisse für BEV-Nutzer der Wochentag-aggregate Dienstag bis Donnerstag gegenüber gestellt. Die im Rahmen der Analyse gewählten Referenzwerte sind jeweils als rote Linie mit Rauten-Markierung gekennzeichnet.

Der Einfluss der verfügbaren Ladeleistung am Heimplatz zeigt einen deutlichen Einfluss auf Verlauf und Höhe der gesamten Ladeleistung des BEV-Bestands von angenommenen 1 Mio. BEV. Die gewählten Abstufungen der Ladeleistungen entsprechen den gängigen Werten von Mode 1- und Mode 2-Ladepunkten (vgl. Tabelle III-3). Eine Verdreifachung der verfügbaren Ladeleistung auf 9,9 kW erhöht die Ladeleistungsspitze nur um 47,7 %. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge durch die kürzeren Ladezeiten sinkt und damit nur ein moderater Anstieg der Gesamtleistung erfolgt. Weiterhin verschiebt sich der Peak der Ladung hin zu früheren Uhrzeiten. Bei höheren angenommenen Ladeleistungen von 19,8 kW liegen viele Ladevorgänge deutlich unterhalb von 15 Minuten und es kommt zu einem nicht stetigen Verlauf im Tagesgang. Dies ist der bereits angesprochenen Häufung von Endzeiten zu halben und vollen Stunden als Endzeiten der jeweiligen Wegeinterviews geschuldet.

Die Sensitivität bezüglich der angenommenen Reichweite der BEV ist für Werte unterhalb der gewählten Referenz von 120 km deutlich ausgeprägt. Eine Steigerung der Reichweiten und damit die Erweiterung des Nutzerkreises oberhalb des Referenzwertes zeigen nur einen sehr geringen Einfluss auf die Ladeleistung.

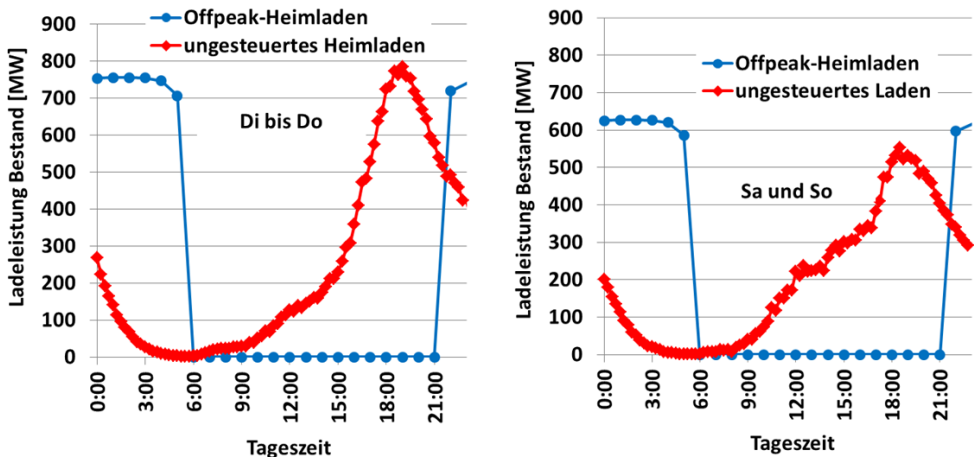
Falls sich der bereits gezeigte Trend zu größeren elektrischen Fahrzeugen verstetigen sollte, sind die Strombedarfswerte entsprechend hin zu höheren Werten anzupassen. Der untere Graph in Abbildung V-13 zeigt den Einfluss höherer Strombedarfe für den gewählten BEV-Bestand. Eine Erhöhung des Strombedarfs der BEV um 11 % ausgehend vom Referenzwert erhöht die Spitze der Ladeleistungsnachfrage um 7,4 %. Der Tagesverlauf der Ladeleistung wird durch einen geänderten spezifischen Strombedarf der batterieelektrischen Pkw nicht signifikant geändert.

Abschließend zeigt Abbildung V-14 den Vergleich der Ladestrategien „ungeregeltes Heimladen“ und „Offpeak-Heimladen“. Für die Ladestrategie „Offpeak-Heimladen“ wird der Ladebeginn so verschoben, dass die Ladelaast möglichst gleichmäßig auf eine Zeit niedriger Nachfrage verteilt wird. Wie bereits beschrieben, wird für die Analyse das Zeitfenster 22:00 bis 6:00 Uhr des nächsten Tages für das Laden gewählt. Dies ist konsistent zu den festen Zeitscheiben des verwendeten Energiesystemmodells. Die Leistung der Ladestellen kann bei dieser Ladestrategie so geregelt werden, dass eine gleichmäßige Ladelaast der Nutzergesamtheit erzielt werden kann. Die Ladeenergienachfrage bei dieser Ladestrategie bleibt konstant und entspricht dem Integral des ungesteuerten Profils. Es nehmen nur diejenigen Nutzer an der Laderegulung teil, deren Nutzerprofile eine Verschiebung der Ladezeit in den Offpeak-Bereich erlauben, so dass am nächsten Morgen die erste Fahrt mit voller Batterie gestartet werden kann. Für die potenziellen BEV-Nutzer können mehr als 97 % der Grundgesamtheit an einer solchen Ladestrategie teilnehmen, ohne dass eine Einschränkung der Fahrzeugnutzung erfolgt. Die Teilnahme an einer

solchen Laderegulation bedeutet jedoch eine Einschränkung bei spontanen, nicht geplanten Fahrten. Dies kann die Nutzerakzeptanz solcher Ladestrategien deutlich beeinflussen (vgl. [Geske, 2014]).

Die Ladestrategie „Offpeak-Heimladen“ kommt zu einer ähnlich hohen maximalen Ladeleistung, die nach den getroffenen Annahmen im Zeitfenster zwischen 22:00 und 06:00 Uhr konstant bleibt. Die erzeugten steilen Rampen dieser zeitgesteuerten Ladestrategie fallen in Zeitpunkte mit niedriger Verteilnetzbelastung und sind zudem sehr gut planbar. Weitere an der Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien orientierte oder kostenorientierte Ladestrategien sind möglich, aber nicht Bestandteil der hier vorgestellten Untersuchung. An dieser Stelle sei z. B. auf die Studien [Heinrichs, 2013] oder [Nobis, 2016] verwiesen.

**Abbildung V-14: Ladeleistung eines Bestands von 1 Million BEV, Vergleich ungesteuertes Heimladen versus Offpeak-Heimladen**



Quelle: Eigene Berechnung

Die hier gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf niedrige Bestandsanteile von xEV und die dargestellten zusätzliche Ladeleistungen stellen für die gesamte Stromversorgung, den Stromtransport und die Stromverteilung keine allzu große Herausforderung dar. Sollte sich der Bestandsanteil deutlich erhöhen, so wird insbesondere in den Verteilnetzen eine netzorientierte Ladung der Fahrzeuge unabdingbar sein. (vgl. [Robinius et al., 2018])

Für die zeitliche Modellierung der zusätzlichen Stromnachfrage ergibt sich mit dem gewählten Ansatz die Möglichkeit, an das Szenario angepasste Tagesnachfrageprofile zu hinterlegen. Bedingt durch die sehr begrenzte zeitliche Auflösung des verwendeten Energiesystemmodells zur Berechnung von Energieszenarien mit Elektromobilität (siehe Kapitel VII) geht ein Teil der Informationen bei der Aggregation jedoch verloren. Die Erhöhung der zeitlichen Auflösung in komplexen Energiesystemmodellen mit der Abbildung aller Energiesektoren ist derzeit Gegenstand von Forschungsaktivitäten. Eine Übersicht von existierenden Modellen und Trends in der

Modellbildung von Energiesystemen ist zum Beispiel in [Weijermars et al., 2012] oder [Pfenninger et al., 2014] zu finden.

#### V.4 Vergleich der Ergebnisse mit der Mobilitätsstatistik aus dem Jahr 2002

Da die hier vorgestellte Vorgehensweise auf der Datenerhebung MiD 2008 basiert, ist eine Aktualisierung der Ladenergienachfrage nur im Rahmen der diskontinuierlichen Datenerhebung möglich. Ein Vergleich mit den Erhebungsdaten MiD 2002 soll Aufschlüsse über mögliche Trends geben. Die MiD-Erhebungen weisen eine Periodizität von 6 Jahren auf. Da die Daten der aktuellen Erhebungswelle aus dem Jahr 2016 zum Zeitpunkt der Erstellung der Analysen noch nicht zur Verfügung stand, wird an dieser Stelle auf die Befragung aus dem Jahr 2002 zurückgegriffen. Die Daten stehen für die Beantwortung von wissenschaftlichen Fragestellungen zur Verfügung.

Die Datenaufbereitung und die Modellierung der Bewegungsprofile werden analog zur beschriebenen Vorgehensweise (siehe Kapitel V.2.2) durchgeführt. Die Datenstrukturen der Befragungen weisen leichte Unterschiede auf. Zusätzlich weisen einige Datensätze fehlende Einzelinformationen auf, was zu einer deutlichen Reduktion der auswertbaren Bewegungsprofile von Pkw-Nutzern führt. Für die Modellierung des Ladelastverlaufs stehen für alle Wochentage 6.286 und für die Wochentagsaggregate Dienstag bis Donnerstag sowie Samstag bis Sonntag zusammen 4.418 Einzelprofile für eine Auswertung zur Verfügung. Die Anzahl der auswertbaren Datensätze der MiD 2002 reduziert sich deutlich um über 60 % im Vergleich zur MiD-Befragung aus dem Jahr 2008.

**Tabelle V-3: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte zwischen den Erhebungen MiD 2002 und MiD 2008**

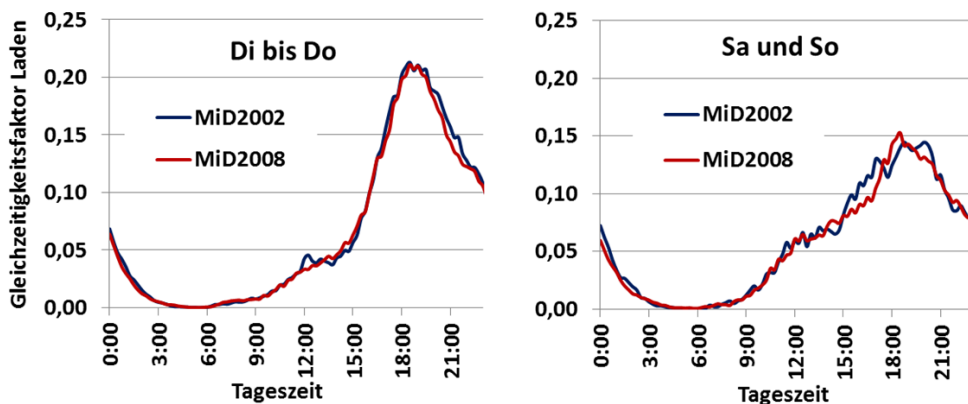
Kennwerte	MiD 2002			MiD 2008		
	Wochentagsaggregat Di bis Do					
	Anzahl Nutzer	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl Nutzer	Mittelwert	Standardabweichung
Startzeit der ersten Fahrt [hh:mm] & [h]	2977	9:27	3,68 h	8600	9:29	3,88 h
Endzeit der letzten Fahrt [hh:mm] & [h]		17:02	3,53 h		17:20	3,65 h
Durchschnittliche Standzeit Tag [h]		3,90	3,53		3,88	3,51
Tagesfahrleistung [km]		37,4	22,0		35,9	45,6
	Wochentagsaggregat Sa bis So					
Startzeit der ersten Fahrt [hh:mm] & [h]	1.441	11:20	3,85 h	3.871	11:35	3,83 h
Endzeit der letzten Fahrt [hh:mm]& [h]		16:14	4,12 h		16:11	3,82 h
Durchschnittliche Standzeit Tag [h]		2,24	2,66		2,08	2,60
Tagesfahrleistung [km]		37,2	59,9		32,0	50,7

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle V-3 fasst die Auswertung von ladebestimmenden Kennwerten der Bewegungsprofile der MiD 2002 zusammen und vergleicht diese mit den Werten aus 2008. Zur Erhöhung der Stichprobenzahl werden die Wochentagsaggregate angewendet.

Die Abweichungen der Mittelwerte der ausgewerteten Bewegungsprofile sind gering. Es gibt eine Tendenz bei der MiD 2002 in Richtung früherer Ankunftszeiten zu Hause und einer höheren Tagesfahrleistung von ca. +4,2 % innerhalb der Woche bzw. von +16,3 % am Wochenende. Abbildung V-15 zeigt den Gleichzeitigkeitsfaktor des modellierten Tagesgangs der Ladeleistung für die Grundgesamtheit für beide Erhebungen.

**Abbildung V-15: Gleichzeitigkeitsfaktor von BEV-Ladevorgängen für das ungesteuerte Heimladen für die Wochentagsaggregat Di bis Do und Sa bis So; Vergleich der MiD 2002 und MiD 2008 Bewegungsprofile**



Quelle: eigenen Berechnungen

Die Verläufe sind sehr ähnlich und es lassen sich keine belastbaren Trends erkennen. Der etwas fluktuierende Verlauf der Kurven ist auf die Häufung auf Viertelstundenwerte bei den Wegeterviews zurückzuführen. Beide Verläufe weisen fast gleich hohe Peaks bei der Gleichzeitigkeit unter der Woche auf. Am Wochenende gestalten sich der Peak der Gleichzeitigkeit und damit auch der der resultierenden Ladeleistung für die Erhebung MiD 2002 etwas flacher. Insgesamt bleibt anzumerken, dass eine Übertragbarkeit des Ansatzes trotz leicht geänderter Datenstrukturen und Wechsel von Merkmalen möglich ist.

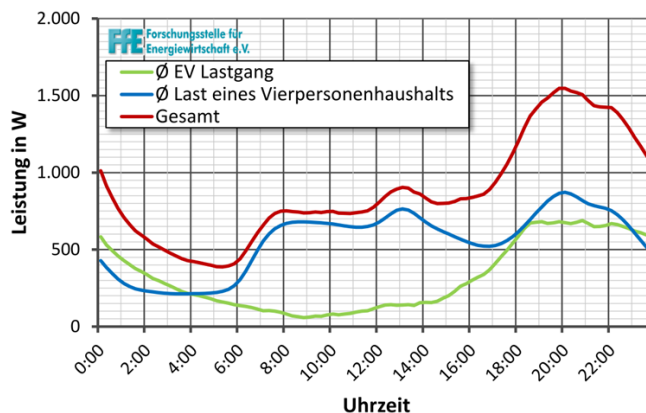
Die Abbildung der Elektromobilität in Szenarien zur zukünftigen Energieversorgung ist bereits Bestandteil von einigen Studien und Analysen. Im Folgenden werden die gezeigten Ergebnisse bezüglich der xEV-Ladenergienachfrage mit Literaturwerten verglichen.

In einer Analyse von [Heinrichs, 2013] wird die Elektromobilität als Bestandteil eines zukünftigen europäischen Elektrizitätssystems untersucht. Zu diesem Zweck werden in einer Szenario-Analyse Ladeprofile für Deutschland und weitere europäische Länder vorgestellt. Im Gegensatz zur hier gezeigten Analyse wird nicht nur von einer Heimladung am nächtlichen Stellplatz ausgegangen, sondern auch eine Ladung während überträgiger Parkvorgänge unterstellt. Die Studie weist für die unregelmäßige Ladung mit sofortigem Vollladen normierte Ladebedarfsprofile für Werktagen und einen Wochenendtag in Deutschland aus, welche an Werktagen ein abendli-

ches Maximum um 18:30 Uhr von knapp 10 % des gesamten täglichen Ladeenergiebedarfs erreicht bzw. am Wochenende eine Spitze gegen 13:00 Uhr mit einem Maximum von 8,5 % des täglichen Ladebedarfs. Für einen Bestand von 1 Mio. BEV entspricht dies bei einer unterstellten Mode 1-Ladung einer gesamten Ladeleistung in der Spitze von 330 MW in der Woche und von 298 MW am Wochenende. Am Werktag wird die Ladeleistung in der Studie durch zwei Ladespitzen gekennzeichnet, welche durch den morgendlichen Berufsverkehr und das abendliche Heimkehren gekennzeichnet sind. Am Wochenende gibt es jeweils nur einen sehr flach verlaufenden Peak mit Plateau in den Mittagsstunden. Im Vergleich zur hier vorgestellten Analyse fallen die Leistungsspitzen deutlich niedriger aus. Die deutlichen Abweichungen sind durch die Annahme begründet, dass die Fahrzeuge auch eine erhebliche Anzahl an unertägigen Ladevorgängen durchführen können. Somit stellt die Beschränkung der Ladevorgänge auf den nächtlichen Stellplatz eine Worst-Case-Abschätzung für die zu erwartende Ladeleistung dar.

Eine Studie von [Nobis et al., 2011] basiert auf der messtechnischen Erfassung von mehr als 100 Bewegungsprofilen von Fahrern konventioneller Fahrzeuge mit Schwerpunkt auf Privatpersonen. Darauf aufbauend wird ein Ladeprofil generiert und dem Lastgang eines mittleren Haushalts mit vier Personen gegenüber gestellt. Der in Abbildung V-16 dargestellte Verlauf der Heimladung von xEV zeigt eine gute Übereinstimmung des Verlaufs mit den im Rahmen der vorliegenden Arbeit errechneten Ladeprofilen. Jedoch ist die Peakbildung deutlich ausgeprägter.

**Abbildung V-16: Mittlerer Lastgang (ungesteuertes Heimladen) eines privat genutzten xEV und eines durchschnittlichen Haushalts**



Quelle: [Nobis et al., 2011]

Eine Arbeit von [Samweber et al., 2015] leitet ebenfalls aus gemessenen Bewegungsprofilen von 61 BEV eines Demonstrationsvorhabens einen Tagesgang der Ladeleistungen her. Diese Auswertung kommt zu einer geringeren mittleren Ladeleistung von nur knapp 300 W pro BEV (Leistung pro Ladepunkt 3,5 kW, ungesteuertes Heimladen) in der Spitze um ca. 18 Uhr. Eine Erhöhung der Ladeleistung auf 14 kW lässt den Ladeleistungspeak nur um knapp 40 % ansteigen und

verschiebt diesen um etwa zwei Stunden zu früheren Uhrzeiten. Dieser Zusammenhang ist in guter Übereinstimmung mit den zuvor gezeigten Ergebnissen

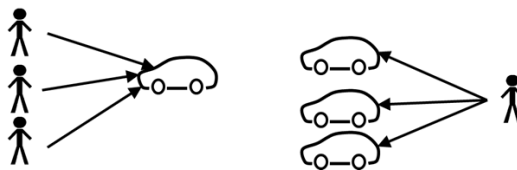
Die Studie [Nobis, 2016] weist einen maximalen Gleichzeitigkeitsfaktor von etwa 25 % gegen 19 Uhr im Tagesgang innerhalb der Woche aus. Die maximale Ladegleichzeitigkeit des gesamten Jahres kann jedoch bei Betrachtung konkreter Wohngebiete mit einer nicht der Grundgesamtheit entsprechenden Verteilung der Nutzung um den Faktor zwei bis drei höher sein als die mittlere Ladegleichzeitigkeit.

In einer Studie von [Dallinger, 2012] wird basierend auf den MiD 2008-Daten ein stochastisches Ladeleistungsmodell entwickelt. Die Wahrscheinlichkeiten für den Beginn einer Fahrt unter der Woche weisen einen ähnlichen Verlauf auf mit einem Peak in der Fahraktivität von ca. 11 % um 7:45 Uhr und einem zweiten Peak von ca. 7 % um 18:15 Uhr. Bedingt durch eine speziell auf die Käuferschicht zugeschnittene Auswahl der MiD-Datensätze in dieser Studie unterscheiden sich die Ergebnisse von der hier analysierten Grundgesamtheit.

### V.5 Diskussion des Modellansatzes und der Ergebnisse

Der gewählte Ansatz zur Modellierung der Ladeleistung enthält einige Annahmen, welche in diesem Kapitel kritisch hinterfragt werden. Eine wesentliche Annahme ist die Unterstellung, dass eine Betrachtung der Nutzerprofile, welche im Laufe der Stichtagbefragung für Wege einen eigenen Pkw benutzt haben, ähnliche Aussagen wie die Betrachtung der Pkw-Wegeprofile zulässt. Allerdings kann ein Pkw von mehreren Nutzern im Tagesverlauf gefahren werden oder ein Nutzer mehrere Pkw zur täglichen Mobilität nutzen, falls mehr als ein Pkw im Haushalt vorhanden ist (Abbildung V-17).

#### Abbildung V-17: Problem der Mehrfachnutzung von Pkw durch Nutzer



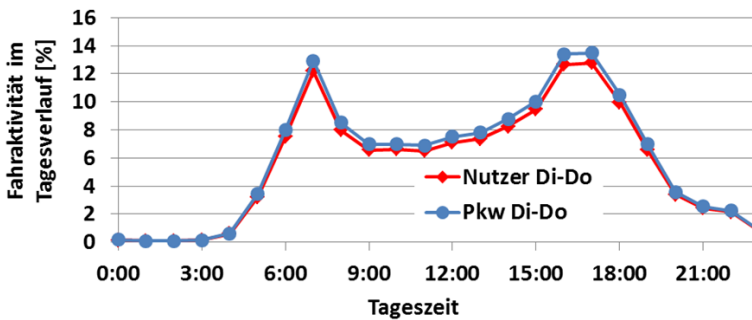
Quelle: eigene Darstellung

Zur Analyse dieses Sachverhalts werden analog zur Vorgehensweise, die zur Bildung der Nutzerprofile bereits beschrieben wurde (siehe Kapitel V.2.2), die Tagesprofile für die in der MiD 2008 erfragten Pkw erzeugt. Hierzu wird die Pkw-Zuordnung zum Haushalt genutzt, um die Datensätze entsprechend eindeutig den Wegedatensätzen zuzuordnen.

Daraus ergeben sich mit den bereits beschriebenen Beschränkungen der Datensätze auf private Fahrten und Tage, welche als typisch für das persönliche Mobilitätsverhalten bezeichnet werden, 16.895 mögliche Pkw-Bewegungsprofile. Davon starten 13.962 Pkw vom nächtlichen Stellplatz aus ihre erste Fahrt. Um einen Vergleich der Nutzerprofile und der Pkw-Profile durchzuführen, ist in Abbildung V-18 die Fahraktivität (siehe Gleichung V-2) der Pkw- bzw. der

Nutzergesamtheit für den Mittwoch und das Wochentagsaggregat Dienstag bis Donnerstag im Tagesverlauf dargestellt. Der Vergleich zeigt nur geringe Abweichungen zwischen der Nutzerbetrachtung und der fahrzeugspezifischen Modellierung. Der Vergleich stützt also die Gültigkeit des gewählten Nutzeransatzes.

**Abbildung V-18: Vergleich der Fahraktivitäten für Pkw-Nutzer und Pkw-Profile**



Quelle: eigene Berechnungen

Weiterhin zeigt Tabelle V-4 die Abweichungen für Mittelwerte der Bewegungsprofile von Nutzern und Fahrzeugen. Die Nutzerbetrachtung weist für die durchschnittlichen Startzeiten in der Woche positive Abweichungen im Bereich zwischen + 3,0 bis +3,8 % auf, d. h. eine Auswertung nach Pkw ergibt leicht verfrühte Startzeiten vom nächtlichen Stellplatz. Die Abweichungen der Rückkehrzeit zum Stellplatz sind unter 1 %. Auch die Abweichungen bei den Standzeiten am Tag und in der Nacht am Stellplatz sind gering. Größere Abweichungen zwischen -5,8 % und -8,2 % sind bei den Tagesfahrleistungen zu erkennen. Die Bildung der Nutzerprofile unterschätzt die tatsächliche Tagesfahrleistung in der Woche um maximal 8,2 %. Dies lässt sich damit erklären, dass einige Pkw von mehreren Nutzern gefahren werden und damit eine Erhöhung der Pkw-Tagesfahrleistung eintritt.

**Tabelle V-4: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte Nutzer versus Pkw**

Änderung $\bar{\varnothing}$ -Werte Nutzer-Grundgesamtheit im Vergleich zur Pkw Grundgesamtheit [%]					
	Startzeit	Endzeit	$\bar{\varnothing}$ Standzeit Tag	$\bar{\varnothing}$ Standzeit Nacht	Tagesfahrleistung
<b>Dienstag</b>	+ 3,2	-0,7	-1,2	+ 2,5	-5,8
<b>Mittwoch</b>	+ 3,0	-0,9	-1,6	+ 2,5	-6,1
<b>Donnerstag</b>	+ 3,8	-0,8	-0,4	+ 3,2	-8,2
<b>Di bis Do</b>	+3,3	-0,8	-1,1	+2,7	-6,7

Quelle: eigene Berechnungen

Insgesamt scheint aber eine sehr feste Zuordnung der Nutzer zum jeweiligen Pkw im Haushalt zu bestehen, so dass die Analyse der Bewegungsprofile von Nutzern zur Modellierung der



Ladeleistung von xEV gerechtfertigt werden kann. Die Unterschätzung der Tagesfahrleistung im Nutzeransatz hat zur Folge, dass der Energiebedarf leicht unterschätzt wird. Dies muss bei der Modellierung der Ladeenergienachfrage im Energiesystemmodell durch eine entsprechende Anpassung der Jahresfahrleistung berücksichtigt werden.

Als weiterer Punkt sei bei der Verwendung der MiD 2008 darauf hingewiesen, dass nur die Wege der Personen erfasst wurden, die zum Befragungstichtag mobil waren. Eine zusätzliche Auswertung zu diesem Punkt wurde im Rahmen der MiD 2008-Erhebung durchgeführt. Die Interviews der MiD 2008-Erhebung enthält auch die Frage, ob ein Pkw am Stichtag zur Verfügung gestanden hätte, falls die Personen am Stichtag nicht mobil waren. Diese Auswertung lässt eine Schlussfolgerung zu nicht mobilen Pkw-Nutzern an den Stichtagen zu. Für alle Tage liegt der Anteil von nicht mobilen Personen mit möglicher Pkw-Nutzung bei 8,9 %, d. h. ca. jeder 11. Pkw-Nutzer war nicht mobil. Dies wird in den Modellierungen der resultierenden Ladeleistung entsprechend berücksichtigt.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Modellierung von potenziellen xEV-Nutzern und daraus abgeleiteten Tagesganglinien der Heimpladeleistung basiert auf einer großen Stichprobe, bei deren Erhebung eine gezielte Auswahl mit Blick auf einen repräsentativen Bevölkerungsschnitt getroffen wurde. Es ist daher davon auszugehen, dass die Heimpladeleistung mit einer ausreichenden Wahrscheinlichkeit abgebildet wird. Die gewählte Vorgehensweise eignet sich für eine Betrachtung von übergeordneten Planungen der nationalen Energieversorgung und deren zukünftige strategische Ausrichtung. Das Ziel der Abbildung der Elektromobilität in einem nationalen Energiesystemmodell und der Bewertung von möglichen Auswirkungen ist dadurch möglich. Für die detaillierte Abbildung von kleinräumigen Betrachtungen trifft die Wahl der Grundgesamtheit aller Nutzer in Deutschland nicht zu, da regional die Bevölkerungsschichten sehr unterschiedlich zusammengesetzt sind und so nicht der Grundgesamtheit aller Nutzer entsprechen.

Ein weiterer wesentlicher Nachteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass die Berücksichtigung z. B. von zukünftig möglichen soziodemografischen Effekten in Szenario-Analysen nicht möglich ist. Eine Clusterung der Gesamtheit in nutzungshomogene Gruppen mit ausreichenden Stichprobengrößen und daraus abgeleiteten Ladelastverläufen ermöglicht eine solche Berücksichtigung von Demografie-Trends. Als Weiterentwicklung wird im folgenden Kapitel VI ein Data-Mining-Verfahren vorgestellt, welches die Nutzergesamtheit in nutzungshomogene Cluster zerlegt.

## VI. Modellierung der Ladeleistung von nutzungshomogenen Gruppen

Das Energieversorgungssystem wird durch technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Trends beeinflusst. Der Verkehr und damit auch die Elektromobilität sind ein wichtiges Teilsystem und ebenfalls einem entsprechenden Wandel unterworfen. Gerade in Zukunftsszenarien der Energieversorgung mit mittel- und langfristigen Entwicklungen über Dekaden spielt neben dem technischen Fortschritt und den politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen auch der demografische Wandel der Bevölkerung eine wichtige Rolle. So werden zum Beispiel durch die Verschiebung der Alters- und Erwerbstätigen-Struktur Einflüsse auf die Energieversorgung erwartet, die es in Energieszenarien zu berücksichtigen gilt (vgl. [Schlesinger et al., 2014]).

Ziel der Modellbildung und der Analyse in diesem Kapitel ist die Identifikation von soziodemografischen Nutzermerkmalen (keine technischen Parameter oder Kennwerte der Bewegungsprofile), welche die Nachfrage nach Ladeleistung im Tagesgang deutlich beeinflussen. Dies dient zur Erkennung von möglichen nutzungshomogenen Verhaltensweisen bestimmter Gruppen und deren Einfluss auf das Ladeverhalten.

Nach der Studie [Shell & Prognos, 2014] werden für den motorisierten Individualverkehr mit Pkw (mit 57 % im Jahr 2015 größter Endenergieverbraucher bezogen auf den Gesamtenergiebedarf des Verkehrs, vgl. Kapitel VII.2) folgende Merkmalsstrukturen der Gesellschaft und deren Auswirkung auf die Pkw-Nutzung diskutiert:

- Alter,
- Geschlecht,
- Einkommen / Ausgabeverhalten,
- Ausbildung,
- Erwerb,
- Haushalt und
- Siedlungsentwicklung.

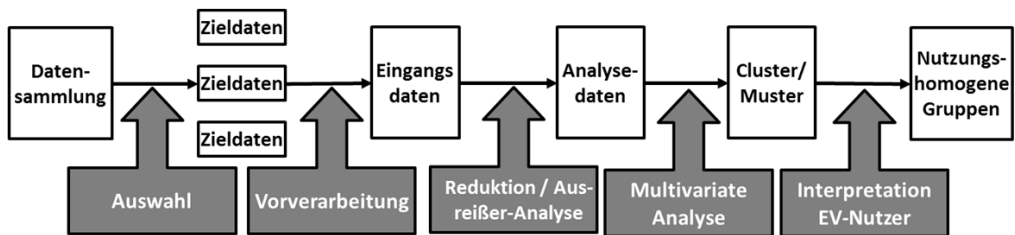
Als treibende Faktoren für die Pkw-Nutzung werden ein höheres Einkommen, höhere Anteile an Erwerbstätigen, die Abwanderung aus der Kernstadt in Richtung städtisches Umland und die Steigerung der Motorisierung älterer Menschen gesehen. Als dämpfende Faktoren werden längere Ausbildungszeiten, weniger Kinder, die Verstädterung und der Generationswechsel mit geänderten Mobilitätsbedarf gesehen.

Bezogen auf die Fragestellung der Bildung von Tagesprofilen der Ladeleistung stellt sich die Frage, welche soziodemografischen, haushaltstypisierenden und siedlungsstrukturellen Merkmale einen Einfluss auf die Ladekennlinie des Heimladens am nächtlichen Stellplatz haben. Dazu muss untersucht werden, ob es nutzungshomogene Gruppen gibt, welche die Tagesprofile der Ladeleistung entscheidend beeinflussen, und ob eine Zuordnung dieser Gruppen zu soziodemografischen, haushaltstypisierenden oder siedlungsstrukturellen Strukturen möglich ist. Ziel der hier vorgestellten Modellierung ist daher eine Aufteilung der Grundgesamtheit aller xEV-Nutzer in eine überschaubare Anzahl nutzungshomogener Gruppen. Eine Zuordnung dieser Gruppen zu

Merkmale der Nutzer muss dabei möglich sein. Nur so ist eine Berücksichtigung von demografischen Trends oder die Ausprägung spezifischer Käuferschichten in den Szenarien-Analysen zur resultierenden Ladeleistung der xEV in einem Energiesystem möglich. Die bereits in Kapitel V vorgestellte Modellierung bietet diese Option nicht, da sie nur die Grundgesamtheit der Nutzer in den Blick nimmt.

Zur Bildung von nutzungshomogenen Gruppen wird das Verfahren des Data-Mining auf die Gesamtheit aller möglichen xEV-Nutzer adaptiert. Data-Mining bezeichnet allgemein die Generierung von Mehrwerten aus bestehenden Datensätzen. Der Prozess beinhaltet die Anwendung statistischer Methoden auf große Datenbestände. Ziel ist die Identifizierung von Querverbindungen, Trends oder Clustern. Der Datenumfang macht meist eine Anwendung von computergestützten Methoden notwendig. Hierzu steht eine Vielzahl an Algorithmen und vorgefertigten Softwarelösungen zur Verfügung. Der Begriff Data-Mining wird derzeit inflationär für alle Arten der Erhebungen und Auswertungen von großen Datenmengen gebraucht. Die Erfassung, Speicherung und Verarbeitung von großen Datenmengen wird dabei fälschlicherweise zum Prozess des Data-Mining hinzu gezählt. Eine genaue Definition des gesamten Verfahrens „Knowledge Discovery in Databases“ (kurz KDD) findet sich in [Fayyad et al., 1996]. Danach ist Data-Mining nur als Teil des gesamten Datenverarbeitungsprozesses zu sehen. Er wird durch die Vorbereitung und Auswahl der Daten sowie eine Interpretation der Ergebnisse komplettiert. In der hier vorgestellten Analyse wird ein Verfahren zur Cluster-Erkennung für die bereits vorgestellte Nutzergesamtheit basierend auf der MiD 2008-Erhebung entwickelt und angewandt. Zur Modellierung der nutzungshomogenen Gruppen von möglichen xEV-Nutzern wird die in Abbildung VI-1 dargestellte Vorgehensweise genutzt.

**Abbildung VI-1: Data-Mining-Prozesses zur Bildung nutzungshomogener Cluster möglicher xEV-Nutzer**



Quelle: nach [Fayyad et al., 1996], eigene Darstellung

In einem zentralen Punkt des Data-Mining-Prozesses werden die aufbereiteten Nutzerdatensätze einer multivariaten Datenanalyse unterzogen. Wesentliches Ziel der hier angewandten Analyse ist es, die enthaltene Vielzahl an Merkmalen und Variablen zu reduzieren, ohne die darin enthaltenen Informationen zu Mustern, Gruppen oder Abhängigkeiten zu verlieren. Grundsätzlich sind zwei Verfahren möglich. Das erste Verfahren geht von einer vorgegebenen Struktur aus und prüft, ob die Daten damit zusammenpassen (induktive Vorgehensweise). Das

zweite Verfahren beruht darauf, eine zuvor nicht identifizierte Struktur aus den Daten zu extrahieren (explorative Vorgehensweise).

In diesem Kapitel steht die Entwicklung eines strukturerkennenden, explorativen Verfahren im Vordergrund, da eine umfangreiche Untersuchung zu Nutzern, deren soziodemografischen Strukturen und den daraus gebildeten ladeleistungsbestimmenden Parametern derzeit nicht vorliegt.

### VI.1 Vorüberlegungen zur Bildung nutzungshomogener Gruppen

In der MiD 2008 werden ausgewählte Personen in den Wegeinterviews auch nach soziodemografischen und ökonomischen Merkmalen befragt. Eine Selektion der Nutzer aus der Grundgesamtheit nach bestimmten Merkmalen ermöglicht eine Zuordnung von soziodemografischen und haushaltstypischen Merkmalen zu den jeweiligen Bewegungsprofilen. Abbildung VI-1 zeigt die gewählten Merkmale der Nutzer und der gebildeten Klassen. Die Auswahl richtet sich dabei nach den erfassten Daten der Ausgangsdatenlage der MiD 2008 und nach den relevanten Stichprobengrößen, die für die jeweiligen Klassen gebildet werden können.

**Abbildung VI-2: Auswahl an untersuchten Merkmalen der Pkw-Nutzer**

Haushaltstyp	Familie mit Kindern	Familie ohne Kinder	Single	Alleinerziehend		
Geschlecht	männlich	weiblich				
Altersgruppe	18 bis 35	35 bis 65	über 65			
Lebensphase	Ausbildung	Beruf Voll.	Beruf Teil.	Rentner	Hausmann	Sonstige
Haushaltseinkommen Netto (€ pro Monat)	unter 1500	1500 bis 3500	über 3500			
Wohnsituation	Wohnung ohne Stellplatz	Wohnung mit Stellplatz				
Anzahl Pkw im Haushalt	ein Pkw	mehrere Pkw				
Wohnregion	Kernstadt	Umland	Land			

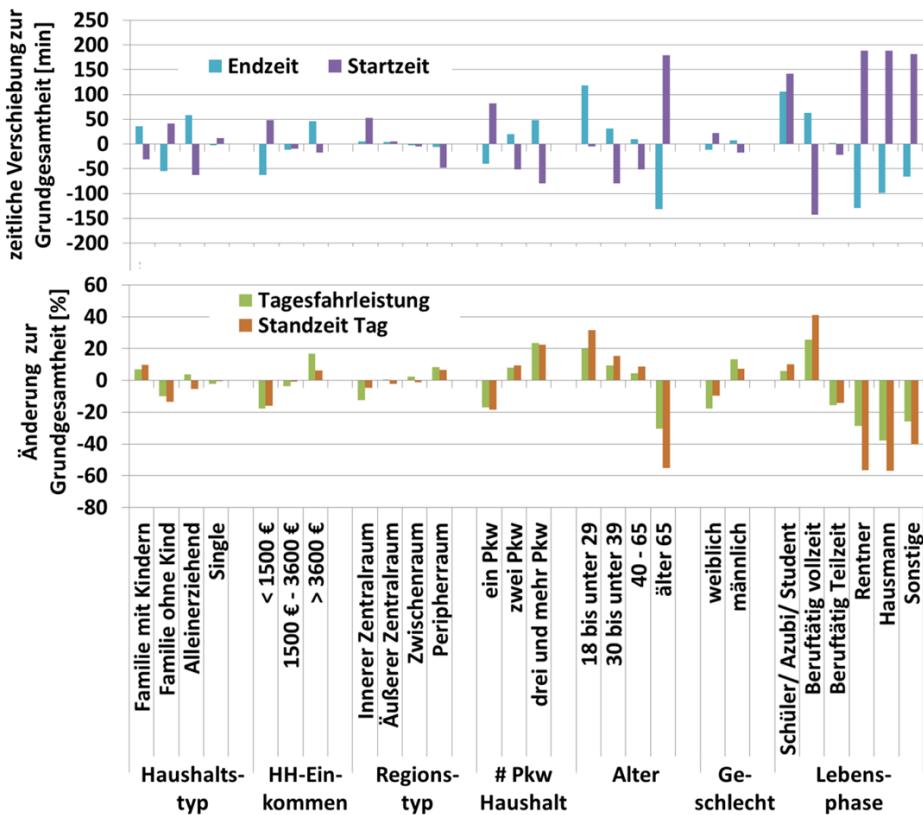
Quelle: eigene Darstellung

Um eine erste Einschätzung zu den Auswirkungen der Merkmalsausprägungen auf die Ladeleistung zu erhalten, wird die Nutzergesamtheit auf die jeweilige Merkmalsausprägung eingeschränkt und ein Vergleich von Mittelwerten zur Nutzergesamtheit durchgeführt. Die bereits in Kapitel V.3 dargestellten Analysen haben gezeigt, dass folgende Parameter wesentlich den Tagesgang der Ladeleistung bestimmen:

- die Startzeit der ersten Fahrt vom nächtlichen Stellplatz als Zeitpunkt, an dem der Ladevorgang spätestens beendet sein muss,
- die mittleren Standzeiten an anderen Orten als dem nächtlichen Stellplatz; Möglichkeit zur untertägigen Ladung der Fahrzeuge zwischen zwei Wegen an semi-öffentlichen Ladepunkten,
- die Ankunftszeit am nächtlichen Stellplatz nach der letzten Fahrt und
- die Tagesfahrleistung des jeweiligen Nutzers als bestimmende Größe der Ladeenergienachfrage.

Wichtige weitere Parameter wie zum Beispiel mögliche Verschiebezeiten der Ladevorgänge als wichtige Kenngröße für eine Steuerung der Ladung oder die Ladedauer können daraus abgeleitet werden. Abbildung VI-3 verdeutlicht, wie sich die Mittelwerte der merkmalspezifischen Gruppen im Vergleich zur Grundgesamtheit verändern.

**Abbildung VI-3: Änderung der Mittelwerte von merkmalspezifischen Gruppen im Vergleich zur Grundgesamtheit aller Pkw-Nutzer**



Quelle: eigene Darstellung

Vergleichsweise geringe Unterschiede zur Gesamtheit aller Nutzer weisen die Merkmale Haushaltstyp, Haushaltseinkommen und Regionstyp auf. Auch das Geschlecht der Nutzer wirkt sich vergleichsweise gering aus. Bei den Merkmalen Altersgruppe und insbesondere bei der Einteilung in Lebensphasen zeigen sich größere Änderungen der Mittelwerte im Vergleich zur Grundgesamtheit. Die Zuordnung der Altersgruppen und der Lebensphasen korreliert dabei stark miteinander. So ist z. B. die Altersgruppe „über 65“ zu 88,7 % der Lebensphase „Rentner“ und die Altersgruppe „18 bis 29“ zu 44,1 % der Lebensphase „Schüler / Azubi / Studierende“ in der Grundgesamtheit zugeordnet.

Die Gruppen der Lebensphase „Rentner“, „Hausmann“ (Aggregat der Hausfrauen und -männer) und „Sonstige“ (z. B. Bundesfreiwillige oder Arbeitssuchende) weisen zwischen 41 % und 57 % niedrigere mittlere Standzeiten am Tag bei einer zwischen 26 und 38 % geringeren Tagesfahrleistung im Vergleich zur Grundgesamtheit auf. Diese Gruppe zeichnet sich durch kurze Wege mit geringen Stillstandszeiten aus. Die Startzeiten der ersten Fahrt vom Stellplatz sind um ca. 1,3 h in Richtung spätere Uhrzeiten verschoben. Die Gruppe der „Vollzeit-Berufstätigen“ weist deutlich größere mittlere übertägige Standzeiten von 3,8 h und eine mittlere Tagesfahrleistung von 44,9 km auf. Das Vorhandensein mehrerer Pkw im Haushalt hat ebenfalls einen Einfluss auf die Mittelwerte der ladungsbestimmenden Parameter.

Die Auswertung der Nutzerprofile nach soziodemografischen und haushaltstypischen Merkmalen gibt deutliche Hinweise, dass Abhängigkeiten zwischen ladeleistungsbestimmenden Parametern und bestimmten Nutzergruppen bestehen.

Da derzeit keine umfassenden Strukturanalysen der MiD 2008-Daten bezüglich bestimmender Größen der Ladeleistungsnachfrage existieren, wird im Rahmen des hier vorgestellten Modellansatzes eine explorative Vorgehensweise angewendet. Diese ermöglicht die Extraktion von bisher nicht identifizierten Strukturen aus der Grundgesamtheit.

## VI.2 Modellansatz

Bei vielen empirisch erhobenen Daten ist eine wesentliche Frage, ob zwischen den betrachteten und den erfragten Merkmalen bestimmte Zusammenhänge bestehen, ob diese zu homogenen Gruppen zusammengefasst werden können und durch welche Merkmale diese bestimmt sind. Die Gruppen sollen auf der einen Seite möglichst homogen in ihrer Merkmalsausprägung sein und auf der anderen Seite zu anderen Gruppen möglichst unähnlich sein. Somit können signifikant unterschiedliche Gruppen gebildet werden. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für eine zusammenfassende Interpretation.

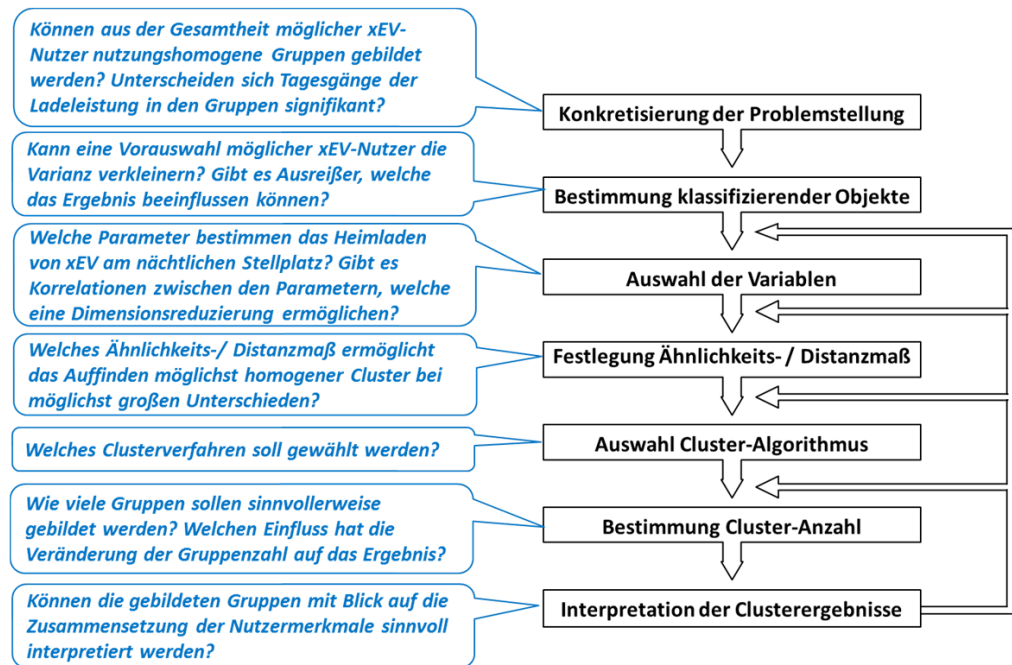
Die Identifikation von Gruppen mit ähnlichen Merkmalen ist in der Statistik ein häufig angewendetes Verfahren. Wichtige strukturentdeckende Verfahren der multivariaten Analysen sind

- die Faktorenanalyse, die Hauptkomponentenanalyse und die Korrespondenzanalyse zur Reduktion von vielen Variablen auf eine geringere Anzahl,
- die multidimensionale Skalierung zur Berechnung niedrigdimensionaler Konfigurationen aus Distanzen oder (Un-)Ähnlichkeiten zwischen Beobachtungen sowie
- die Clusteranalyse zur Reduktion vieler Beobachtungen auf wenige Gruppen.

Die zuletzt genannte Clusteranalyse bietet die Möglichkeit, zur Aufteilung in homogene Cluster alle vorliegenden Merkmale der untersuchten Objekte gleichzeitig heranzuziehen. Die Clusteranalysen zählen zu den explorativen Verfahren, da die Gruppen im Ausgangspunkt unbekannt sind und das Clusterverfahren erst eine solche Gruppierung bildet. [Backhaus et al., 2016]. Für eine vertiefende Beschreibung der Clusteranalysen sei an dieser Stelle auf [Bacher et al., 2010], [Everitt et al., 2011]; [Hair et al., 2014] verwiesen.

Für die hier aufgeworfene Fragestellung bietet sich dieses Verfahren an, um Strukturen in der Grundgesamtheit zu erkennen, welche für die Modellierung der Ladelast relevant sind. Das in Abbildung VI-4 gezeigte Ablaufschema zeigt die Vorgehensweise bei der Zerlegung in nutzungshomogene Gruppen der bereits modellierten Ladelastprofile.

**Abbildung VI-4: Ablaufschema der Clusterbildung im Anwendungsfall**



Quelle: eigene Darstellung nach [Backhaus et al., 2016]

Die Konkretisierung der Problemstellung und die zu analysierenden Nutzerdatensätze wurden bereits ausführlich in Kapitel V beschrieben. Da die Analyse der Grundgesamtheit aller möglichen xEV-Nutzer deutlich unterschiedliche Ladelastverläufe in der Woche und am Wochenende gezeigt hat (vgl. V.3), werden für die Bildung von nutzungshomogenen Gruppen die Wochentagsaggregate Dienstag bis Donnerstag sowie Samstag und Sonntag herangezogen. Die Clusterbildung wird dementsprechend für alle Nutzer durchgeführt, welche an den jeweiligen Tagen mit einem Pkw unterwegs waren. Für die Clusterung werden für das Wochentagsaggregat Dienstag bis Donnerstag 8.611 Nutzerprofile und für Samstag / Sonntag 3.913 Profile (vgl.

Tabelle V-1 ) ausgewertet. Im Folgenden wird die Vorgehensweise der Clusterbildung und deren Anwendung auf die Nutzerdatensätze detailliert beschrieben.

### VI.3 Beschreibung des entwickelten Data-Mining-Verfahrens

Wichtige Ablaufschritte des Verfahrens zur Bildung von nutzungshomogenen Gruppen bezüglich des Heimladens von xEV sind die Festlegung der zu untersuchenden Parameter sowie deren Ähnlichkeiten, die Auswahl eines geeigneten Fusionierungsalgorithmus und die Bestimmung einer sinnvollen Clusteranzahl. Letzter Punkt kann nur in engem Zusammenhang mit der Interpretation der Cluster für den Anwendungsfall durchgeführt werden.

#### VI.3.1 Parameterauswahl und Bestimmung der Ähnlichkeiten

Die Auswirkungen der Startzeit der ersten Fahrt vom nächtlichen Stellplatz, der Standzeiten zwischen untertägigen Wegen, der Ankunftszeit am nächtlichen Stellplatz nach der letzten Fahrt und der Tagesfahrleistung auf das Tagesprofil der Heimladung wurden bereits in Kapitel V beschrieben. Diese Parameter werden für die Clusteranalyse als bestimmend für die jeweiligen Ladeleistungsprofile des Heimladens herangezogen.

Als vorbereitender Schritt zur Clusteranalyse werden diese gewählten Parameter auf mögliche Korrelationen hin überprüft. Weisen Parameter hohe Korrelationen auf, so kann bei einer Clusteranalyse der Ausschluss eines der korrelierenden Parameter überlegt werden. Es kann somit eine Dimensionsreduzierung des Clusterproblems erfolgen. Die Bewertung von möglichen Korrelationen zwischen Merkmalen von Stichproben kann durch eine explorative Faktorenanalyse erfolgen. Mit Hilfe der Berechnung von Korrelationskoeffizienten können Beziehungszusammenhänge in großen Datensätzen identifiziert werden. Die Berechnung der Korrelationsmatrix R erfolgt nach Gleichung VI-1.

$$r_{x_1, x_2} = \frac{\sum_{k=1}^K (x_{k1} - \bar{x}_1)(x_{k2} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (x_{k1} - \bar{x}_1)^2 (x_{k2} - \bar{x}_2)^2}}$$

Gleichung VI-1

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \dots & r_{x_K, x_1} \\ r_{x_1, x_2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{x_1, x_K} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

mit  $r_{x_1, x_2}$  = Korrelationskoeffizient zweier Parameter  $x_1$  und  $x_2$  der Objekte k der Stichprobengröße  $K$ ;  $\bar{x}_1$  und  $\bar{x}_2$  als Mittelwerte der Stichprobengröße  $K$

Der Korrelationskoeffizient  $r$  ist ein dimensionsloses Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen und kann Werte zwischen  $-1$  und  $+1$  annehmen. Bei Werten  $+1$  oder  $-1$  besteht ein vollständig positiver bzw. negativer linearer Zusammenhang zwischen den betrachteten Merkmalen. Ist der Korrelationskoeffizient  $0$ , hängen beide Merkmale linear vollständig nicht voneinander ab.



Die Ergebnisse der Korrelationsmatrix für die gewählten Parameter für die Nutzer Dienstag bis Donnerstag zeigt Tabelle VI-1. Die Werte der Koeffizienten weisen auf keine signifikante Korrelation zwischen den gewählten Parametern hin. Die hier nicht gezeigte Korrelationsmatrix für das Wochenende weist ebenfalls nicht auf Korrelationen zwischen den gewählten Parametern hin (vgl. Tabelle XIII-4 im Anhang).

**Tabelle VI-1: Korrelationsmatrix der Parameter Dienstag bis Donnerstag**

Korrelationskoeffizient [dimensionslos]	Startzeit	Endzeit	Ø Standzeit am Tag	Tagesfahr- leistung
<b>Startzeit</b>	1,000	0,163	-0,491	-0,234
<b>Endzeit</b>	0,163	1,000	0,289	0,225
<b>Ø Standzeit am Tag</b>	-0,491	0,289	1,000	0,142
<b>Tagesfahrleistung</b>	-0,234	0,225	0,142	1,000

Quelle: eigene Berechnung

Als weiterer Schritt zur Vorbereitung der Clusteranalyse ist die Wahl des Proximitätsmaßes zu treffen. Die Proximität ist als statistisches Maß zu verstehen, mit dem die Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit zwischen zwei Stichproben berechnet wird. Im Rahmen der Analyse wird das Distanzmaß als geeignet angesehen, da der absolute Abstand zwischen den Parametern der Objekte ausschlaggebend ist und die Unähnlichkeit der Stichproben umso größer ist, je weiter die Parameter voneinander entfernt liegen. Für das Distanzmaß von metrischen Parametern wird die quadrierte euklidische Distanz verwendet. Laut [Backhaus et al., 2016] zählt diese zu den weit verbreiteten Distanzmaßen bei empirischen Daten. Die Distanz zwischen zwei Stichproben wird dabei nach Gleichung VI-2 berechnet.

$$d_{k,l}^2 = \sum_{j=1}^J (x_{kj} - x_{lj})^2$$

**Gleichung VI-2**

mit  $d_{k,l}$  = Distanzmaß zwischen Objekt k und l,  $x_{kj}, x_{lj}$  = Werte der Variablen j für Objekt k, l

Durch das Quadrieren der euklidischen Distanz werden große Differenzwerte bei der Rechnung stärker berücksichtigt. Im Anwendungsfall mit vier Parametern (J=4), welche zur Gruppenbildung gleichzeitig herangezogen werden, ergibt sich ein mehrdimensionales Distanzmaß.

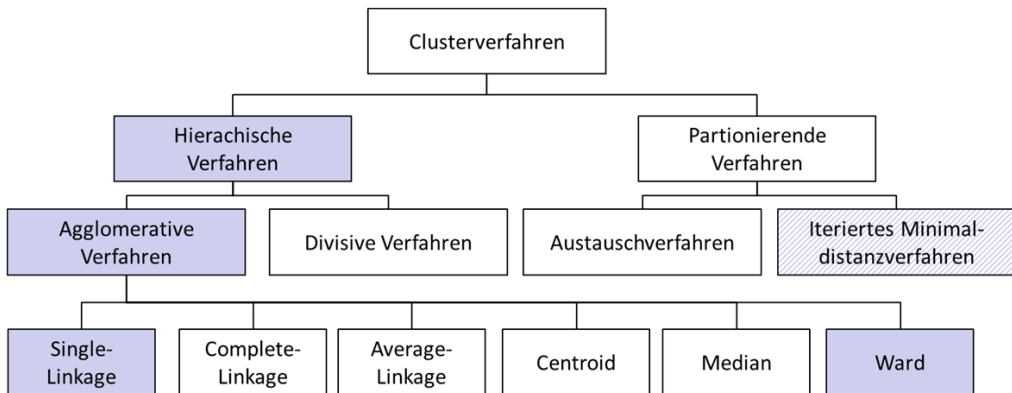
Die Ausgangsdatenmatrix der Nutzer mit den entsprechenden Parametern wird mit dem Distanzmaß in eine Distanzmatrix überführt. Die quadratische Matrix enthält für jeden Nutzer die quadratische euklidische Distanz zu allen anderen Nutzern. Diese Matrix bildet die Grundlage für die weitere Gruppenbildung.

### **VI.3.2 Auswahl des Fusionierungsalgorithmus**

Ziel der Clusteranalyse ist die Zusammenfassung von Objekten, so dass sich homogene Gruppen mit möglichst unterschiedlichen Ausprägungen der Parameter zwischen den Gruppen bilden. Die Verfahren gliedern sich in partitionierende und hierarchische Verfahren (siehe Abbildung VI-5). Bei den partitionierenden Verfahren wird ausgehend von einer vorgegebenen Gruppie-

rung der Datensätze durch Umordnen der Objekte zu Gruppen ein Optimum bezüglich einer Zielfunktion erreicht. Bei den hierarchischen Verfahren wird zwischen einer agglomerativen (Zusammenfassung von Gruppen) und einer divisiven Vorgehensweise (Aufteilung einer Gesamtheit in Gruppen) unterschieden. Bezüglich einer detaillierten Beschreibung der Clusterverfahren und deren Unterschiede sei hier auf [Everitt et al., 2011], [Bacher et al., 2010], [Backhaus et al., 2016] verwiesen.

**Abbildung VI-5: Überblick möglicher Clusterverfahren**



Quelle: nach [Backhaus et al., 2016], eigene Darstellung

Für die Clusterung in nutzungshomogene Gruppen kommen hier die agglomerativen Verfahren „Ward“ und „Single Linkage“ zur Anwendung. Das Ward-Verfahren ist ein sehr weit verbreiteter Clusteransatz in sozial- und wirtschaftswissenschaftlichen Disziplinen [Everitt et al., 2011]. Die Auswahl des Ward-Verfahrens ist dadurch begründet, dass dieses Verfahren einen guten Kompromiss bei der Anzahl der enthaltenen Objekte in einer Gruppe bildet und nicht zur Kettenbildung neigt. Laut [Backhaus et al., 2016] eignet sich dieses Verfahren zur Clusterung von empirischen Daten sehr gut, wenn

- die Variablen unkorreliert sind,
- ein Distanzmaß sinnvoll ist,
- die Parameter auf metrischem Skalenniveau sind,
- die Zahl der Objekte in den Gruppen ungefähr gleich groß ist und
- sich keine Ausreißer in der Stichprobe befinden.

Anhand der Korrelationsmatrix (vgl. Tabelle VI-1) konnte bereits die weitgehende Unabhängigkeit der Parameter gezeigt werden (Bedingung 1). Die Bedingungen zwei bis vier sind im vorliegenden Fall erfüllt. Zur Sicherstellung der 5. Bedingung wird der Clusterung nach dem Ward-Verfahren eine Single Linkage-Clusterung vorgeschaltet, um etwaige Ausreißer in der Gesamtheit zu identifizieren.

Um den Einfluss des gewählten Rechenverfahrens auf die Clusterbildung zu untersuchen, wird in Kapitel VI.6 ein Vergleich der Clusteralgorithmen Ward- und iteratives Minimaldistanz-Verfahren

(k-Means, vgl. Abbildung VI-5, blau schraffiert) gezeigt, um die Auswirkungen des gewählten Verfahrens auf die Ergebnisse abschätzen zu können.

Die Rechenvorschriften des Ward-Verfahrens werden im Folgenden beschrieben. Die Clusterbildung geschieht nach dem Kriterium, dass diejenigen Elemente vereinigt werden, welche die Varianz in einer Gruppe möglichst wenig erhöhen. Durch diese Vorgehensweise werden möglichst homogene Cluster gebildet. Als Maß für die Varianz in einer Gruppe wird in dieser Forschungsarbeit die Fehlerquadratsumme verwendet. Die Varianz  $V$  errechnet sich für eine Gruppe  $g$  nach Gleichung VI-3.

$$V_g = \sum_{k=1}^{K_g} \sum_{j=1}^J (x_{kjg} - \bar{x}_{jg})^2$$

**Gleichung VI-3**

mit  $V_g$  = Fehlerquadratsumme des Clusters  $g$ ;  $x_{kjg}$  = Beobachtungswert des Parameters  $j$  des Datensatzes  $k$  im Cluster  $g$ ;  $K$  = Gesamtzahl der Objekte im Cluster  $g$ ;  $\bar{x}_{jg}$  = Mittelwert der Beobachtungswerte der Parameter  $J$  im Cluster  $g$ ;  $J$  = Gesamtzahl der Parameter;

Die Clusterung im agglomerativen Ward-Verfahren startet mit der feinsten Partition, bei der jedes Objekt  $k$  ein Cluster darstellt. Danach werden für alle Objekte die paarweisen Distanzen berechnet. Danach werden die beiden Cluster mit der geringsten Distanz zueinander gesucht und zu einem neuen Cluster zusammengefasst. Die Clusterzahl nimmt dabei um 1 ab. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis die Gesamtzahl aller Objekte in einem Cluster vereint ist (Grundgesamtheit). Dementsprechend ist die Zahl der möglichen Cluster  $K-1$ . Der Abstand zwischen dem neu gebildeten Cluster und den anderen Gruppen wird nach Gleichung VI-4 berechnet.

$$D(R; P+Q) = \frac{1}{NR + NP + NQ} \{ (NR + NP) \cdot D(R, P) + (NR + NQ) \cdot D(R, Q) - NR \cdot D(P, Q) \}$$

**Gleichung VI-4**

mit  $R$  = neu gebildete Gruppe;  $P, Q$  = bestehende Gruppen;  $NR, NP, NQ$  = Zahl der Objekte in Gruppe  $R, P, Q$ ;  $D(R, Q)$  = Distanzberechnung der Gruppen  $R$  und  $Q$  (hier angewandt: quadrierte euklidische Distanz nach Gleichung VI-2)

Die Clustermethode folgt der Vorgehensweise der minimalen Erhöhung der Varianz durch Fusionierung von zwei Clustern zu einem neuen Cluster. Dies entspricht einem minimalen Zuwachs der Fehlerquadratsumme des jeweiligen Fusionierungsschritts (Gleichung VI-5). Die Anwendung des Algorithmus ist beschränkt auf metrische Daten.

$$D(R; P+Q) = \min \{ V_P; V_Q; V_R \}$$

**Gleichung VI-5**

Die Rechenvorschrift gibt keine Hinweise auf eine optimale Anzahl an Clustern. Diese muss in einem nachgelagerten Analyse- und Interpretationsvorgang festgelegt werden.

Die Vorschaltung des Single Linkage-Verfahrens dient der Identifikation und dem Ausschluss von Ausreißern in den Datensätzen. Sie ist erforderlich, weil diese sich negativ auf die gebildeten Cluster auswirken. Wenige Ausreißer können die Clusterbildung durch die Bildung der Fehlerquadratsummen deutlich beeinflussen. Die Single Linkage-Clusterung vereinigt im ersten Schritt die Objekte, die gemäß der Distanzmatrix die kleinste Distanz aufweisen und damit am ähnlichsten sind. Im nächsten Cluster-Schritt wird der Abstand dieser Gruppe zu allen übrigen Objekten bestimmt. Als Distanz zwischen der neuen Gruppe und einem Objekt (Gruppe) R wird nun der kleinste Wert der Einzeldistanzen bestimmt (vereinfachte Beziehung in Gleichung VI-5).

$$D(R; P+Q) = \min \{D(R, P); D(R, Q)\} \quad \text{Gleichung VI-6}$$

mit R = neue gebildete Gruppe; P, Q = bestehende Gruppen; D (R,Q) = Distanzberechnung der Gruppen R und Q (hier angewandt euklidische Distanz)

Das Single Linkage-Verfahren weist somit einer neu gebildeten Gruppe die kleinste Distanz zu, die sich aus den alten Distanzen der Gruppe zu einem neuen Objekt ergibt.

### VI.3.3 Durchführung der Clusteranalyse und Bestimmung der Clusterzahl

Die statistischen Untersuchungen wurden mit Hilfe der Software „IBM SPSS Statistics“ durchgeführt. Die Vorgehensweise ist jedoch auch mit anderen gängigen Statistiksoftwareprodukten wie zum Beispiel „R“, „SAS“ oder STATA möglich. Eine detaillierte Beschreibung der Durchführung von Clusteranalysen mit SPSS ist in [Schendera, 2010], [Backhaus et al., 2016] zu finden.

Die Nutzerdatensätze für die Wochentagsaggregate Dienstag bis Donnerstag sowie Samstag und Sonntag werden jeweils mit dem beschriebenen Single Linkage-Verfahren nach Ausreißern bezüglich der Parameter Startzeit, Endzeit, Standzeit und Tagesfahrleistung untersucht. Die Ausreißer-Analyse bezieht sich immer auf die Kombination aller Parameter und wird dabei nicht nur durch die Ausprägung einzelner Parameter sondern auch durch deren Kombinatorik bestimmt. Die Cluster-Analyse nach dem Single Linkage-Verfahren führt zum Ausschluss von 11 Nutzer-Datensätzen für die Wochentage Dienstag bis Donnerstag bzw. 42 für Samstag und Sonntag. Es verbleiben 8.600 gültige Datensätzen für Dienstag bis Donnerstag bzw. 3.837 für Samstag / Sonntag für die Ward-Clusterung.

Da die Parameter in unterschiedlichen Skalen erfasst sind (Uhrzeit, Stunden und Kilometer), würde dieser Umstand zu einer impliziten Gewichtung der Parameter führen. Um eine vergleichbare Skala zwischen den Parametern herzustellen, werden diesen durch Gleichung VI-7 normiert. Die normierten Werte  $z_{kj}$  nehmen dabei Werte zwischen 0 und 1 an.

$$z_{kj} = \frac{x_{kj} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad \text{Gleichung VI-7}$$

mit Objekt k des Parameters j,  $x_{j\min}$  als Minimalwert des Parameters j über alle Objekte k,  $x_{j\max}$  als Maximalwert des Parameters j über alle Objekte k

Im Anschluss an die Ausreißer-Analyse und die Normierung der Parameter werden die Nutzerdatensätze der Clusterung nach der Ward-Methode analysiert. Tabelle VI-2 zeigt das Ergebnis der Clusterung in zwei, drei und vier nutzungshomogene Gruppen im Vergleich zur Grundgesamtheit für die jeweiligen Wochentagsaggregate. Bereits bei einer Aufteilung der Grundgesamtheit in zwei Cluster zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Mittelwerte aller Parameter. Die angewandte Nomenklatur der Clusterbezeichnung beinhaltet die Gesamtzahl der gebildeten Cluster und der jeweiligen Clustergruppe (z. B. C3-1: Clusteranzahl drei, Cluster 1).

**Tabelle VI-2: Ergebnisse der Clusterung; Mittelwerte für die Wochentagsaggregate Di bis Do und Sa / So**

Grundgesamtheit					Aufteilung in zwei Cluster				
	Di bis Do		Sa und So			Di bis Do		Sa und So	
	Anzahl	Mittelwert	Anzahl	Mittelwert		Anzahl	Mittelwert	Anzahl	Mittelwert
Startzeit		09:29		11:35	Cluster C2-1				
Endzeit		17:20		16:11	Startzeit		07:27		09:47
Standzeit Tag [h]		3,88		2,08	Endzeit		18:47		11:41
Tagesfahrleistung [km]	8.600	35,87	3.871	31,98	Standzeit Tag [h]		5,61		0,94
					Tagesfahrleistung [km]	5.127	46,81	1.252	17,04
Aufteilung in vier Cluster					Cluster C2-2				
	Di bis Do		Sa und So			Di bis Do		Sa und So	
	Anzahl	Mittelwert	Anzahl	Mittelwert		Anzahl	Mittelwert	Anzahl	Mittelwert
Cluster C4-1					Startzeit		12:31		12:26
Startzeit		09:20		09:47	Endzeit		15:11		18:19
Endzeit		12:02		11:41	Standzeit Tag [h]		1,32		2,63
Standzeit Tag [h]		1,28		0,94	Tagesfahrleistung [km]	3.473	19,78	2.619	39,12
Tagesfahrleistung [km]	1.910	18,88	1.252	17,04	Aufteilung in drei Cluster				
Cluster C4-2						Di bis Do		Sa und So	
	Di bis Do		Sa und So			Anzahl	Mittelwert	Anzahl	Mittelwert
	Startzeit		07:51		15:43	Cluster C3-1			
Endzeit		19:31		20:20	Startzeit		07:27		09:47
Standzeit Tag [h]		3,33		2,20	Endzeit		18:47		11:41
Tagesfahrleistung [km]	3.200	50,48	932	30,76	Standzeit Tag [h]		5,61		0,94
Cluster C4-3					Tagesfahrleistung [km]	5.127	46,81	1.252	17,04
Startzeit		16:24		11:35	Cluster C3-2				
Endzeit		19:02		17:03	Startzeit		09:20		13:12
Standzeit Tag [h]		1,37		1,90	Endzeit		12:02		18:20
Tagesfahrleistung [km]	1.563	20,89	1.462	43,99	Standzeit Tag [h]		1,28		2,02
Cluster C4-4					Tagesfahrleistung [km]	1.910	18,88	2.394	38,84
Startzeit		06:45		04:24	Cluster C3-3				
Endzeit		17:33		18:17	Startzeit		16:24		04:24
Standzeit Tag [h]		9,40		9,12	Endzeit		19:02		18:17
Tagesfahrleistung [km]	1.927	40,73	225	42,06	Standzeit Tag [h]		1,37		9,12
					Tagesfahrleistung [km]	1.563	20,89	225	42,06

Quelle: eigene Berechnung

Da das Ward-Verfahren nur eine Aufteilung der Gesamtheit nach dem Kriterium der minimierten Erhöhung der Fehlerquadratsumme durchführt und keine Information über eine sinnvolle Anzahl an Clustern liefert, ist eine nachgelagerte Analyse der gebildeten Cluster notwendig.

Die Bestimmung einer geeigneten Clusterzahl und deren Interpretation ist somit ein fester Bestandteil der Clusteranalyse. Zur Bestimmung der optimalen Clusterzahl stehen neben der logischen Prüfung der Gruppen anhand von beschreibenden Kriterien oder Erfahrungswerten auch Berechnungsverfahren zur Verfügung. Im Rahmen der hier durchgeführten Analyse werden der Test nach Mojena, das Elbow-Kriterium der Fehlerquadratsumme und der F-Test der Parameter in den Clustern angewendet. Abschließend erfolgt eine logische Prüfung der sinnvollen Clusteranzahl mit Hilfe von Boxplots für die ladungsbestimmenden Parameter. Die Cluster werden dabei auch auf mögliche Zusammenhänge mit soziodemografischen oder haushaltstypischen Merkmalen geprüft.

### VI.3.3.1 Test nach Mojena

Der Test nach Mojena zählt zu den häufig eingesetzten Verfahren zur Ermittlung einer optimalen Clusteranzahl für den Anwendungsfall und setzt auf die Berechnung der Fehlerquadratsummen der einzelnen Fusionsstufen. Hierzu werden die standardisierten Fusionskoeffizienten je Fusionsstufe nach Gleichung VI-8 berechnet. Er gilt als Gütemaß für eine ausreichend hohe Unähnlichkeit zwischen den Clustern.

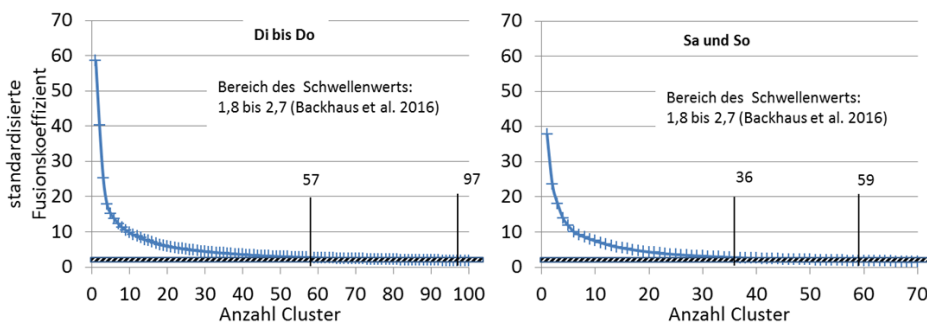
$$\tilde{\alpha}_i = \frac{\alpha_i - \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i}{\sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-1} \left( \alpha_i - \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i \right)^2}}$$

Gleichung VI-8

mit  $\alpha_i$  = Fusionskoeffizient (Ward-Verfahren: Erhöhung der Fehlerquadratsumme für jeden Fusionsstufen i), n = Anzahl Fusionsstufen

Die folgende Abbildung VI-6 zeigt den Verlauf des standardisierten Fusionskoeffizienten der durchgeführten Clusteranalyse bezüglich nutzungshomogener Gruppen an xEV-Nutzern.

**Abbildung VI-6: Ergebnisse des Mojena-Tests zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl**



Quelle: eigene Darstellung

Die Auswertung erfolgt jeweils für die Wochentagsaggregate Dienstag bis Donnerstag und Samstag bis Sonntag. [Backhaus et al., 2016] gibt einen Bereich des standardisierten Fusionskoeffizienten an, der als optimal angesehen werden kann.

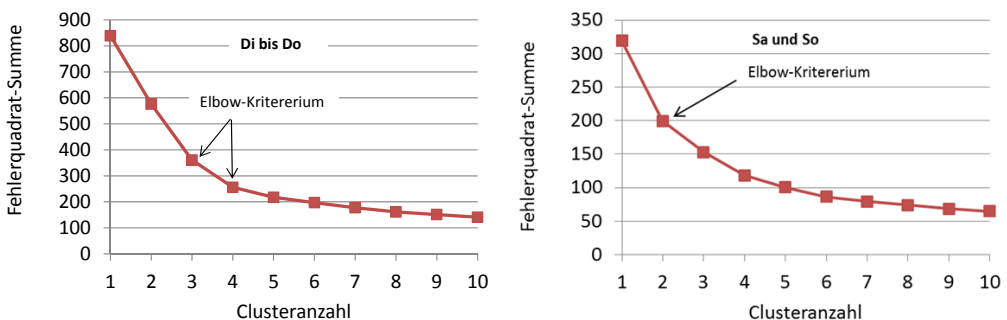
effizienten (dimensionslos) von 1,8 bis 2,7 an. Dieser Bereich wird als Hinweis für eine gute Anzahl an Clustern gesehen, welche genügende Unähnlichkeiten aufweisen.

Für beide untersuchten Perioden weist der Mojena-Test Clusterzahlen zwischen 36 und 97 aus. Diese Anzahl an Kriterien würde zu einer hohen Zahl an Gruppen führen, welche die Interpretation der Cluster deutlich erschwert. Zudem würde die Anzahl der Nutzer in den gebildeten Gruppen sehr klein und damit die Repräsentativität der Datensätze fraglich.

### VI.3.3.2 Elbow-Kriterium der Fehlerquadratsummen

Eine weiteres wichtiges Entscheidungskriterium sind die grafische Darstellung des Heterogenitätsmaßes (beim Ward-Verfahren entspricht dies der Fehlerquadratsumme für die Cluster nach Gleichung VI-3) aufgetragen über die Fusionierungsschritte und die Identifikation eines Knicks (Elbow). Durch die durchgeführte Normierung der Parameterwerte bleibt die Fehlerquadratsumme in kleinen Skalen. Der Knick stellt damit eine deutlich sichtbare Änderung des Heterogenitätsmaßes bei einer weiterer Steigerung der Clusterzahl dar, d. h. die Heterogenität der Cluster nimmt im Vergleich vor dem Knick weniger ab.

### Abbildung VI-7: Elbow-Kriterium zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung VI-7 zeigt für beide Clusteranalysen erkennbare Knicke in beiden Diagrammen für drei und vier Cluster für Tage unter der Woche. Für das Wochenende ergibt sich ein Knick bei zwei Clustern. Weitere Elbow-Kriterien sind nicht zu erkennen. Im Vergleich zum Test nach Mojena wären nach diesem Kriterium nur drei oder vier Cluster unter der Woche bzw. zwei Cluster am Wochenende notwendig, um eine aussagekräftige Einteilung der Nutzer vorzunehmen zu können.

### VI.3.3.3 F-Test der Cluster

Als weiteres Kriterium zur Findung einer geeigneten Anzahl an Clustern wird die Homogenität der Cluster mit Hilfe des F-Wertes der jeweiligen Cluster überprüft. Es finden die Gleichung VI-3 und Gleichung VI-9 für die jeweilige Anzahl an gebildeten Clustern Anwendung.

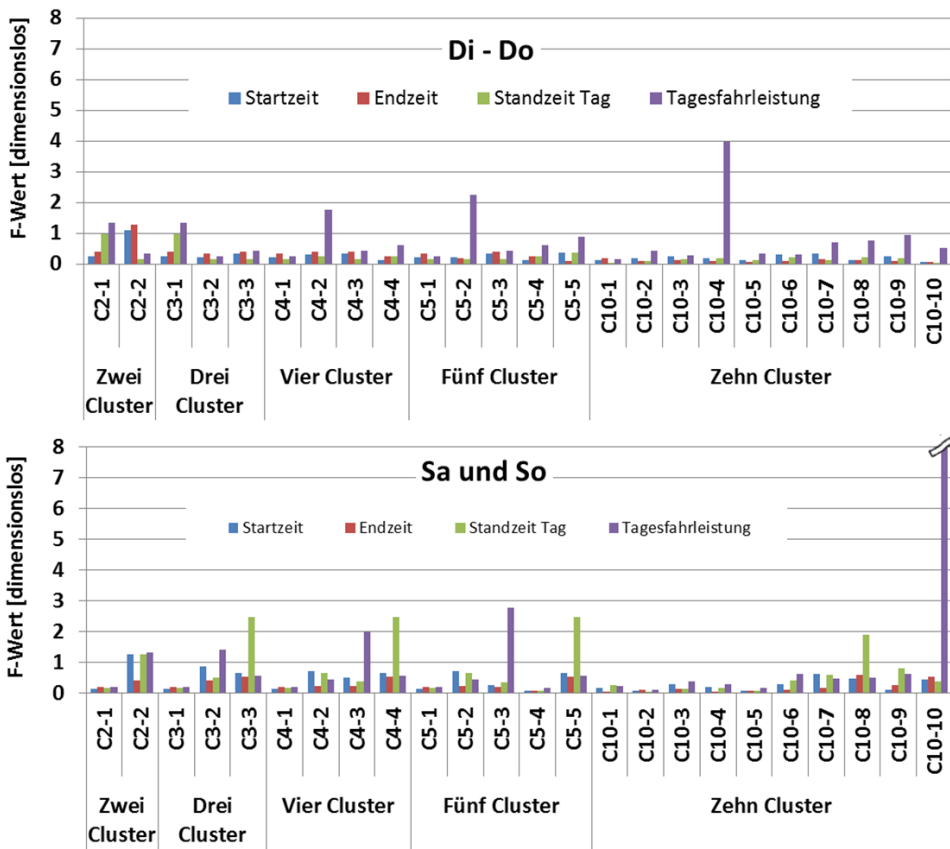
$$F = \frac{V(J,G)}{V(J)}$$

Gleichung VI-9

mit  $V(J,G)$  = Varianz (vgl. Gleichung VI-3) der Variablen J im Cluster G;  $V(J)$  = Varianz der Variablen J in der Grundgesamtheit

Je kleiner der berechnete F-Wert (dimensionslos) ist, desto geringer ist die Streuung im Cluster im Vergleich zur Streuung in der Grundgesamtheit. Die gebildeten Cluster sind dann als homogen anzusehen, wenn der F-Wert < 1 ist. D. h. die Varianz in der Gruppe ist kleiner als die Varianz der Grundgesamtheit. Abbildung VI-8 vergleicht die Ergebnisse des F-Wertes der ladungsbestimmenden Parameter für eine Anzahl von zwei, drei, vier, fünf und zehn Cluster.

Abbildung VI-8: Ergebnisse des F-Test für gewählte Clusterzahlen



Quelle: eigene Berechnung

Für das Wochentagsaggregat Dienstag bis Donnerstag kann beim Übergang von drei auf vier Cluster eine Verbesserung des F-Wertes für fast alle Parameter festgestellt werden. Jedoch erhöht sich die Varianz der Tagesfahrleistung im neu gebildeten Cluster C4-2 unter der Woche. Da die Clustering alle Parameter für die Gruppenbildung heranzieht, können sich einzelne



Varianzen von Parametern in den Fusionierungsschritten auch verschlechtern. Beim Übergang zu einer Clusterung auf fünf oder zehn Gruppen lassen sich keine signifikanten Verbesserungen bei der Homogenität innerhalb der Cluster mehr feststellen. Die Analyse der Homogenität lässt ebenfalls den Schluss zu, dass unter der Woche drei oder vier Cluster sinnvoll sein können. Eine abschließende Klärung der gewählten Clusterzahl muss durch eine weitere Interpretation der Ergebnisse erfolgen.

Für das Wochenende ist bereits bei zwei Clustern eine homogene Verteilung bei geringen F-Werten in den Clustern zu erkennen. Eine Steigerung der Clusterzahl bringt Verbesserungen bei einzelnen Parametern, aber auch deutliche Verschlechterungen im Vergleich zur Varianz zur Grundgesamtheit bei den beiden Parametern Standzeit am Tag und Tagesfahrleistung. Auch hier ist anhand der Interpretation der Ergebnisse zu prüfen, ob eine Aufteilung in zwei Clustern sinnvoll ist.

#### *VI.3.3.4 Zusammenfassung Bestimmung der Clusteranzahl*

Die in diesem Kapitel gezeigten Ergebnisse der Clusteranalyse von potenziellen xEV-Nutzern und der Überprüfung von sinnvollen Clusterzahlen für die Wochentagsaggregate Dienstag bis Donnerstag sowie Samstag / Sonntag haben gezeigt, dass mit dem entwickelten Verfahren eine Aufteilung in homogene Gruppen möglich ist. Während das Mojena-Kriterium eine hohe Zahl von größer 36 Clustern ergibt, lassen das Elbow-Kriterium und die Prüfung des F-Wertes eine sinnvolle Anzahl von drei oder vier Clustern bzw. zwei Clustern für die jeweiligen Wochentagsaggregate erkennen.

Im Vergleich zu den möglichen soziodemografischen, haushaltstypisierenden und siedlungsstrukturellen Merkmalen der Nutzer und der Vielzahl an möglichen Kombinationen ermöglicht die Clusteranalyse die Bildung von wenigen, homogenen Gruppen, welche sich signifikant voneinander unterscheiden.

#### **VI.3.4 Interpretation der Cluster**

Fester Bestandteil der Clusteranalyse ist die logische Prüfung der Clusteranzahl und deren Interpretation. Erste Aufschlüsse zu den gebildeten Gruppen für eine Clusterzahl von bis zu vier verdeutlicht die bereits gezeigte Tabelle VI-2.

Unter der Woche ergibt sich für die Aufteilung in drei Cluster folgende Aufteilung der Parameter: Das Cluster C3-1 weist eine morgendliche Startzeit vom Stellplatz gegen 7:30 Uhr und eine hohe Standzeit von über 5,6 h über den Tag auf. Die mittlere Rückkehrzeit zum nächtlichen Stellplatz hat ihren Mittelwert bei ca. 18:50 Uhr. Die Tagesfahrleistung ist mit knapp 47 km deutlich höher als die der Grundgesamtheit (knapp 36 km). Dies entspricht dem klassischen Profil eines Vollzeit-Berufstätigen. Die Gruppe C3-2 weist in der Woche eine um knapp zwei Stunden spätere Startzeit und eine deutliche frühere Rückkehrzeit am Mittag zum nächtlichen Stellplatz aus. Die mittlere Tagesfahrleistung fällt für dieses Cluster um fast 60 % niedriger aus. Diese Gruppe entspricht dem Bewegungsprofil einer Person mit morgendlichen Besorgungsfahrten. Die Gruppe C3-3 hat deutlich spätere mittlere Startzeiten am Tag um 16:24 Uhr, aber ähnliche Rückkehrzeiten wie das Cluster C3-1. Die mittlere Fahrleistung aller dem Cluster

zugeordneten Nutzer ist um 55 % geringer als der Wert der Gruppe C3-1. Bei der Aufteilung in vier Cluster wird das Cluster C3-1 weiter aufgeteilt in eine Gruppe mit einer späteren Startzeit um 7:51 und einer früheren Startzeit um 6:45 Uhr. Beide Cluster C4-2 und C4-4 weisen um ca. zwei Stunden verschobene Ankunftszeiten auf und unterscheiden sich um ca. 20 % bei den Tagesfahrleistungen. Auch sind die mittleren Standzeiten am Tag deutlich unterschiedlich.

Der Vergleich der Mittelwerte am Wochenende weist für eine Einteilung in zwei Cluster eine Gruppe mit morgendlichen Fahrten und Rückkehrzeiten bis Mittag auf. Das zweite Cluster C2-2 weist Startzeiten um 12:30 Uhr auf mit Rückkehrzeiten bis ca. 18:20 Uhr. Diese Gruppe weist um das 2,3 fache höhere Tagesfahrleistungen von über 39 km auf. Eine weitere Aufteilung der Grundgesamtheit in drei und vier Cluster liefert ein weiteres Cluster, welches jedoch eine sehr geringe Zahl an Bewegungsprofilen (225) aufweist. Aufgrund der geringen Nutzerzahlen kann keine belastbare Aussage getroffen werden. Die Einteilung am Wochenende in zwei Cluster bestätigt sich auch bei der logischen Prüfung.

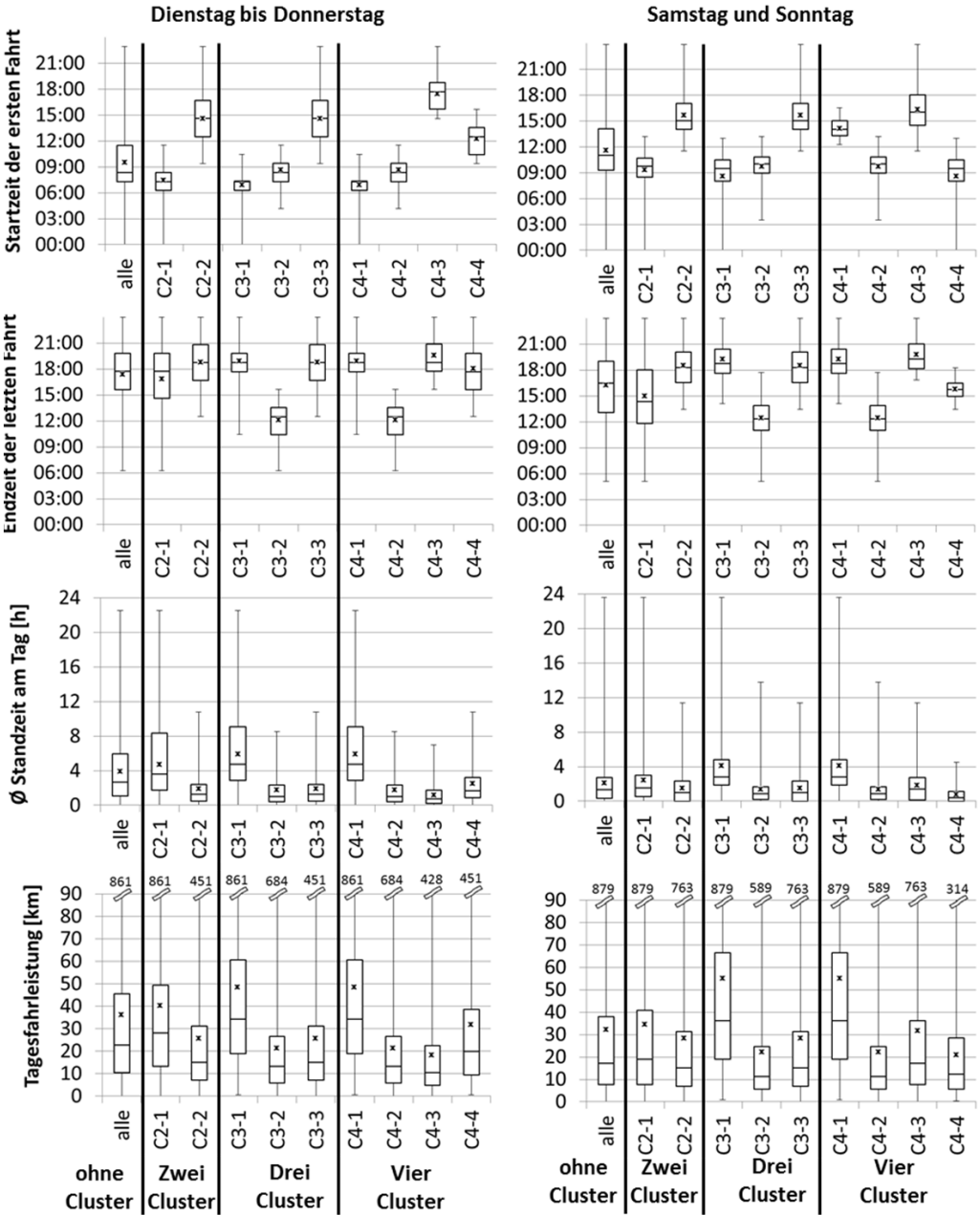
Der alleinige Vergleich der Mittelwerte kann jedoch nur zur Orientierung bei den gebildeten Clustern dienen, da die Varianz innerhalb der Gruppen und die Verteilungsfunktion wichtige Informationen enthalten. Eine weit verbreitete grafische Darstellung von ordinalskalierten Verteilungen von Parametern ist der Box-Whisker-Plot. Mit dieser Darstellungsform ist es möglich, Streuungs- und Lagemaße kompakt und übersichtlich darzustellen sowie verschiedene Verteilungsverläufe von Parametern grafisch miteinander zu vergleichen. Abbildung VI-9 zeigt die Fünf-Punkte-Zusammenfassung des Medians, des unteren und oberen Quartils und der beiden Extremwerte. Zusätzlich ist als Sternsymbol der arithmetische Mittelwert (übereinstimmend mit Tabelle VI-2) gekennzeichnet.

Die Boxplot-Darstellungen sind für die Parameter Startzeit, Endzeit, Standzeit am Tag und Tagesfahrleistung jeweils für Dienstag bis Donnerstag (linke Seite der Abbildung VI-9) und für das Wochenende (rechte Seite der Abbildung VI-9) getrennt ausgewiesen. Um die Auswirkungen der Fusionierungsschritte zu zeigen, wird die Einteilung in bis zu vier Clustern abgebildet.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass man in den Boxplots für die Parameter die Systematik der Zusammenfassung zu neuen Gruppen nach dem Ward-Verfahren erkennen kann. Ausgehend von der Grundgesamtheit werden zuerst zwei Gruppen so gebildet, dass sich die Varianz in einer Gruppe möglichst wenig erhöht. Zu beachten ist dabei, dass alle Parameter dabei berücksichtigt werden. Mit dem weiteren Fusionierungsschritt wird eine Gruppe in zwei weitere Cluster aufgeteilt.

Der Vergleich der Boxplots von zwei, drei und vier gebildeten Clustern zeigt insbesondere bei den Startzeiten der ersten Fahrt und der Rückkehrzeit nach der letzten Fahrt zum nächtlichen Stellplatz eine sehr ähnliche Systematik in den Clustern für die Wochentagsaggregate. Hingegen weisen die Parameter Standzeit und Tagesfahrleistung deutliche Clustereinteilungen auf. Unter der Woche kann beim Übergang von drei auf vier Cluster nur noch eine geringe Verschiebung der Verteilung bei allen Parametern festgestellt werden. Der Informationsgewinn durch die Einführung eines neuen Clusters ist somit nur gering. Lediglich bei den Startzeiten ergeben sich durch die weitere Aufteilung noch zusätzliche Erkenntnisse.

**Abbildung VI-9: Boxplot der Parameter Startzeit, Endzeit, Standzeit am Tag und Tagesfahrleistung für verschiedene Clusterzahlen und Wochentagsaggregate**



Quelle: eigene Berechnung

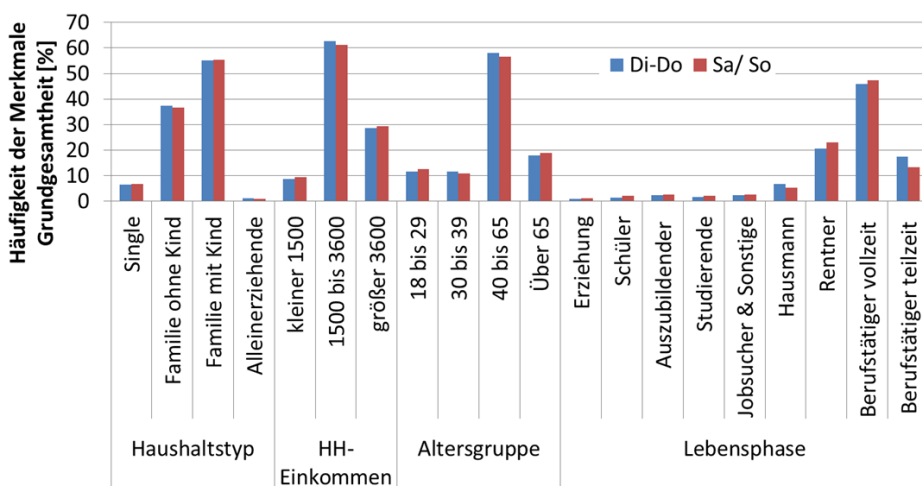
Am Wochenende bringt eine weitere Aufteilung von zwei in drei Cluster noch Unterschiede bei den Verteilungen der Tagesfahrleistungen. Da die Zahl der Bewegungsprofile im Cluster C3-3 am Wochenende jedoch nur 225 beträgt, ist die Repräsentanz dieses Clusters nicht gegeben. Der weitere Schritt von drei zu vier Cluster zeigt keine signifikante Änderungen der Parameterkombinationen in den Clustern mehr. Die logische Prüfung und die bereits gezeigten Analysen lässt eine Begrenzung auf drei Cluster unter der Woche und zwei Cluster am Wochenende zu.

Die mit der beschriebenen Vorgehensweise identifizierten homogenen Cluster werden in einem letzten Schritt auf eine mögliche Übereinstimmung von soziodemografischen Merkmalen überprüft. Die Cluster unterscheiden sich signifikant bezüglich der vier ladungsbestimmenden Parameter. Bei einer deutlichen Häufung von Merkmalen in den nutzungshomogenen Clustern ist es für Szenario-Betrachtungen möglich, Auswirkungen von soziodemografischen Effekten oder der Käuferschichtbildung von xEV-Nutzern zu berücksichtigen.

Zur Prüfung eines Zusammenhangs zwischen den berechneten Clustern für die jeweiligen Wochentagsaggregate und den Merkmalen der Nutzer wird ein Vergleich der Häufigkeiten der Merkmale im Vergleich zur Grundgesamtheit durchgeführt. Liegt hierbei eine signifikante Abweichung der Verteilung in den Clustern im Vergleich zur Grundgesamtheit vor, so liefert dies einen wichtigen Hinweis für vorherrschende soziodemografische Merkmale in den jeweiligen Clustern.

Abbildung VI-10 zeigt die Verteilung der Merkmale je Wochentagsaggregat. Es werden die Merkmalsgruppen Haushaltstyp und -einkommen, Altersgruppen, Arbeitszeit und Lebensphase mit den entsprechenden Klassen des gesamten Ausgangsdatensatzes der MiD 2008 und der selektierten Grundgesamtheit aller Nutzer der vorliegenden Analyse verwendet.

**Abbildung VI-10: Verteilung der soziografischen, haushaltstypisierenden Merkmale der Nutzer in der Grundgesamtheit der Wochentagsaggregate**

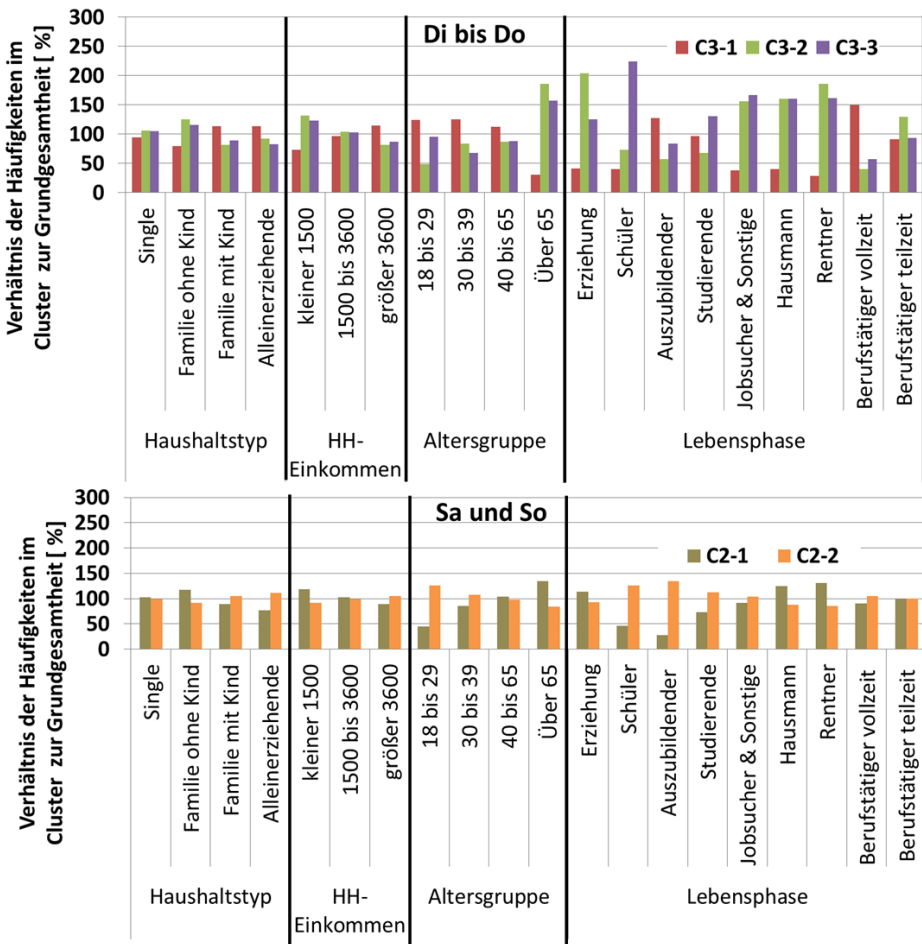


Quelle: eigene Berechnung

Die Verteilung der Merkmale in der analysierten Grundgesamtheit der Bewegungsprofile unterscheidet sich von der Auswertung in [infas & DLR, 2010a], da in der vorliegenden Analyse eine Beschränkung der Daten auf potenzielle xEV-Nutzer erfolgt ist (vgl. Kapitel V.2.1). Die Vergleich der Verteilungen der Merkmale für die beiden Wochentagsaggregate zeigt nur geringe Unterschiede. Die Grundgesamtheit potentieller xEV-Nutzer unter der Woche und der am Wochenende weisen also eine annähernd gleiche Verteilung der Nutzermerkmale auf.

Die gezeigten Häufigkeiten der Merkmalsausprägungen aller Nutzer werden nun mit den jeweiligen Verteilungen in den nutzungshomogenen Clustern C3-1 bis C3-3 unter der Woche und C2-1 und C2-2 am Wochenende verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung VI-11 grafisch dargestellt.

**Abbildung VI-11: Verhältnis der Häufigkeiten von Merkmalen in den Clustern zur Grundgesamtheit aller Nutzer in den jeweiligen Wochentagsaggregaten**



Quelle: eigene Berechnung

Die höchste Streuung der Verhältnisse der Häufigkeiten ist für die Merkmalsgruppe der Altersgruppe und der Lebensphase zu erkennen. Da zwischen den beiden Merkmalen Altersgruppe und Lebensphase ein starker logischer Zusammenhang besteht, z. B. Altersgruppe über 65 Jahre und Rentner, konzentriert sich die Interpretation der Cluster im Folgenden nur noch auf das Merkmal Lebensphase.

Unter der Woche weist das Cluster C3-1 eine signifikante Häufung der Lebensphase Auszubildender und insbesondere Vollzeit-Berufstätige auf. Das Cluster C3-2 wird unter der Woche durch die Lebensphasen Erziehende, Rentner, Hausmann, Sonstige und Teilzeit-Berufstätige geprägt. Für das Cluster C3-3 ergibt sich eine Häufung der Lebensphasen Schüler und ebenfalls Hausmann, Rentner, Studierende und Erziehung in der Woche. Die Zuordnung zwischen C3-2 und C3-3 sind somit nicht eindeutig einer Lebensphase zuzuschreiben. Die Beobachtungen lassen sich logisch mit den Auswertungen der Parameter Startzeit, Endzeit, Standzeit und Tagesfahrleistung kombinieren, so dass sich für das Cluster C1-1 eine deutliche Dominanz der Arbeitspendler erkennen lässt. Das Cluster C3-2 entspricht den morgendlichen Besorgungsfahrten oder dem Besuch der Arbeits- oder Bildungsstätte. Das Cluster C3-3 entspricht dem nachmittäglichen Verkehr, der ebenfalls Besorgungsfahrten, Besuch der Arbeits- und Bildungsstätte sowie Freizeitfahrten beinhalten kann. Die Verteilung der Parameter in den Gruppen zusammengenommen mit dem Vergleich von dominierenden Merkmalen lässt eine bedingte Zuordnung der Cluster zu. Das Cluster C3-1 entspricht unter der Woche dem Nutzerprofil eines Berufspendlers mit typischen Abfahrts- und Heimkehrzeiten. Die Cluster C3-2 (morgendliche Fahrten mit Rückkehr in den Mittagsstunden) und C3-3 (nachmittägliche Fahrten mit Rückkehr in den Abendstunden) sind in ihren Parameterausprägungen deutlich unterschiedlich. Eine Zuordnung zu den Merkmalen ist jedoch nicht eindeutig möglich. Beide Cluster werden in der Woche durch die Lebensphasen Erziehung, Jobsucher, Bundesfreiwillige, Hausmann und Rentner geprägt.

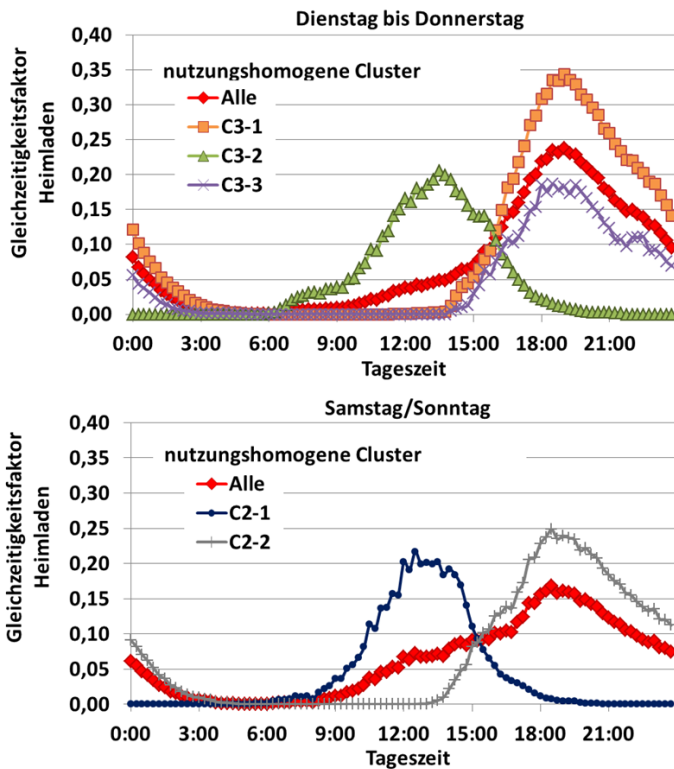
Für das Wochenende ist die Zuordnung der Cluster zu soziodemografischen Merkmalen weniger ausgeprägt. Das Cluster C2-1 wird demnach mehr durch die Gruppe der Hausmänner und Rentner bestimmt, während das Cluster C2-2 (Fahraktivität am Nachmittag) eher durch die restlichen Lebensphasen geprägt ist. Teilzeit- und Vollzeit-Berufstätige sind in beiden Gruppen ähnlich zur Grundgesamtheit vertreten. Zusammen mit dem deutlich höheren Anteil der Rentner in der Grundgesamtheit von knapp 23 % im Vergleich zu Erziehung (1,2 %) und Hausmann (5,3 %) lässt sich schließen, dass das Cluster C2-1 von der Lebensphase Rentner dominiert wird.

Das hier entwickelte Verfahren zur Clusterung von Bewegungsprofilen zu nutzungshomogenen Gruppen und deren Zuordnung zu soziodemografischen Merkmalen ermöglicht eine Berechnung von Ladelastprofilen für eine geringe Anzahl von Gruppen, die sich deutlich in der Kombination ladungsbestimmender Parameter unterscheiden. Diese Clusteraufteilung bildet die Grundlage für eine Modellierung von Szenarien zur Ladeleistung von bestimmten Gruppen. Dies ist die Grundlage für die im folgenden Kapitel berechneten Szenarien zur Ausgestaltung der Ladeleistung bei einer im Vergleich zur Grundgesamtheit geänderten Zusammensetzung soziodemografischer Gruppen möglicher xEV-Nutzer.

#### VI.4 Ladeverhalten in nutzungshomogenen Clustern und Szenarien

Basierend auf dem vorgestellten Ladeleistungsmodell und den gebildeten nutzungshomogenen Clustern können Tagesgänge im jeweiligen Cluster generiert werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung VI-12 für die Wochentagsaggregate in Form der Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen (Verhältnis der tatsächlichen Ladeleistung zur installierten Kapazität aller Heimladestellen, vgl. Kapitel V.3) dargestellt. Die Darstellung gibt Aufschluss darüber, ob bestimmte Cluster höhere Gleichzeitigkeitsfaktoren als die Grundgesamtheit aufweisen. Konsistent zu den Ergebnissen in Kapitel V.3 werden hier die Nutzer mit einer Heimladeleistung von 3,3 kW und einem Verbrauch von 17,5 kWh bei einer elektrischen Reichweite von 120 km verglichen.

**Abbildung VI-12: Tagesprofil der Gleichzeitigkeit der Ladeleistungsnachfrage für BEV-Nutzer @ Heimladen 3,3 kW, Strombedarf 17,5 kWh/100km, Reichweite 120 km**



Quelle: eigene Berechnung

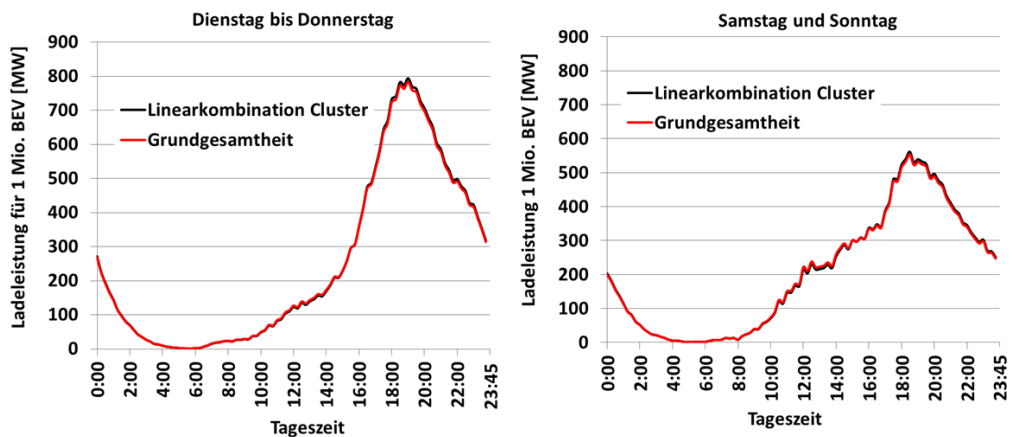
Die Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors des nutzungshomogenen Clusters C3-1 in der Woche zeigt deutlich höhere Peaks in der Abendspitze als die Grundgesamtheit. Dies resultiert aus dem relativ engen Zeitbereich des Clusters für den Parameter Ankunftszeit zu Hause und dem hohen Ladebedarf bedingt durch die höheren Tagesfahrleistungen. Der Verlauf der beiden anderen Cluster weist ähnlich hohe Peaks wie die Grundgesamtheit auf. Dabei ist der Peak des Clusters C3-2 in die Mittagsstunden verschoben. Der Verlauf des Clusters C3-3 weist bedingt

durch spätere Start- und Endzeiten einen flacheren Verlauf der Gleichzeitigkeit in den Abendstunden auf. Der Verlauf des Clusters C3-1, welcher signifikant durch die Gruppe der Vollzeit-Berufstätigen geprägt ist (vgl. Abbildung VI-11), ist insofern kritisch, als dass der Ladeleistungs-peak mit dem Peak der Haushaltsnachfragen (vgl. Abbildung V-10) zusammenfällt. So kann es durch eine Ungleichverteilung von soziodemografischen Schichten zum Beispiel in Wohngebieten an städtischen Randgebieten mit hohen Anteilen von Vollzeit-Berufstätigen zu einer deutlich erhöhten Ladeenergienachfrage zu bestimmten Zeiten kommen. In diesem Fall entspricht der erwartete Wert der Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen nicht dem Wert einer über alle soziodemografische Schichten verteilten Zusammensetzung.

Am Wochenende kann für die beiden nutzungshomogenen Cluster C2-1 und C2-2 ebenfalls ein deutlich unterschiedlicher Verlauf mit höheren Peaks in der Gleichzeitigkeit als bei der Nutzer-gesamtheit festgestellt werden. Das durch die Lebensphasen Erziehung, Hausmann und Rentner geprägte Cluster C2-1 weist einen deutlich früheren Peak der nachgefragten Ladeleistung um die Mittagszeit auf. Das Cluster C2-2 mit Schwerpunkt der Fahrten am Nachmittag hat eine um ca. 20 % höhere Peak-Leistung in den Abendstunden um 19 Uhr. Im Vergleich zur Woche fällt der Peak jedoch um knapp 29 % in der Spitze geringer aus.

Die signifikant unterschiedlichen Tagesgänge der Gleichzeitigkeit von Heimladevorgängen geben Hinweise, dass eine im Vergleich zur Grundgesamtheit andere Verteilung der nutzungshomogenen Gruppen eine Änderung der Tagesganglinien für das Heimpladen bewirkt. Neben den erwähnten Problemen bei kleinräumiger Betrachtung können aber auch langfristige soziodemografische Trends oder die Bildung von speziellen Käuferschichten für xEV das Tagesprofil der Ladeenergienachfrage verändern.

**Abbildung VI-13: Vergleich des Ladeleistungsverlaufs 1 Mio. BEV der Grundgesamtheit und Linearkombination der nutzungshomogenen Cluster @ ungesteuertes Heimpladen mit 3,3 kW, Strombedarf 17,5 kWh/100km, Reichweite 120 km**



Quelle: eigene Darstellung



Für die Berücksichtigung von Effekten, welche die Zusammensetzung der Grundgesamtheit potenzieller xEV-Nutzer deutlich beeinflussen, wird eine Kombination der Tagesganglinien der nutzungshomogenen Gruppen vorgeschlagen. Hiermit lässt sich analysieren, wie sich Verschiebungen in der Grundgesamtheit auf die resultierenden Ladeleistungskurven eines Gesamtbestands an xEV auswirken. Die Anwendung einer Linearkombination der Tagesprofile der Gruppen C3-1 bis C3-3 zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Grundgesamtheit (vgl. Abbildung VI-13).

Mit diesem Ansatz können soziodemografische Trends oder Kaufschicht-Spezifizierungen, welche zu einer veränderten Zusammensetzung der Grundgesamtheit führen, Berücksichtigung finden. Dies ist insbesondere von Interesse, wenn langfristige Szenarien zur Elektromobilität gerechnet werden und eine Konstanz der Grundgesamtheit nicht vorausgesetzt werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden zwei Szenarien gebildet, die solche möglichen Trends untersuchen.

Die angepassten Tagesprofile der Ladeenergienachfrage werden danach in ein Energiesystemmodell integriert und die Auswirkungen auf das nationale Energiesystem bestimmt. Neben den im Folgenden gezeigten Szenario-Beispielen sind auch weitere Entwicklungen denkbar, die zukünftig mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modell untersucht werden können.

#### ***VI.4.1 Szenario Demografie***

Eine aktuelle Prognose des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales [Vogler-Ludwig et al., 2016] für den Arbeitsmarkt 2030 geht von einem Rückgang der Erwerbstätigenzahl bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils der Teilzeit-Erwerbstätigen aus. Der Rückgang der Erwerbstätigenzahl wird mit der demografischen Entwicklung der Bevölkerung und dem schrumpfenden Anteil der Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter begründet. Die weitere Flexibilisierung der Arbeit wird als ein Grund für den weiteren Anstieg der Teilzeit-Erwerbstätigen angeführt. Inwieweit die aktuelle Zuwanderung diese Effekte beeinflusst, ist derzeit Gegenstand von weiteren Untersuchungen. Um den demografischen Trend der alternden Bevölkerung mit einem Rückgang der Vollzeit-Berufstätigen und einem gleichzeitigen Anstieg der Teilzeit-Berufstätigen zu untersuchen, wird im Szenario „Demografie“ ein Anstieg des Anteils der Cluster C3-2 und C3-3 (Hausmann, Rentner, Teilzeitberufstätige) in der Woche und des Clusters C2-1 am Wochenende um 20 % im Vergleich zur Grundgesamtheit der Nutzer unterstellt.

#### ***VI.4.2 Szenario Käuferschicht***

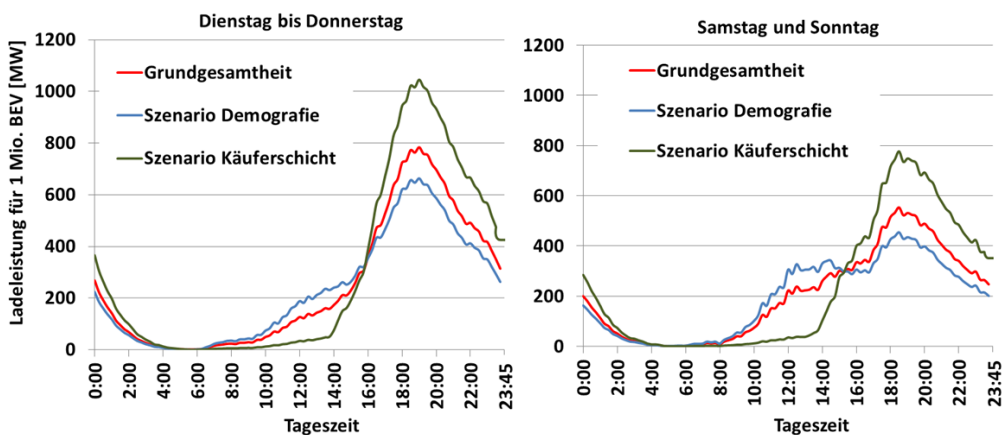
Wie bereits in Kapitel III.5 gezeigt, gibt es derzeit Hinweise, dass insbesondere Personen mit überdurchschnittlichem Einkommen und Wohneigentum in der Markteinführungsphase zur potenziellen xEV-Käuferschicht gezählt werden können. Der Anteil der Vollzeitbeschäftigten bei den hohen Haushaltseinkommen (vgl. Abbildung VI-2) ist in der untersuchten Grundgesamtheit aller Nutzer mit 29,7 % deutlich höher im Vergleich zu den mittleren und niedrigen Einkommensklassen auf. Zudem hat diese Käuferschicht einen hohen Anteil an privaten Stellplätzen, was die private Heimladung der Fahrzeuge am nächtlichen Stellplatz ermöglicht. Aus dieser Beobachtung heraus wird das Szenario „Käuferschicht“ abgeleitet, bei dem Vollzeit-Berufstätige

einen signifikant höheren Anteil am xEV-Besitz haben als andere Lebensphasen. Zusammen mit der guten Eignung des Nutzerprofils von Berufspendlern mit gut planbaren Fahrten und langen Standzeiten für xEV wird in diesem Szenario davon ausgegangen, dass der Anteil des Clusters C3-1 unter der Woche und des Clusters C2-2 am Wochenende (bestimmt durch Vollzeit-Berufstätige) um 50 % höher als in der Verteilung der Grundgesamtheit ausfällt.

#### VI.4.3 Vergleich der Szenarien

Eine Linearkombination der Tagesprofile der nutzungshomogenen Gruppen mit unterschiedlichen Gewichtungen ermöglicht die Berücksichtigung von Veränderungen gegenüber der Grundgesamtheit, welche zum Beispiel durch soziodemografische Effekte oder Bildung von spezifischen Käuferschichten auftreten können. Wendet man die Szenario-Annahmen auf die Zusammensetzung der Clustergruppen an, ergibt sich ein geänderter Ladelastverlauf für einen angenommenen BEV-Bestand (Abbildung VI-14) für die beiden Wochentagsaggregate.

**Abbildung VI-14: Vergleich der Ladeleistungskurve für die Szenarien „Demografie“ und „Käuferschicht“, 1 Mio. BEV**



Quelle: eigene Berechnung

Unter der Woche ergibt sich durch die Verschiebung der Anteile der nutzungshomogenen Gruppen ein deutlich geändertes Tagesprofil der Ladeleistung. Während sich der Ladeleistungspeak für das Szenario Demografie bei gleicher Tageszeit um knapp 16 % reduziert, kommt es für das Szenario „Käuferschicht“ zu einer signifikanten Erhöhung um 29,6 % mit einer deutlich schärfer ausgeprägten Peakbildung. Für das Szenario „Demografie“ ergeben sich im Vergleich zur Grundgesamtheit ein höherer Ladeleistungsbedarf um die Mittagszeit und insgesamt eine besser über den Tag verteilte Nachfrage. Bedingt durch die unterschiedlichen Tagesfahrleistungen in den Clustern verändern sich in den Szenarien auch die nachgefragten Ladeenergie-mengen. Im Szenario „Demografie“ errechnet sich ein Bedarfsrückgang von 5,3 %, während sich eine Steigerung um 14,7 % für das Szenario „Käuferschicht“ ergibt. Alle gezeigten Ergebnisse

sind zur besseren Vergleichbarkeit für 1 Mio. BEV-Nutzer mit den Referenzwerten aus Kapitel V.2.1 dargestellt.

Für das Wochenende ergibt sich für das Demografie-Szenario nur eine sehr geringe Änderung zur Grundgesamtheit. Der Lastgang des Szenarios „Käuferschicht“ zeigt eine ähnliche Ausprägung wie unter der Woche. Der Erhöhung des Peaks ist mit 37,2 % zur Grundgesamtheit noch signifikanter. Zu einer wesentlichen zeitlichen Verschiebung des Ladepeaks kommt es aber nicht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Änderung der Zusammensetzung potenzieller xEV-Nutzer deutliche Auswirkungen auf das Tagesprofil, die zu erwartenden Peak-Leistungen sowie die Ladeenergiemenge haben wird. Die hier vorgestellten Szenarien zum Heimladen eines Bestandes an BEV-Nutzer werden als Analysebestandteil in die Szenario-Rechnungen zum Energiesystem einbezogen, um die Unsicherheit bei der Ladeenergienachfrage zu berücksichtigen. In analoger Weise werden auch die Bestände an PHEV berücksichtigt. Die berechneten Tagesprofile können Abbildung XIII-8 im Anhang entnommen werden

### **VI.5 Exkurs: Übertragbarkeit des Modellansatzes auf gewerbliche Nutzer**

Das entwickelte Verfahren zur Modellierung der Ladeleistung basierend auf den Bewegungsprofilen der Nutzer und deren Aufteilung in nutzungshomogene Cluster ist für private Pkw-Nutzer ausführlich beschrieben worden. Wie bereits in Kapitel IV.1.2 und V.1 ausgewertet, werden knapp 79 % der Fahrleistung privat im Pkw-Verkehr erbracht. Trotz hoher Anteile der gewerblichen Halter bei den Neuzulassungen ist der Bestandsanteil mit knapp 11 % (Stand 1.1.2017) gering. Die Auswertung aktueller Studien zum Einsatz von Elektrofahrzeugen im Wirtschaftsverkehr mit Pkw und leichten Lkw von [Plötz et al., 2015b] und [Arndt et al., 2016] lässt den Schluss zu, dass das Elektrifizierungspotenzial als hoch eingeschätzt werden kann. Dies wird durch die gute Planbarkeit des Wirtschaftsverkehrs und die eher geringeren zu erbringenden Tagesfahrleistungen begründet. Die leichten Lkw, welche in der vorliegenden Forschungsarbeit durch die Klasse der Nutzfahrzeuge bis zu einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 t definiert werden, haben einen Anteil von 89,9 % an den Anfang 2017 zugelassenen Lastkraftwagen und stellen damit die mit Abstand größte Klasse dar [Kraftfahrtbundesamt, 2017a]. Diese Klasse ist für über die Hälfte der Fahrleistung aller Lkw verantwortlich (vgl. Tabelle IV-2).

Ausgangspunkt der vorgestellten Modellierung der Ladeleistung ist die Erstellung von Bewegungsprofilen der privaten Pkw-Nutzer. Die gewerbliche Nutzung von Pkw und Lkw wird in den bisher vorgestellten Analysen nicht abgedeckt. Die bereits vorgestellte Datenerhebung KiD 2010 (vgl. Kapitel IV.1.2) macht dies durch Anpassungen des entwickelten Data-Mining-Verfahrens möglich. Der Unterschied zur bisher vorgestellten Vorgehensweise besteht darin, dass nicht Wegeinterviews von Personen erfasst worden sind, sondern fahrzeugbezogene Befragungen durchgeführt wurden. Wie bereits in Kapitel V.5 gezeigt wurde, ist eine Modellierung fahrzeugbezogener Bewegungsprofile möglich. Weiterhin dürfen die Datensätze der KiD 2010 für wissenschaftliche Zwecke ausgewertet werden.

Die Modellierung der Bewegungsprofile erfolgt dementsprechend für gewerblich genutzte Pkw und Lkw mit einem zGG < 3,5 t. Es wird die in Kapitel V.2 vorgestellte Vorgehensweise zur Datenaufbereitung und Modellierung auf die Fragestellung angepasst. Für die Auswertung der Wegeinformationen von Fahrzeugen gelten folgende Einschränkungen:

- nur gewerblich bedingte Wege (Ausschluss von Wegen von der Wohnstätte zur Arbeitsstelle und zurück),
- nur Wege, die Informationen zu Startzeit, Endzeit, Weglänge und Stichtag enthalten,
- letzter Weg des Tages endet am Wohnort oder Depot,
- Wege unter der Woche von Di bis Do und
- nur Wege mit einem Pkw oder einem leichten Lkw.

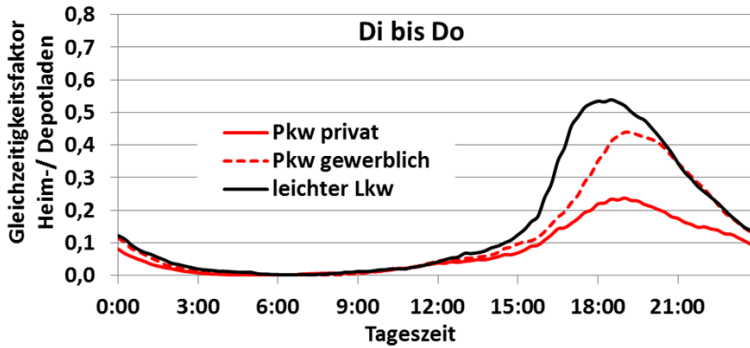
Die Einschränkung der Auswertung auf das Wochentagsaggregat Dienstag bis Donnerstag trägt der Verfügbarkeit der Wegedaten Rechnung. Diese ist am Wochenende zu gering und lässt eine belastbare Auswertung nicht zu. Die daraus gewonnenen Bewegungsprofile für gewerbliche Pkw (Anzahl: 3423) und leichte Lkw (Anzahl: 2016) sind für die Modellierung der Ladeleistung herangezogen worden.

Eine Aufteilung in nutzungshomogene Cluster wird ebenfalls durchgeführt. Da die Zuordnung der Fahrzeuge zu soziodemografischen Merkmalen der Nutzer nicht Bestandteil der KiD 2010-Datenerhebung ist, wird eine Clusterung nach der Oberstruktur der Wirtschaftszweige nach [Wermuth, 2012] durchgeführt. Der Haupteinsatzzweck der Fahrzeuge ist einem bestimmten Wirtschaftszweig zugeordnet. Die entsprechenden Daten und Kriterien für die Bestimmung der Clusterzahl nach dem Test nach Mojena, dem Elbow-Kriterium, der F-Wert-Analyse und den Boxplots sind dem Anhang XIII.4 zu entnehmen. Die Analysen ergeben für das ausschließlich untersuchte Wochentagsaggregat Dienstag bis Donnerstag eine geeignete Anzahl von drei Clustern für gewerbliche Pkw und von drei Clustern für leichte Lkw. Die Zuordnung der Wirtschaftszweige kann Abbildung XIII-6 und Abbildung XIII-7 im Anhang entnommen werden.

Das Tagesprofil der Gleichzeitigkeit für die Nutzergesamtheit der gewerblichen Pkw und der leichten Lkw im Vergleich zum bereits gezeigten Profil der privaten Pkw-Nutzer ist in Abbildung VI-15 dargestellt. Die Annahmen zum Strombedarf der BEV und zu den elektrischen Reichweiten für die gewerblichen Pkw und die leichten Lkw sind der Studie [Arndt et al., 2016] für das Jahr 2015 entnommen. Der Einfluss des Strombedarfs der Fahrzeuge und der elektrischen Reichweite ohne Nachladen für BEV wurde bereits in Kapitel V.3 diskutiert.

Der Tagesverlauf der Gleichzeitigkeit der Heim- bzw. Depotladung zeigt einen Peak um 19:00 Uhr, der im Vergleich zu den privaten Pkw-Nutzern um 85 % höher ist. Der Peak der leichten Lkw ist im Vergleich zu früheren Zeiten um 30 Minuten verschoben und übertrifft den Peak der privaten Pkw-Nutzer um den Faktor 2,2. Für die gewerbliche Nutzung von Pkw und leichten Lkw kann nach diesen Ergebnissen von einer deutlich höheren Gleichzeitigkeit in den Abendstunden bei ungesteuerten Ladevorgängen ausgegangen werden. Da diese Bereiche auch in Peak-Nachfragen der Haushalte fallen, macht dies die Notwendigkeit von Ladesteuerungen bei hohen Marktdurchdringungen von xEV sehr wahrscheinlich.

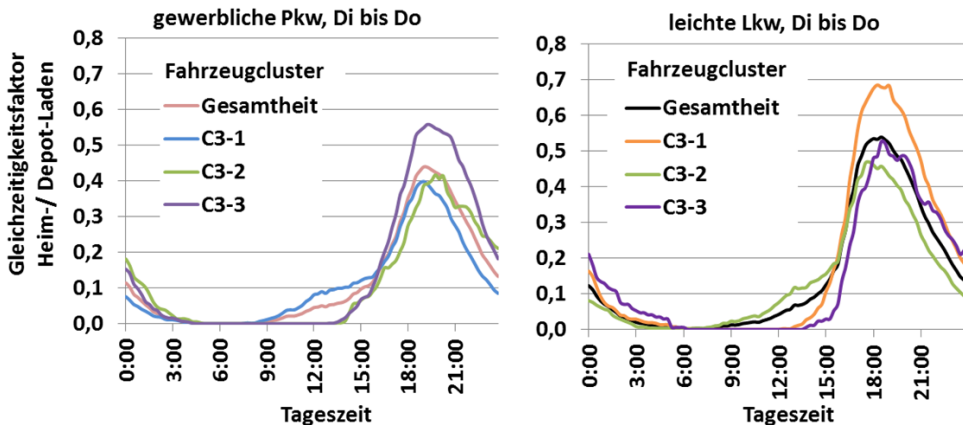
**Abbildung VI-15: Vergleich der Tagesprofile der Gleichzeitigkeit in der Grundgesamtheit; ungesteuertes Heim- / Depotladen 3,3 kW, private und gewerbliche Pkw: Strombedarf 17,5 kWh/100km, Reichweite 120 km; leichte Lkw: Strombedarf 25,1 kWh/100km, Reichweite 115 km**



Quelle: eigene Berechnung

Die Ergebnisse der Aufteilung in nutzungshomogene Cluster sind in Abbildung VI-16 dargestellt. Unter der Woche sind die Cluster C3-1 und C3-2 für gewerbliche Pkw sehr ähnlich zur Grundgesamtheit. Das Cluster C3-3 bildet einen um 26 % höheren Peak in der Gleichzeitigkeit im Vergleich zur Grundgesamtheit aller gewerblichen Pkw aus. Dieses Cluster ist durch die Wirtschaftszweige „Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden“, „Information und Kommunikation“ und auch „Erbringung von Dienstleistungen“ geprägt (vgl. Abbildung XIII-6).

**Abbildung VI-16: Vergleich der Tagesprofile der Gleichzeitigkeit in nutzungshomogenen Clustern; ungesteuertes Heim- / Depotladen 3,3 kW, private und gewerbliche Pkw: Strombedarf 17,5 kWh/100km, Reichweite 120 km; leichte Lkw: Strombedarf 25,1 kWh/100km, Reichweite 115 km**



Quelle: eigene Berechnung

Für die leichten Lkw werden insgesamt höhere Peaks in den Gleichzeitigkeiten erreicht. Während die Cluster C3-2 und C3-3 unter der Woche für leichte Lkw ähnlich zur Grundgesamtheit sind, ist die Peakbildung im Cluster C3-1 sehr ausgeprägt und erreicht mit 0,68 den höchsten Wert aller Tagesprofile der Ladeleistungen für private und gewerbliche Pkw sowie leichte Lkw. Dieses Cluster ist durch die Wirtschaftszweige private und öffentliche Dienstleistungen geprägt (siehe Abbildung XIII-7).

Die im Rahmen des Exkurses erfolgte Analyse der gewerblichen Pkw und der leichten Lkw zeigt, dass die entwickelten Modelle und das entwickelte Data-Mining-Verfahren auch auf den Bereich der gewerblichen Fahrzeuge angewandt werden kann. Die Ergebnisse zeigen im Vergleich zur privaten Pkw-Nutzung deutlich ausgeprägter Peaks mit zum Teil sehr hohen Gleichzeitigkeiten. Die Verteilung der Ladeenergienachfrage über den Tag ist für private und gewerbliche Pkw sowie Lkw sehr ähnlich. Dies ist ein wichtiges Erkenntnis zur Modellierung der Ladeenergienachfragen über den Tagesverlauf deren Abbildung in Energiesystemmodellen.

### **VI.6 Diskussion des Modellansatzes und der Ergebnisse**

Der hier vorgestellte Ansatz zur Bildung von nutzungshomogenen Gruppen und deren Zuordnung zu soziodemografischen, haushaltstypischen und sonstigen Merkmalen ermöglicht eine Berücksichtigung einer geänderten Zusammensetzung von potenzieller xEV-Nutzern. Wie gezeigt, können demografische Effekte oder die Bildung von spezifischen Käuferschichten zu einer solchen geänderten Zusammensetzung führen. Dies ist als ein wesentlicher Vorteil im Vergleich zur vorgestellten Vorgehensweise in Kapitel V zu sehen, welche auch in anderen Studien (z. B. [Heinrichs, 2013], [Linssen et al., 2012], [Anderson et al., 2016], [Stöckl, 2014]) Anwendung findet.

Die Aufteilung in Cluster hat gezeigt, dass sich daraus zum Teil deutlich unterschiedliche Tagesprofile der Ladeleistung eines Bestands an xEV ableiten lassen. Insbesondere eine nicht der Grundgesamtheit aller Pkw-Nutzer entsprechende Verteilung lässt damit teilweise deutliche Abweichungen von der erwarteten Tagesganglinie erwarten. Dies tritt insbesondere bei kleinräumigen Untersuchungen zu Tage, bei denen eine Häufung von bestimmten Nutzergruppen nicht ausgeschlossen werden kann. Als Beispiel sei hier ein Wohngebiet am Stadtrand angeführt, welches eine hohe Durchdringung von berufstätigen Pendlern aufweist.

Eine Einschränkung des Modellansatzes besteht darin, dass Änderungen der Nutzungsgewohnheiten von Pkw, welche nicht durch soziodemografische und haushaltstypisierende Faktoren bestimmt sind, nicht berücksichtigt werden können. Eine solche Analyse veränderter Nutzungsgewohnheiten kann belastbar nur durch einen Vergleich von Primärdaten erfolgen. Für private Pkw existieren dazu kontinuierliche Erhebungen, welche allerdings teilweise nur in sehr großen zeitlichen Abständen erfolgen. Eine Feststellung von Trends und möglichen Fortschreibungen für die Zukunft des privaten Mobilitätsverhaltens ist daher nur sehr begrenzt möglich (vgl. Kapitel V.4). Derzeitige Trends wie sich ändernde Arbeitszeitmodelle mit Veränderung der Präsenzkultur, verteilter Arbeit und Flexibilisierung können nicht dargestellt werden, da derzeit unklar ist, wie sich das auf die Pkw-Mobilität im Detail auswirken wird. Zudem können mit diesem Modellansatz strukturelle Trends wie autonomes Fahren nur schwer berücksichtigt

werden, da die Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten derzeit nur wenig bekannt sind und noch keine Erfahrungswerte oder Erhebungen existieren.

Die im Rahmen der Arbeit entwickelte Clustermethode basiert auf der Anwendung der hierarchischen Clusterung nach dem Ward-Verfahren. Ein weiteres weit verbreitetes Clusterverfahren ist das iterative Minimaldistanzverfahren (k-Means). Dieses partitionierende Verfahren (vgl. Abbildung VI-5) bildet mit Hilfe einer iterativen Vorgehensweise ebenfalls Cluster mit geringer Varianz. Die Rechenvorschrift der Clusterung erfolgt nach dem Prinzip der Minimierung der quadrierten Abweichungen von den Cluster-Schwerpunkten. Es werden zufällig ausgewählte Objekte als Cluster-Schwerpunkt ausgewählt und so lange ausgetauscht und sortiert, bis die Summe der quadrierten Abweichungen  $F$  nach Gleichung V-10 minimal wird (Optimierung der Funktion).

$$F_g = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^J (x_{kij} - \mu_{jg})^2$$

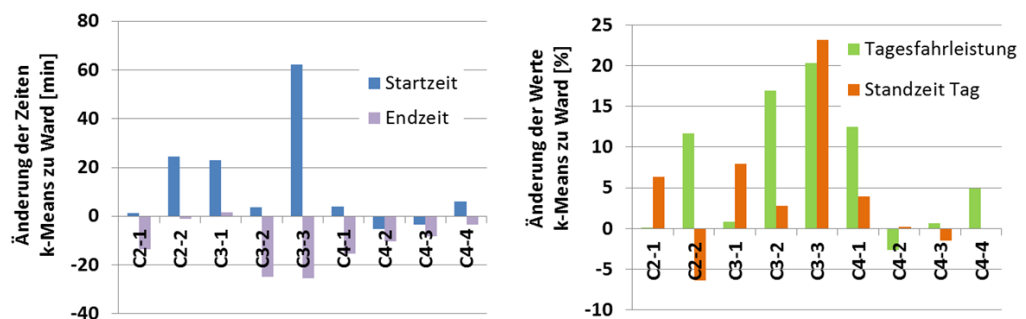
Gleichung VI-10

mit  $F_g$  = Summe der quadrierten Abweichung vom Clusterzentrum  $\mu_g$  des Clusters  $g$ ;  $K$  = Gesamtzahl der Objekte im Cluster  $g$ ;  $J$  = Gesamtzahl der Parameter

Dieses Verfahren führt insbesondere bei der hier untersuchten Forschungsfrage mit großer Fallzahl zu einem deutlich höheren Berechnungsaufwand, da sie für jeden Fusionierungsschritt die Berechnung der Distanzmatrix zwischen allen Fällen erfordert. Weiterhin erfordert die Berechnung eine vorab festgelegte Anzahl an Clustern und es können nur metrisch skalierte Variablen zwischen den Clustern verglichen werden. Im Ergebnis liefert das Verfahren eine Zuordnung der Fälle zu der vorgegebenen Clusterzahl.

Da das gewählte Verfahren einen Einfluss auf die Ausbildung der Cluster haben kann, ist ein Vergleich der gebildeten Cluster nach den verschiedenen Clusterverfahren für das Wochentagsaggregat Dienstag bis Donnerstag in Abbildung VI-17 dargestellt.

**Abbildung VI-17: Vergleich der Änderungen der Mittelwerte in den Clustern nach dem Ward- und k-Means-Verfahren**



Quelle: eigene Berechnung

Die Aufteilung der Grundgesamtheit in nutzungshomogene Gruppen nach dem k-Means-Verfahren liefert ähnliche Aufteilungen und Mittelwerte für die Parameter, Startzeit, Endzeit, Standzeit am Tag und Tagesfahrleistung. Der Einfluss des gewählten Clusterverfahrens ist damit als untergeordnet einzustufen.

Eine zeitnahe und weitreichende Erfassung des Mobilitätsverhaltens von Pkw-Nutzern wäre erst durch die Nutzung von im Fahrzeug aufgezeichneten Daten und deren zentrale Sammlung und Auswertung möglich. Diesem Ansatz zur Erhebung von Mobilitätsdaten stehen allerdings derzeit noch deutliche Bedenken des Datenschutzes entgegen.

Ein Nachteil der hier vorgestellten Vorgehensweise ist, dass insbesondere die Bestimmung einer sinnvollen Anzahl an Clustern und deren Interpretation Deutungsspielräume aufweist. Die Anwendung der Verfahrensweise auf die neuen MiD 2016-Daten erfordert eine erneute eingehende Analyse der Daten und deren Interpretation. Die Adaption der Vorgehensweise auf die Modellierung von gewerblichen Pkw und leichten Lkw in Kapitel VI.5 hat gezeigt, dass eine Übertragbarkeit auf andere empirische Datenerhebungen zum Mobilitätsverhalten möglich ist.

Die Validierung der Modellergebnisse zu den nutzungshomogenen Gruppen kann nur durch eine logische Prüfung erfolgen. Ein Vergleich mit empirischen Daten zum Ladeverhalten von verschiedenen Nutzergruppen ist derzeit nicht möglich, da eine gezielte Erfassung der Ladevorgänge nach soziodemografischen, haushaltstypischen oder siedlungsstrukturellen Merkmalen nicht verfügbar ist.

Die Elektromobilität und die Interaktion mit dem Energiesystem werden maßgeblich durch das Ladeverhalten und die resultierenden Tagesprofile bestimmt. Eine Abbildung der Ladebedarfsprofile in Energiesystemmodellen ist somit eine notwendige Voraussetzung für die Bewertung von xEV. Mit den im Rahmen der Arbeit entwickelten Modellen und darauf aufbauenden Analysen der Ergebnisse ist es möglich, Tagesprofile des Ladeenergiebedarfs und mögliche Trends in zukünftigen Szenarien zur Energieversorgung zu berücksichtigen.





## VII. Szenarien zur Energieversorgung unter Berücksichtigung der Elektromobilität

Die Elektromobilität wird seit längerer Zeit als ein wichtiger Baustein für ein klimaschonendes, emissionsarmes und effizientes Verkehrssystem (vgl. [Schlesinger et al., 2014], [Matthes et al., 2013]) [BMWi & BMU, 2010], [BMU, 2016]) gesehen. Eine durch xEV erwartete Verschiebung der Endenergienachfrage des Verkehrs hin zum Strom hat zahlreiche Wechselwirkungen im Energiesystem. Dies macht eine vernetzte Modellierung des Energiesystems über alle Sektoren hinweg notwendig. Energiesystemmodelle können diese Wechselwirkungen abbilden, indem sie nicht nur die zusätzliche Stromnachfrage der xEV berücksichtigen, sondern auch den Nachfragerückgang nach mineralölbasierten Kraftstoffen und deren Auswirkungen im Umwandlungsbereich mit in die Analyse einbeziehen. Eine isolierte Betrachtung der Stromerzeugung und des Verkehrssektors wird der sektoralen Verflechtung im Energieversorgungssystem nicht gerecht. Die Elektromobilität steht dabei im kostenseitigen Wettbewerb mit anderen Techniken zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Aufbauend auf der eingehenden Analyse zukünftiger Ladebedarfsprofile von xEV steht in diesem Kapitel die Integration der Ergebnisse in ein bestehendes nationales Energiesystemmodell im Vordergrund. Ziel dieser kombinierten Vorgehensweise ist die Quantifizierung des Beitrags der Elektromobilität zur Erreichung der Klimaschutzziele. Weiterhin sollen konkurrierende Maßnahmen oder Techniken identifiziert werden. Die Berücksichtigung verschiedener Ladevarianten ist ein Bestandteil der Untersuchung. Da derzeit nicht auf historische Daten zum Strombedarf eines Bestands an xEV-Pkw und dessen Tagesprofile zurückgegriffen werden kann, kommt das entwickelte Ladeleistungsmodell der Grundgesamtheit aller Nutzer zum Einsatz (Kapitel V). Um in langfristigen Szenarien auch soziodemografische Trends berücksichtigen zu können, werden die Erkenntnisse aus der Analyse nutzungshomogener Cluster (vgl. Kapitel VI) in die Szenario-Analysen integriert.

### VII.1 Beschreibung des verwendeten Energiesystemmodells

Ein wesentliches Merkmal von Energiesystemmodellen ist, dass alle energiewirtschaftlichen Strategien, politische Maßnahmen, die Verbesserung bestehender Techniken und der Einsatz neuer Techniken konkurrieren, um einen kosteneffizienten Beitrag zum Klimaschutz und zur Energieeffizienz zu erreichen.

Weltweit existieren derzeit einige Energiesystemmodelle mit sehr unterschiedlichen Ausprägungen und Anwendungsfeldern sowie regionalen Schwerpunkten. Die Bandbreite der Modellansätze reicht von sehr detaillierten sektoralen Modellen bis hin zu globalen Energiesystemmodellen mit aggregierten Regionen über Ländergrenzen hinweg (z. B. EU). Die Veröffentlichungen [Zeng et al., 2011], [Weijermars et al., 2012] und [Pfenninger et al., 2014] geben dazu geeignete Übersichten. Als Trends bei der Modelentwicklung lassen sich aus den angeführten Veröffentlichungen eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung, die Berücksichtigung von Unsicherheiten und die Modellierung von Akteurverhalten ableiten. Die Erhöhung der räumlichen und zeitlichen Auflösung in den Modellen ist dabei getrieben durch die detaillierte Modellierung der erneuerbaren Energieumwandlung, der Energiespeicherung, von Energietransportnetzen und von nachfrageseitigen Flexibilitätsoptionen.

Das im Rahmen der Analyse verwendete und adaptierte IKARUS-Modell (IKARUS – Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien) zählt zu den klassischen Energiesystemmodellen. Das Modell bildet das Energiesystem in Deutschland durch vernetzte Energieumwandlungs- und Energie-transport-Prozesse sowie die Energienutzungen in den Endbedarfssektoren ab. Ein Austausch von Primär- und Endenergieträgern mit anderen Energiesystemen (z. B. Stromexporte in oder Gasimporte aus anderen Ländern) ist im Modell durch Export- und Importenergieflüsse abgebildet. Unter gesetzten energie- und umweltpolitischen Zielen wird unter Vorgabe energiebedarfsbestimmender Kenngrößen in den Sektoren, wie z. B. der beheizten gesamten Wohnfläche oder der Personenverkehrsleistung, ein kostenminimiertes Energieträger- und Technik-Portfolio mathematisch bestimmt. Das gewählte Portfolio muss dabei die Bereitstellung der nachgefragten Energien in den jeweiligen Sektoren gewährleisten.

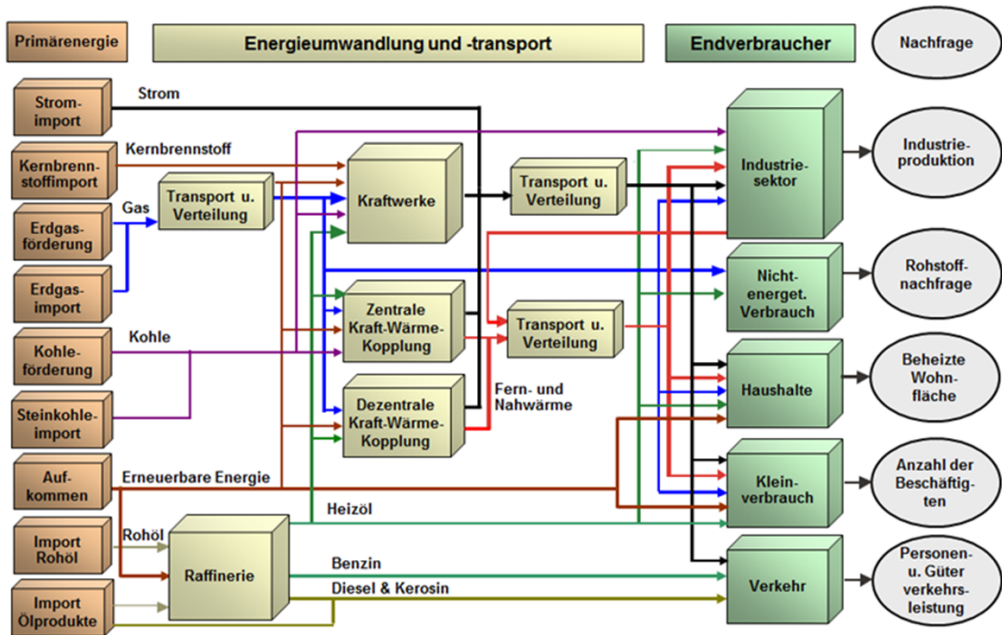
Das IKARUS-Modell ist als Ein-Knoten-Modell für Deutschland konzipiert und zählt zur Klasse der technikbasierten Bottom-Up-Modelle mit geringer zeitlicher Auflösung. Es zeichnet sich dadurch aus, dass eine Vielfalt an Technikoptionen abgebildet wird. Für jeden Analyseschritt, welcher einer Zeitperiode von fünf Jahren entspricht, ist ein Referenzdatensatz hinterlegt. Dieser beinhaltet u. a. die Datenbeschreibungen von ca. 2.000 Energiewandlungstechniken, die Nachfragen nach Energiedienstleistungen, die Importenergieträgerpreise sowie weitere energiepolitische Zielvorgaben. Für die jeweiligen Energiewandlungs- und -transportschritte sind mehrere konkurrierende Techniken abgebildet. Ökonomische Kenngrößen wie Investitionen, Primärenergieträgerpreise und deren Trends, Im- und Export von Energieträgern sowie möglicher Kapazität-zubau oder -abbau in bestimmten Zeitperioden können als Szenario-Annahmen berücksichtigt werden. Neben den ökonomischen und technischen Daten können relevante energiepolitische Ziele (Kernenergieausstieg, Anteil erneuerbare Stromerzeugung, Primärenergie-Einsparung u. a.) berücksichtigt werden. Andere Modellansätze mit höheren zeitlichen und räumlichen Auflösungen für Deutschland und Europa (z. B. [Welder et al., 2017], [Scholz, 2012], [Palzer & Henning, 2013], [oemof, 2018]) können, bedingt durch die entstehende Komplexität des Optimierungsproblems, nur eine geringere Zahl an Technikoptionen abbilden und / oder sind nur auf einzelne Sektoren fokussiert. Die Modellstruktur des verwendeten Energiesystemmodells ist in Abbildung VII-1 dargestellt.

Die Bilanzierung der Kosten, Energieflüsse und Emissionen erfolgt über das gesamte Energiesystem hinweg. Bilanziert werden die direkten Emissionen entsprechend dem Verursacherprinzip. Vorgelagerte Emissionen im Sinne einer Lebenszyklusanalyse werden nicht in die Analyse einbezogen. Bei der Bilanzierung der Emissionen handelt es sich nicht um eine lebenszyklusbasierte Analyse. Energie- und Stoffströme, die während des Baus von Anlagen oder bei der Entsorgung entstehen, werden nicht berücksichtigt. Der Zeithorizont der Analysen ist bis zum Jahr 2050 möglich und entsprechende Datensätze sind hinterlegt.

Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Gesamtsystemkosten. Die Lösung wird durch lineare Optimierung bestimmt. Der Rechenalgorithmus der Optimierung ist im Time-Step-Verfahren aufgebaut, so dass nicht über mehrere Zeitperioden, sondern getrennt für jede Zeitperiode optimiert wird (myopischer Ansatz). Für eine vertiefende Beschreibung möglicher Optimierungsansätze von Energiesystemmodellen und deren Vergleich sei an dieser Stelle z. B.

auf [Zeng et al., 2011], [Weijermars et al., 2012] und [Pfenninger et al., 2014] verwiesen. Eine detaillierte Beschreibung des IKARUS-Modells und der implementierten Struktur findet sich in [Markewitz & Stein, 2003].

**Abbildung VII-1: Struktur des verwendeten Energiesystemmodells**



Quelle: angepasst nach [Markewitz & Stein, 2003]

Einsatzzwecke des Modells sind Analysen energiepolitischer Gesamtkonzepte oder die Untersuchungen von Technikoptionen und deren Rückwirkungen auf das Energiesystem. Eine Auswahl bereits durchgeführter Analysen gestützt durch das IKARUS-Modell ist zum Beispiel in [Martinsen et al., 2010], [Linsen et al., 2012], [Matthes et al., 2013], [Heinrichs & Markewitz, 2015], [Arndt et al., 2016] und [Heinrichs et al., 2017] veröffentlicht. Das Modell wurde dabei laufend strukturell und datenseitig den jeweiligen Fragenstellungen angepasst und weiterentwickelt.

Die im Rahmen der Kapitel III bis VI ermittelten Daten und Erkenntnisse ermöglichen die Abbildung des resultierenden Ladeenergiebedarfs eines Bestands an xEV. Das Tagesprofil des Ladeenergiebedarfs wird für die Grundgesamtheit aller Nutzer für ein nicht gesteuertes und ein gesteuertes Laden abgebildet (siehe Kapitel V). Darauf aufbauend wird eine weitere Ladevariante unter Berücksichtigung der geänderten Altersstrukturen der Pkw-Nutzer (Kapitel VI) untersucht.

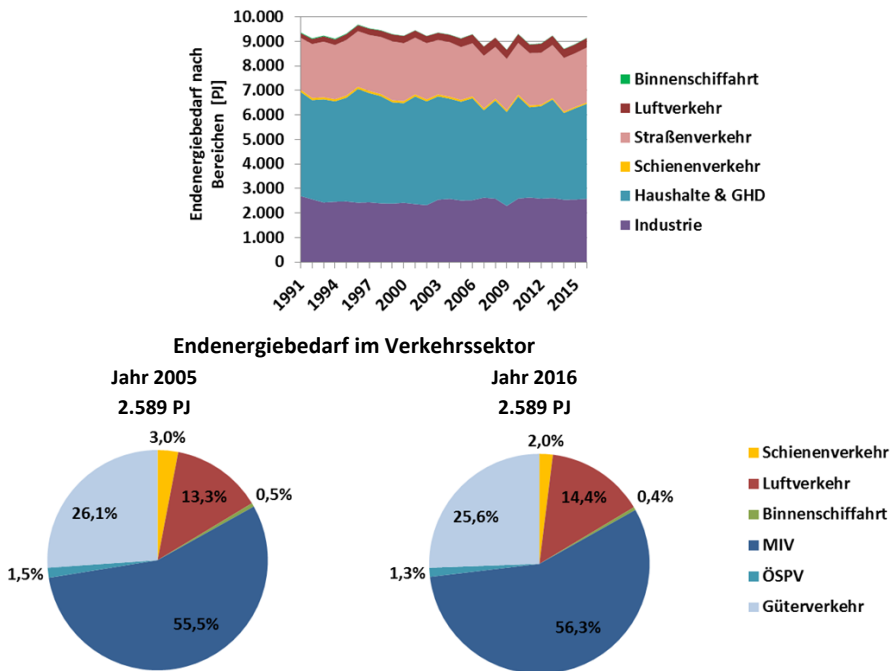
Die Wahl des IKARUS-Modells wird durch die Gesamtsystembetrachtung begründet. Die Wirksamkeit der Elektromobilität als Klimaschutzmaßnahme kann somit quantifiziert und mit anderen Maßnahmen und Techniken sektorübergreifend verglichen werden. Weiterhin wird im

Rahmen der vorliegenden Arbeit geprüft, ob die Verwendung von Energiesystemmodellierung mit geringer zeitlicher Auflösung zur Quantifizierung der Auswirkungen eines geänderten Ladeverhaltens genutzt werden kann.

## VII.2 Ausgangssituation im Verkehrs- und Energiesystem

Im Folgenden werden in einem ersten Schritt die heutige Energieversorgung und insbesondere der Verkehrssektor kurz skizziert. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Betrachtung von Primär- und Endenergeträgerbedarfen in Deutschland. Die Bedeutung des Verkehrsbereichs für den Endenergiebedarf zeigt Abbildung VII-2. Die Verläufe des Endenergiebedarfs der Sektoren Haushalte und Gewerbe /Handel / Dienstleistung (GHD) sind nicht temperaturbereinigt und weisen dementsprechend wetterbedingte Schwankungen zwischen den Jahren auf.

**Abbildung VII-2: Historische Entwicklung des Bedarfs an Endenergeträgern nach Sektoren und Verkehrsträgern in Deutschland**



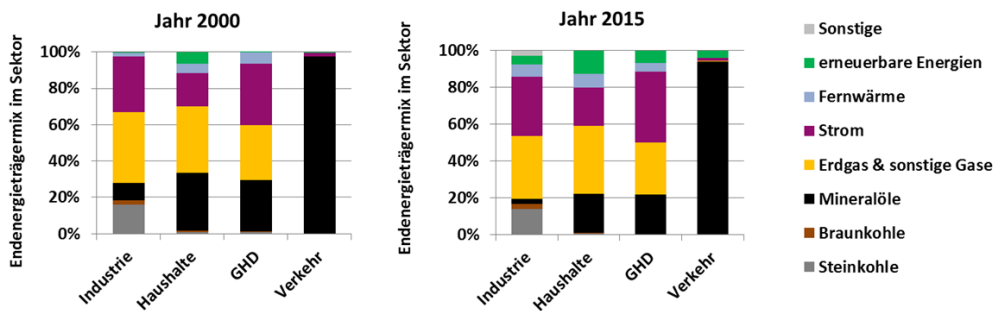
Quelle: [Radke, 2017]

Der Verkehrsbereich hat seinen Anteil am gesamten Endenergiebedarf in den letzten 10 Jahren auf zuletzt 29,4 % gesteigert. Ein Vergleich des absoluten Endenergiebedarfs im Verkehr zwischen den Jahren 2005 und 2016 zeigt eine Steigerung um +4,1 %. Die erhöhten Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr insbesondere auf der Straße haben die Effizienzgewinne überkompensiert. Das Energiekonzept der Bundesregierung sieht eine Endenergieeinsparung für den Verkehrsbereich von -40 % bezogen auf das Jahr 2005 bis zum Jahr

2050 vor. Derzeit ist der Trend zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehr deutlich verfehlt. Der Vergleich des Endenergiebedarfs nach Verkehrsträgern (Abbildung VII-2, unten) zeigt die starke Dominanz des motorisierten Individualverkehrs (MIV) mit einem Anteil von 56,3 % im Jahr 2016. Dieser ist wesentlich bestimmt durch den Pkw-Verkehr. Der Anteil des Straßengüterverkehrs mit Lkw am Endenergiebedarf nimmt in der Tendenz leicht ab. Die Effizienzanstrengungen bei den Fahrzeugen überkompensieren dabei die gesteigerte Transportleistung in den letzten 10 Jahren. Die großen Potenziale zur Endenergieeinsparung sind dementsprechend im Pkw-Verkehr gefolgt vom Lkw-Verkehr und dem Luftverkehr zu erschließen. Der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen wird sich aufgrund ihrer technischen Spezifika auf den Bereich Pkw und leichte Lkw konzentrieren. Bedingt durch die effiziente Umwandlungskette im Fahrzeug stellt die Elektromobilität eine wesentliche Option zur Effizienzsteigerung im Verkehr dar (vgl. Kapitel III).

Die Entwicklung des Energieträger-Portfolios in Richtung erneuerbare Energien ist ein wichtiges Ziel der Energiewende. Den Vergleich der eingesetzten Energieträger in den Sektoren für das Jahr 2005 und 2016 zeigt Abbildung VII-3. Während der Verkehr zu ca. 93 % auf Mineralölprodukten basiert, zeigen die anderen Sektoren ein breites Portfolio und einen höheren Anteil an erneuerbaren Energien. Der Endenergiebedarf im Verkehr verteilte sich im Jahr 2015 zu 27,8 % auf Benzin, zu 52,1 % auf Diesel und zu 13,8 % auf Kerosin. Der restliche Energiebedarf wird durch Fahrstrom (1,6 %, maßgeblich Bahnverkehr) und Biokraftstoffe (4,2 %) gedeckt.

**Abbildung VII-3: Historische Entwicklung des Endenergie trägermix in den Endverbrauchssektoren in Deutschland**



Quelle: [ageb, 2016]

Der Dieselbedarf hat sich in den letzten 10 Jahren um ca. +23 % erhöht. Dies ist durch einen wachsenden Bestand an Diesel-Pkw und einen steigenden Anteil des Straßengüterverkehrs begründet. Die aktuelle Diskussion um die erhöhten Emissionswerte der Diesel-Pkw, insbesondere der Stickoxide, könnte diesen Trend zukünftig stoppen.

Das Stromerzeugungs-, Transport- und Verteil-System in Deutschland befindet sich, wie auch in anderen Ländern, in einem Transformationsprozess. Zentrale Treiber dieses Prozesses sind der Klimaschutz und der damit verbundene Trend zur erneuerbaren Stromerzeugung. In Deutsch-

land werden die Ziele für den Umbau des Energiesystems und ganz besonders der Stromversorgung durch das Energiewende-Konzept gesetzt. Die Zielerreichung wird durch ein begleitendes Monitoring-Verfahren überwacht [BMW, 2016].

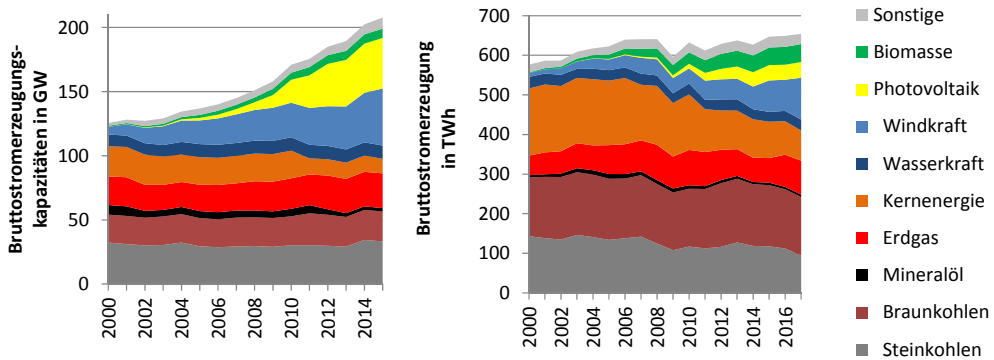
In der Vergangenheit wurde der Strom in zentralen Großkraftwerken an Verbrauchsschwerpunkten meist dargebotsunabhängig und damit steuerbar erzeugt. Der Transport erfolgte über kurze Entfernungen. Zukünftig wird das Stromsystem durch eine dezentrale, teilweise von Verbrauchsschwerpunkten ferne, dargebotsabhängige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bestimmt werden. Die Netzauslegung nach dem Stromfluss von der Erzeugung in der Höchst- und Hochspannung hin zu den Verbrauchern in der Niederspannungsebene wird in Zukunft bidirektional über alle Spannungsebenen hinweg erfolgen müssen. Die Flexibilität des Strombedarfs wird sich dabei deutlich erhöhen müssen, um dem schwankenden Angebot besser folgen zu können. Eine wichtige weitere Option für den zeitlichen Abgleich von Stromangebot und -nachfrage ist die kurzfristige (bis zu einem Tag) und die saisonale Stromspeicherung (bis mehrere Wochen). An dieser Stelle sei auf vertiefende Literatur zur stationären Energiespeicherung verwiesen, z. B. [Sternner & Stadler, 2018] oder [Stenzel et al., 2018].

Die wichtigen Entwicklungstrends des Stromsystems werden in [BMW, 2017] umfassend beschrieben. Als einer der wichtigen Trends wird die Sektorenkopplung mit einer deutlich stärkeren Vernetzung zwischen den Endenergiesektoren Industrie, Gewerbe, Haushalte und Verkehr und der erneuerbaren Stromerzeugung hervorgehoben. Das Prinzip geht von einer gezielten, zeitlich abgestimmten Nutzung von erneuerbarem Strom insbesondere in Zeiten hoher dargebotsabhängiger Erzeugung und geringer Nachfrage aus. Durch die bereits beschriebene Option der strombasierten Kraftstoffe und der Elektromobilität kann der Verkehr zukünftig ein Bestandteil der Sektorenkopplung werden. Er ist ein neuer Verbraucher mit dem technischen Potenzial zur Ladesteuerung (vgl. [Stöckl, 2014]) und kann zur Flexibilisierung der Stromnachfrage beitragen.

Die historische Entwicklung der Stromerzeugungskapazitäten und der resultierenden Stromerzeugung ist in Abbildung VII-4 dargestellt. Im Jahr 2015 waren in Deutschland 208 GW Bruttostromerzeugungskapazität installiert. Die installierte Leistung aller PV-Erzeugungsanlagen betrug knapp 40 GW. Windenergie-Anlagen im On- und Offshore-Bereich kamen auf fast 45 GW und wiesen in den drei Jahren zuvor die höchsten jährlichen Zuwächse auf.

Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung ist kontinuierlich gestiegen und erreichte im Jahr 2017 einen Wert von 33,4 %. Die kohlenbasierte Stromerzeugung ist in den vergangenen 5 Jahren um 12,6 % zurückgegangen. Die Stromerzeugung durch Kernenergie hat noch deutlicher um 23,7 % abgenommen. Das Stromimportsaldo (Importe abzüglich Exporte) lag im Jahr 2017 bei -54,0 TWh (Stromexport-Überschuss). Zusammenfassend kann ein deutlicher Trend in Richtung erneuerbare Stromerzeugung festgestellt werden. Von dieser Entwicklung kann bei einem Umstieg auf Elektromobilität auch der Verkehrssektor profitieren.

**Abbildung VII-4: Historische Entwicklung der installierten Brutto-Erzeugungskapazität und der Bruttostromerzeugung in Deutschland**



Quelle: [BMWi, 2018], eigene Darstellung

Die Entwicklungen bei der Stromerzeugung wirken sich auf das Design, den Ausbau und den Betrieb der Übertragungs- und Verteilnetze aus. Der massive Ausbau der erneuerbaren Energien führt zu hohen Zuwächsen der Windenenergieeinspeisung vor allem im Norden und Osten sowie zu stark steigenden, fluktuierend einspeisenden PV-Kapazitäten mit Schwerpunkt im Süden Deutschlands. Dabei verdrängen die erneuerbaren Energien aufgrund der vorrangigen Einspeisung zunehmend konventionelle Kraftwerke aus dem Markt, die häufig in der Nähe zu Verbrauchszentren errichtet wurden. Auch der Kernenergieausstieg führt dazu, dass weitere konventionelle, lastnahe Kapazitäten sukzessive wegfallen. Eine wesentliche Herausforderung für das Übertragungsnetz besteht daher darin, trotz geänderter Randbedingungen einen sicheren Netzbetrieb zu gewährleisten.

Das Verteilnetz ist den letzten Jahrzehnten nach dem Prinzip „Erzeugung folgt Last“ und den damit verbundenen Top-Down-Lastflüssen ausgelegt worden. Derzeit ist das Verteilnetz jedoch mit einer stark steigenden Zahl an dezentralen Stromzeugungsanlagen mit meist geringer Einzelleistung und deren Einbindung in den unterschiedlichen Spannungsebenen konfrontiert. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend verstärken wird. Das Verteilnetz muss sich daher in Richtung möglicher multidirektionaler Lastflüsse zwischen dezentralen Erzeugern, Lasten und Energiespeichern ausrichten [Laskowski, 2011]. Um eine möglichst hohe Nutzung der Erzeugungsleistung der erneuerbaren Energien zu gewährleisten, ist ein Aus-, Um- und Neubau von Stromleitungen, Transformatoren und weiteren Betriebsmitteln auf allen Verteilnetzebenen erforderlich. [dena, 2012]

Durch einen zusätzlichen Ladebedarf von xEV werden sich derzeitige Lastgänge verschieben und die Anforderungen insbesondere an das Verteilnetzes erhöhen (vgl. Kapitel V.4). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt keine detaillierte Betrachtung der Verteilnetze. Eine zukünftige Auslegung von Verteilnetzen unter Berücksichtigung der Elektromobilität wurde zum Beispiel in Studien von [Stöckl, 2014] und [Robinius et al., 2018] behandelt.



### VII.3 Wirtschaftliche und soziodemografische Rahmendaten

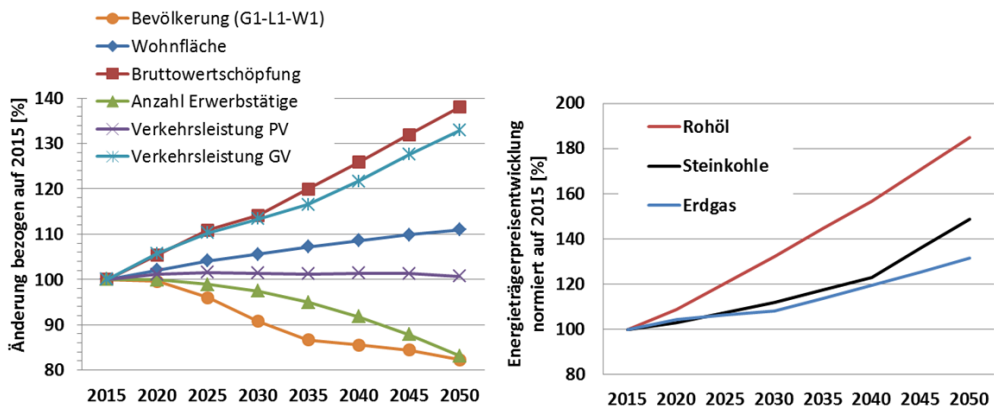
Für die Szenario-Rechnungen sind neben techno-ökonomischen Daten zu Energiewandlungs- und Nutzungstechniken auch Annahmen zu soziodemografischen und wirtschaftlichen Entwicklungen in Deutschland zu treffen. Diese Entwicklungen bestimmen die Nachfragen nach Energiedienstleistungen und werden im Modell in Energienachfragen umgerechnet. In den Szenarien werden diese wirtschaftlichen und sozioökonomischen Trends exogen vorgegeben. Wie in Abbildung VII-1 dargestellt, werden die Endenergienachfragen bestimmt durch

- die Bruttowertschöpfung der Industrieproduktion (Sektor Industrie),
- die beheizte Wohnfläche und die Bevölkerungszahl (Sektor Haushalte),
- die Zahl der Erwerbstätigen (Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) und
- die Transportleistung des Güter- und Personenverkehrs (Sektor Verkehr).

Der angenommene Trend der energienachfragebestimmenden Größen bis zum Jahr 2050 ist in Abbildung VII-5 (links) dargestellt. Die Werte sind dabei auf den Ausgangswert für die Zeitperiode 2015 normiert. Die Trends sind auf Basis der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung aus dem Jahr 2013 berechnet worden [DESTATIS, 2015]. Für die Szenarien wird die Variante 2 der Vorausberechnung „Kontinuität bei stärkerer Zuwanderung“ (Bezeichnung: G1-L1-W1) gewählt. Diese berücksichtigt eine stärkere Zuwanderung bis zum Jahr 2060. Trotz stärkerer Zuwanderung sinkt die Wohnbevölkerung in Deutschland bis zum Jahr 2050 um ca. 8 % im Vergleich zu 2015. Weiterhin wird in dieser Variante eine deutliche Verschiebung der Altersstruktur erwartet. Die Gruppe der 18- bis 65-Jährigen reduziert sich demnach bis 2050 um 20,5 %. Dies wird im Folgenden mit der angepassten Ladevariante „Demografie“ (vgl. Kapitel VI) berücksichtigt und in einer Variation der Ladeprofile untersucht (vgl. Kapitel VII.5). Für die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes (Kennzahl der wirtschaftlichen Leistung in Deutschland) wird eine stetige Steigerung von 1,4 % pro Jahr unterstellt.

Die Nachfrage nach Verkehrsleistungen wird aus den Annahmen zur Entwicklung von Wirtschaft und Bevölkerung durch eine Regressionsanalyse historischer Werte abgeleitet. Demnach wird im Personenverkehr noch bis 2020 von einer leicht steigenden Verkehrsleistung ausgegangen. Nach dem Jahr 2020 wird in dem Szenario unterstellt, dass die Verkehrsleistung bedingt durch den Bevölkerungsrückgang stagniert. Beim Güterverkehr wird angenommen, dass trotz steigender Logistikeffizienz die Verkehrsleistung weiter wächst. Die angenommene Steigerung der Güterverkehrsleistung von 2015 bis 2050 beträgt knapp 33 %. Die unterstellte Wohnfläche nimmt bis 2050 um knapp 11 % zu. Der Grund hierfür ist in der Zunahme der spezifischen Wohnfläche u.a. durch die steigende Zahl von Single-Haushalten zu sehen. Dies überkompensiert den unterstellten Rückgang der Wohnbevölkerung im Szenario. Die angenommene Wirtschaftsentwicklung führt zu einer Steigerung der Bruttowertschöpfung (BWS) um 38 % in der Periode bis 2050. Wegen des unterstellten Bevölkerungsrückgangs und der Verschiebung der Altersstruktur hin zu einer älteren Bevölkerung nimmt die Zahl der Erwerbstätigen bis 2050 um ungefähr 17 % ab.

**Abbildung VII-5: Angenommene Entwicklung der energienachfragebestimmenden Größen und Energieträgerpreise in den Szenarien**



Quelle: eigene Berechnungen

Weiterhin ist für die Energiesystemrechnung eine Annahme der Energieträgerpreise und deren Entwicklung notwendig. Die unterstellte Entwicklung der Energieimportpreise für Erdöl, Erdgas und Kohle als wichtigste Primärenergieträger sind in Abbildung VII-5 (rechts) dargestellt. Die unterstellten Energiepreise steigen für Steinkohle und Erdgas bis zum Jahr 2050 moderat an. Für die Entwicklung der Rohölpreise wird bis zum Jahr 2050 eine deutlich höhere Steigerung von 85 % im Vergleich zu 2015 erwartet. Als Importpreis für die Periode 2015 wird für Rohöl 11,41 €<sub>2000</sub>/GJ, für Erdgas 6,42 €<sub>2000</sub>/GJ und für Steinkohle 2,59 €<sub>2000</sub>/GJ angenommen. Alle Energieträgerpreise sind auf das Jahr 2000 diskontiert (reale Werte) und stellen einen Mittelwert über die Fünf-Jahres-Periode dar. Anzumerken bleibt, dass die Energieträgerpreise bei den in der Analyse unterstellten, sehr ambitionierten Klimaschutzzielen eher nachrangig das Ergebnis beeinflussen. Es müssen sehr viele investitionsintensive Maßnahmen (z. B. Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung, Wärmedämmung außerhalb von Renovierungszyklen im Gebäudebereich) zur Erreichung der hier unterstellten ambitionierten CO<sub>2</sub>-Reduktionsziels ergriffen werden, so dass die Preise der Energieträger bei stringenten Klimaschutzzielen eine eher untergeordnete Rolle spielen.

#### VII.4 Inputdaten der Fahrzeuge

Für die Abbildung der Fahrzeuge im Energiesystemmodell sind die Fahrzeuginvestitionen, fixe und variable Kosten, Energiebedarfe sowie Jahresfahrleistungen als Trend über die Szenario-Perioden zu hinterlegen. In den Kapitel III und IV wurde bereits ausführlich die Schwerpunktbildung der vorliegenden Forschungsarbeit auf den Bereich Pkw und leichte Lkw begründet. Die techno-ökonomische Beschreibung dieser Fahrzeuge und die Abbildung der Ladeenergieprofile werden folgend detailliert beschrieben. Im verwendeten Energiesystemmodell IKARUS ist ein Referenz-Datensatz inklusive zeitlicher Entwicklung für alle abgebildeten Energietechniken hinterlegt. Dies gilt nicht nur für den Verkehrsbereich mit den hinterlegten

Fahrzeugooptionen, sondern auch für die Bereiche Primärenergiegewinnung, Umwandlung, Energietransport und die Endenergiebereiche Industrie, Gewerbe / Handel/ Dienstleistung (GHD) und Haushalte. Auf diesen Datensatz wird für die Szenariorechnungen zurückgegriffen. Eine Beschreibung der hier nicht besprochenen Daten kann den Veröffentlichungen [Martinsen et al., 2010], [Linssen et al., 2012], [Matthes et al., 2013], [Heinrichs & Markewitz, 2015], [Arndt et al., 2016] entnommen werden.

#### **VII.4.1 Energiebedarfe und Fahrzeugkosten**

Das Energiesystemmodell enthält eine Reihe von Datensätzen zur Beschreibung von konventionellen und alternativen Kraftstoffen und Antriebstechniken, auf die im Rahmen der Analyse zurückgegriffen werden kann. Für den hier im Detail betrachteten Bereich des Personenverkehrs mit Pkw und des städtischen Güterverkehrs mit leichten Lkw werden die Daten zu xEV entsprechend den Analysen dieser Arbeit angepasst. Zur Gewährleistung der konsistenten Generierung von techno-ökonomischen Daten unterschiedlicher Antriebskonzepte wird im Rahmen der Analyse auf den Studien [Linssen et al., 2012] und [Arndt et al., 2016] bis zum Jahr 2030 aufgesetzt. Die darin erhobenen Energiebedarfsdaten sind Ergebnis von längsdynamischen Simulationen und ermöglichen dadurch eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Antriebsvarianten. Die Daten zu den Pkw-Antriebsvarianten Benzin, Benzin-HEV, Diesel, Diesel-HEV, CNG, LPG und FECV sind der aktuellen IKARUS-Modelldatenbank entnommen. Die Trendfortschreibung der Technikdaten von 2030 bis 2050 erfolgt in Anlehnung an [Schlesinger et al., 2014].

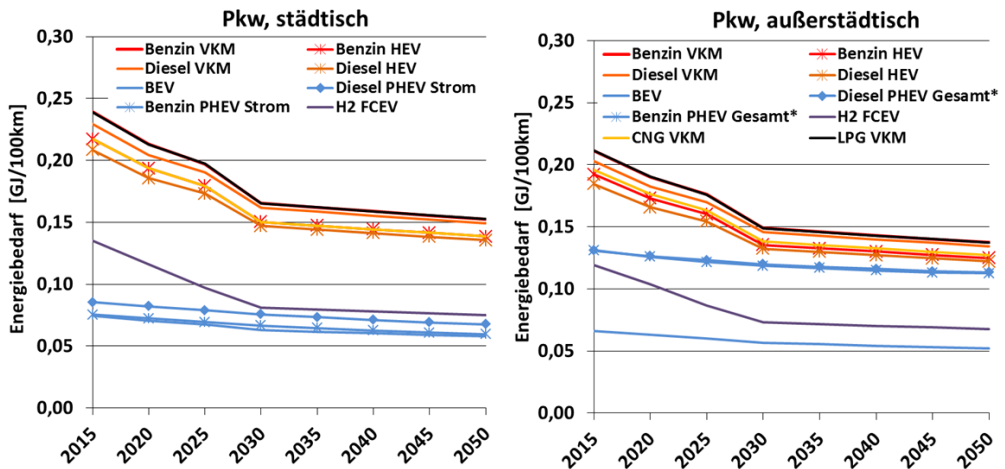
Die in Abbildung VII-6 dargestellten Entwicklungen der spezifischen Energiebedarfe geben den Einsatz im realen Straßenverkehr wieder und sind jeweils für den städtischen und den außerstädtischen Verkehr angegeben. Die Daten können daher nicht mit den Normverbrauchswerten verglichen werden. Das IKARUS-Modell berechnet entsprechend der Aufteilung der Verkehrsleistung auf den städtischen und den außerstädtischen Bereich daraus den Endenergiebedarf der Fahrzeuge.

Alle Antriebsvarianten weisen ein Potenzial für Effizienzsteigerungen aus, die durch Fortschritte bei der Energieeffizienz der Antriebstechnik und der Reduzierung der Fahrwiderstände resultieren. Die Effizienzsteigerungen der konventionellen Antriebe Benzin und Diesel werden dabei wesentlich durch Vorgabe der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte der Neufahrzeugflotten und deren stufenweise Verschärfung nach der EU Richtlinie 510/2011 getrieben. Da sich die Wirkung der Flottengrenzwerte auf die Neufahrzeugverkäufe bezieht, ist der Verbrauchsrückgang im Bestand entsprechend verzögert zu erkennen.

Eine weitere Verbrauchsreduktion bei den Benzin- und Diesel-Pkw wird durch die Antriebsvariante HEV erreicht, welche durch Hybridisierung des Antriebsstrangs eine zusätzliche Erhöhung der Energieeffizienz ermöglicht. Diese Antriebsvarianten weisen jedoch höhere Investitionen als die entsprechenden Pkw-Varianten ohne Hybridisierung auf (vgl. Abbildung VII-7). Für die PHEV-Varianten wird davon ausgegangen, dass diese – bedingt durch die angenommene Reichweite von 50 km – im innerstädtischen Straßenverkehr im CDM-Betrieb genutzt werden können und somit kein Bedarf an zusätzlichen Benzin- oder Diesel-Kraftstoffen anfällt. Der städtische und der außerstädtische Energiebedarf für die PHEV-Varianten können nicht getrennt betrachtet

werden. D. h. bezogen auf die Fahrleistung in außerstädtischen Bereichen muss der Bedarf an Diesel oder Benzin zusätzlich Berücksichtigung finden. Die niedrigen Energiebedarfswerte für die PHEV-Varianten im städtischen Bereich sind dementsprechend zu interpretieren.

**Abbildung VII-6: Angenommene Energiebedarfsdaten der Pkw und deren Trends für den städtischen und den außerstädtischen Verkehr**



\*Gesamtenergiebedarf an Strom und Kraftstoff, städtisch nur Strombedarf

Quelle: [Linssen et al., 2012], [Arndt et al., 2016], [Schlesinger et al., 2014], IKARUS Modelldaten

Für Pkw-Antriebe mit Erdgas (CNG: Compressed Natural Gas) und Autogas als Kraftstoff (LPG: Liquefied Petroleum Gas) werden ebenfalls deutliche Einsparpotenziale unterstellt. Der Einsatz von Biokraftstoffen ist als Beimischung zu fossilen Kraftstoffen abgebildet. Eine detaillierte Beschreibung der Biokraftstoff-Daten kann [Funk & Linssen, 2007] entnommen werden.

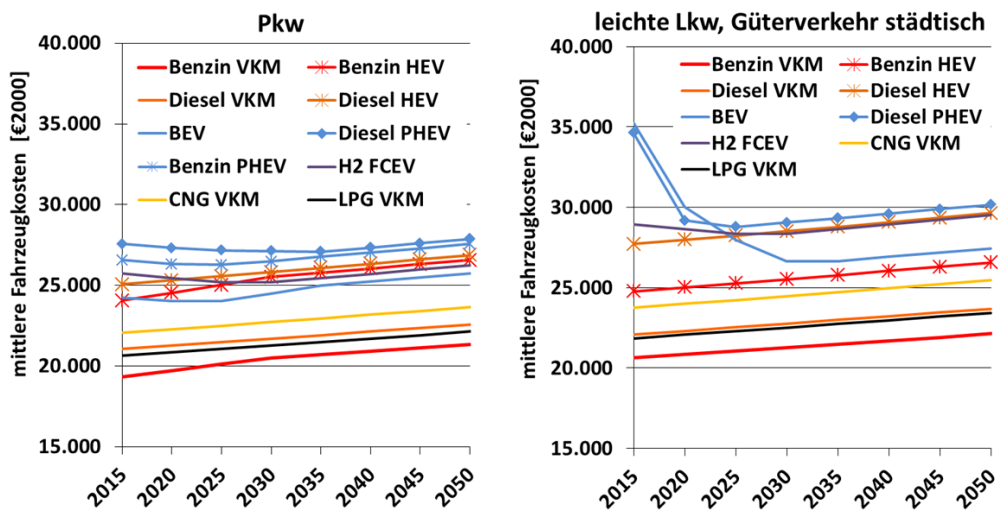
Bedingt durch den derzeitigen frühen Entwicklungsstand bei den FCEV werden zukünftig deutliche Steigerungen bei den Effizienzen unterstellt. Dies deckt sich mit den Trends der Studie von [Grube, 2014]. Die hier nicht gezeigten Entwicklungen für die leichten Lkw im städtischen Güterverkehr können Tabelle XIII-7 im Anhang entnommen werden. Die Energiebedarfswerte für die leichten LKW weisen ähnliche Relationen zwischen den Antriebs- / Kraftstoffvarianten auf wie im Pkw-Bereich. Absolut fallen die Energiebedarfswerte durch die höheren Fahrzeuggewichte und Fahrzyklen mit erhöhten Anforderungen (z. B. häufige Stopps im Lieferverkehr) deutlich höher aus als die der Pkw (vgl. [Arndt et al., 2016]).

Für die Annahmen zu den Pkw-Kosten werden ebenfalls die genannten Datenquellen herangezogen. Die Investitionen für Pkw wurden in den Studien durch eine Baugruppenzerlegung der Fahrzeuge, die Betriebskosten aus einem TCO-Kostenvergleich ermittelt. Die in Abbildung VII-7 genannten Kosten sind auf das Bezugsjahr 2000 diskontiert. Die Kosten enthalten dabei keine Steuern, Abgaben, Vertriebskosten, Rücklagen für Garantie- und Kulanzleistungen oder Ge-

winnmargen, sondern sind im Sinne von Herstellkosten zu interpretieren. Ein Vergleich mit Verkaufspreisen (Tabelle XIII-6 und Tabelle XIII-7, Anhang) ist daher nicht zulässig. Bei den Kosten für BEV- und PHEV-Pkw wird anfänglich von einer Kostendegression durch weiter fallende Batteriepreise ausgegangen. Ab der Periode 2030 kehrt sich der angenommene Trend durch ausgeschöpfte Kostensenkungspotenziale bei den Batterien und steigende elektrische Reichweiten um.

Die hohen Fahrzeugkosten der xEV-Varianten der leichten Lkw resultieren aus den im Vergleich zum Pkw deutlich höheren notwendigen Batteriekapazitäten (vgl. [Arndt et al., 2016] bedingt durch die höheren Fahrzeug- und Nutzlasten. Die Kostendegression der leichten BEV-Lkw für den städtischen Güterverkehr ist bedingt durch die fallenden Batteriepreise bis zum Jahr 2030 deutlich höher. Die niedrigeren Batteriekapazitäten für eine CDM-Reichweite von 50 km resultiert in niedrigeren Batteriekapazitäten bei der PHEV-Variante des leichten Lkw. Die unterstellte Kostendegression der Batterien bei diesen Fahrzeugen fällt dementsprechend geringer aus.

**Abbildung VII-7: Angenommene Kostenentwicklung für Pkw und deren Trends**



Quelle: [Linssen et al., 2012], [Arndt et al., 2016], [Schlesinger et al., 2014], IKARUS Modelldaten

Die Annahmen zu den Jahresfahrleistungen der Pkw und der leichten Nutzfahrzeuge können Tabelle XIII-6 und Tabelle XIII-7 im Anhang entnommen werden. Die Fahrleistung der Pkw und der leichten Lkw wurde entsprechend der in Kapitel V.2.1 vorgestellten Auswertung zu den Fahrleistungsanteilen angepasst. Dabei schließt das BEV-Fahrzeug bedingt durch steigende Reichweiten fast zum Benzin-Fahrzeug auf. Für die PKW mit Diesel, CNG, LPG und PHEV wird im Vergleich zu Benzinern von höheren Fahrleistungen ausgegangen.

Die hier vorgestellten Daten werden in allen Szenario-Varianten nicht verändert und bilden die Grundlage für die Optimierungsrechnungen mit Schwerpunkt Elektrifizierung von Pkw und leichten Lkw bis zum Jahr 2050. Eine Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs ist nicht in den

Analysen betrachtet worden. Für diese Option sei z. B. auf die Studie [Wietschel et al., 2017] verwiesen. Die bereits angesprochenen Optionen der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen basierend auf Biomasse oder elektrischer Energie via Wasser-Elektrolyse sind als Option im IKARUS-Modell hinterlegt.

#### **VII.4.2 Modellierung der Ladeenergienachfrage im Energiesystemmodell**

Der Verlauf der Ladeenergienachfrage im Tages- und Jahresgang beeinflusst Stromerzeugung, -verteilung und -transport, da sie zusätzlich zur Stromnachfrage der anderen Endverbrauchssektoren bereit gestellt werden muss. Wie bereits in Kapitel V und VI gezeigt, besteht eine sehr hohe Korrelation des Verlaufes insbesondere zu den elektrischen Nachfrageprofilen der Haushalte. Die entwickelten Modelle zur Abbildung der Ladeenergienachfrage der Nutzergesamtheit (siehe Kapitel V) und die Variation der Zusammensetzung von nutzungshomogenen Gruppen (Kapitel VI) bilden die Grundlage zur Abbildung der Nachfrageprofile im Energiesystemmodell.

Die Tagesprofile der Ladeleistungsnachfragen eines xEV-Bestands werden durch die Anteile der Ladeenergie in den verfügbaren IKARUS-Zeitscheiben im Energiesystemmodell aufgeteilt. Als Tagesgänge werden

- das ungesteuerte Heimladen am nächtlichen Stellplatz der Gesamtheit aller Nutzer,
- die Variante „Demografie“ für das ungesteuerte Heimladen (Berücksichtigung einer veränderten Altersstruktur der Nutzer) sowie
- die Variante „Offpeak“ mit gesteuertem Heimladen am nächtlichen Stellplatz zwischen 22:00 und 6:00 Uhr für die Gesamtheit aller Nutzer

jeweils für BEV bzw. PHEV (vgl. Abbildung V-14 bzw. Abbildung XIII-9) abgebildet.

Die Tagesprofile der Ladeenergienachfrage für die beiden Wochentagsaggregate werden entsprechend den Zeitscheiben des verwendeten Energiesystemmodells zugeordnet. Das IKARUS-Modell erlaubt eine Aufteilung der Endenergienachfragen Strom und Wärme in die zwei Zeitscheiben Tag und Nacht für jeweils drei Jahresperioden (Sommer, Übergang und Winter). Die Beschreibung der Zeitperioden kann der folgenden Tabelle VII-1 entnommen werden. Die Auflösung der Nachfragen ist damit sehr eingeschränkt. Das bestehende Modell wurde dennoch für die Analyse gewählt, da es eine Quantifizierung von Effekten in allen Sektoren erlaubt und nur so der Einfluss der Elektromobilität im gesamten Energiesystem erfasst werden kann. Gleichzeitig soll geprüft werden, ob auch mit Hilfe von Modellen mit geringer zeitlicher Auflösung der Effekt von geänderten Ladeenergieprofilen untersucht werden kann.

Die Tagesganglinien werden für die jeweiligen Zeitscheiben durch die vorgestellten Wochentagsaggregate hochgerechnet. Für das Ladeverhalten an den Tagen Montag bis Freitag wird das Wochentagsaggregat Dienstag bis Donnerstag unterstellt. Zusammen mit dem Tagesprofil am Wochenende wird die Verteilung der Ladeenergie in einer ganzen Woche berechnet. Diese werden dann für die jeweilige Periode mit der angegebenen Stundenzahl auf die Jahresaufteilung des Energiebedarfs der xEV hochgerechnet. Eine Berücksichtigung jahreszeitlicher Änderungen der Tagesganglinien erfolgt nicht, da die Stichprobengröße der MiD 2008 für eine

belastbare Bildung von Nutzerprofilen für verschiedene Jahresperioden nicht ausreicht. Für diese Aufteilung ist eine repräsentative Verteilung der Nutzermerkmale nicht mehr gewährleistet. Der erhöhte Energiebedarf für die Klimatisierung der Fahrzeuge im Sommer und die Beheizung im Winter ist in den Energiebedarfsdaten (vgl. Abbildung VII-6) bereits berücksichtigt.

Die resultierenden Aufteilungen der Ladeenergie in den Zeitscheiben je nach Ladevariante sind für BEV- und PHEV-Pkw in Tabelle VII-1 zusammengefasst. Die Aufteilung der Ladeenergienachfragen in die Zeitscheiben des IKARUS-Modells ist für gewerbliche Pkw und leichte Lkw (vgl. Abbildung VI-16) nicht signifikant unterschiedlich verglichen mit der Aufteilung der privaten Pkw. Die Verteilung der Ladeenergienachfrage wird dementsprechend ebenfalls mit den Anteilen der Tabelle VII-1 angenommen.

**Tabelle VII-1: Modellierung der Tagesprofile der Ladeenergienachfrage für die Varianten**

Bezeichnung	Dauer [h]	Zeitperiode	Anteile der Ladeenergie für das Heimladen der xEV verteilt auf die Zeitscheiben [%]					
			Ladevariante ungesteuertes Heimladen		Ladevariante Demografie		Ladevariante Offpeak-Laden	
			BEV <sup>1</sup>	PHEV <sup>2</sup>	BEV <sup>1</sup>	PHEV <sup>2</sup>	BEV <sup>1</sup>	PHEV <sup>2</sup>
Sommertag	1472	jeweils 6:00 bis 21:59 im Juni, Juli, August	20,2	22,2	20,6	22,4	0,1	0,1
Sommer- nacht	736	jeweils 22:00 bis 05:59 im Juni, Juli, August	5,1	3,1	4,6	2,8	25,1	25,1
Wintertag	1440	jeweils 6:00 bis 21:59 im Dezember, Januar, Februar	19,7	21,6	20,2	21,9	0,1	0,1
Winternacht	720	jeweils 22:00 bis 05:59 im Dezember, Januar, Februar	4,9	3,0	4,5	2,7	24,6	24,6
Übergangs- tag	2928	jeweils 6:00 bis 21:59 im März, April, Mai, September, Oktober, November	40,1	44,0	41,0	44,6	0,1	0,1
Übergangs- nacht	1464	jeweils 22:00 bis 05:59 im März, April, Mai, September, Oktober, November	10,0	6,1	9,1	5,6	50,0	50,0

<sup>1</sup> Angenommene Ladeleistung 3,3 kW, Strombedarf 17,5 kWh/100km, Reichweite 120 km

<sup>2</sup> Angenommene Ladeleistung 3,3 kW, Strombedarf 19,9 kWh/100km, CDM-Reichweite 50 km

Quelle: eigene Berechnung

Bedingt durch die unterschiedlichen Energiebedarfe und die möglichen elektrischen Tagesfahrstrecken ergibt sich eine leicht unterschiedliche Aufteilung des Strombedarfs für PHEV und BEV für das ungesteuerte Heimladen. Für die angenommene Offpeak-Heimladung ergibt sich keine unterschiedliche Aufteilung der Lademengen in den Zeitscheiben, da die Ladevorgänge gezielt in die Nacht-Periode verschoben werden.

Die Berücksichtigung geänderter Altersstrukturen der Nutzer im Szenario „Demografie“ mit Auswirkungen auf das Tagesprofil führt zu einer nur leicht veränderten Aufteilung. Durch die

Reduktion des Tagesprofils auf nur zwei Perioden gehen wesentliche Informationen zum Tagesverlauf verloren. Dies ist dadurch begründet, dass sich die Verschiebungen vor allem in den Mittags- und den frühen Abendstunden bis 22:020 Uhr ergeben. Die Verschiebung zwischen den zwei Zeitscheiben Tag und Nacht bleibt gering. Eine Aufteilung in mehr als zwei Zeitscheiben – insbesondere die Unterscheidung in Mittag- und Abendperiode – würde deutlich unterschiedliche Verteilungen des Ladeenergieprofils zwischen der Grundgesamtheit und der angepassten Nutzerauswahl im Demografie-Szenario zeigen. Es ist davon auszugehen, dass die Erhöhung der zeitliche Auflösung des angewendeten Energiesystemmodells eine Erhöhung der Aussagekraft der gebildeten Tagesganglinien ermöglichen würde. Die dazu notwendigen strukturellen Anpassungen des Modells und der Daten in Richtung höherer zeitlicher Auflösung waren im Rahmen der Forschungsarbeit nicht möglich. Die Limitierung der Modellaussagen zum zeitlichen Verlauf von Nachfragen ist Bestandteil der Diskussion in Kapitel VII.7.

### VII.5 Szenario-Varianten

Der Schwerpunkt der durchgeführten Energiesystemanalysen liegt in der Quantifizierung des Beitrags der Elektromobilität (Pkw, leichte Lkw) im Rahmen von Klimaschutz- und Effizienzstrategien. In den Szenarien werden verschiedene Ziele bezüglich Klimagasminderung, Primär- und Endenergieeinsparung sowie Anteile der erneuerbaren Energien in den verschiedenen Sektoren kombiniert. Die Energiesystemrechnungen liefern die jeweiligen Emissions- und Energiebilanzen und mit Blick auf den Verkehr resultierende Fahrzeugbestände bei einer kostenoptimalen Lösung für das Gesamtsystem. Es werden keine Anteile an bestimmten Antriebsarten im Bereich der Pkws und der leichten Lkw exogen angenommen. Alle vorgestellten Szenario-Varianten haben einen Untersuchungszeitraum bis 2050. Folgende Haupt-Szenarien werden untersucht:

- „Energiewende“: -80 % CO<sub>2</sub>-Reduktion für das gesamte deutsche Energiesystem, weitere Ziele der Energiewende laut Tabelle VII-2; Berücksichtigung des Endenergie-Reduktionsziels für den Verkehrsbereich
- „Verkehrsentlastung“: wie Szenario „Energiewende“, aber kein Endenergie-Reduktionsziel für den Verkehrsbereich
- „Sektorenziel“: wie Energiewende; zusätzliche Berücksichtigung eines sektoralen CO<sub>2</sub>-Reduktionsziels für den Verkehrsbereich: bis 2030 eine CO<sub>2</sub>-Reduktion um -40 % im Verkehr laut Klimaschutzplan des Umweltbundesministeriums [BMU, 2016], nach 2030 eine sektorale CO<sub>2</sub>-Reduktion im Verkehr entsprechend den Gesamtreduktionszielen nach Szenario Energiewende

Die Szenario-Systematik ist in Tabelle VII-2 nochmals verdeutlicht. Die Szenariorechnungen setzen dabei auf der Veröffentlichung [H. U. Heinrichs et al., 2017] auf. Alle Szenarien sind geprägt durch einen stark steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung und am Endenergiebedarf sowie durch eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz. Für die Reduktion des Primärenergiebedarfs wird ein Ziel für das Gesamtsystem und ein zusätzliches Ziel für den Gebäudebereich in allen Szenarien berücksichtigt. Das Reduktionsziel für das Gesamtsystem bezieht sich nur auf den Anteil der fossile Primärenergien ohne erneuerbare



Energien und ohne Kernenergie. Weiterhin wird der vereinbarte Plan zum Kernenergieausstieg nach dem im Jahr 2011 novellierten Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) eingehalten. Der Einsatz von CO<sub>2</sub>-Abscheidetechniken in Kraftwerken wird in Anlehnung an das Gesetz zur Demonstration und Anwendung von Technologien zur Abscheidung, zum Transport und zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid vom 23. August 2012 im Szenario-Zeitraum nicht ermöglicht.

**Tabelle VII-2: Angenommene Zielsetzungen in den Hauptszenarien**

	Bezugs-jahr	2014	2020	2030	2040	2050	Haupt-szenarien		
CO <sub>2</sub> -Emissionen im Gesamtsystem	1990	-27 %	-40 %	-55 %	-70%	-80 %	Verkehrsentlastung	Energiewende	Sektorenziel
Einsparung fossile Primärenergieträger	2008	-8,7 %	→			-50 %			
Brutto-Strombedarf	2008	-4,6 %	-10 %	→		-25 %			
Anteil der EE am Brutto-Strombedarf		27,4 %	35%	50%	65%	80 %			
Anteil der EE am Endenergiebedarf		13,5 %	18%	30%	45%	60 %			
Primärenergie-Einsparung im Gebäudebereich		-14,8 %	→			-80 %			
Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehr	2005	1.2 %	→			-40 %			
CO <sub>2</sub> -Emissionen im Verkehr, sektoral	1990	-2,4 %	→	-40 %	→	-80 %			

Source: nach [BMWi, 2015]; [BMU, 2016], [H. U. Heinrichs et al., 2017] und eigene Annahmen; Zwischenziele interpoliert

Entgegen dem Energiewendekonzept werden keine Bestände für BEV- und PHEV-Pkw sowie leichte elektrifizierte Lkw für den Güternahverkehr vorgegeben. Die Bestände sind Ergebnis der Kosten-Optimierung im Gesamtsystem unter Berücksichtigung der angenommenen Ziele nach Tabelle VII-2.

Aufbauend auf dem Szenario Energiewende wird eine Variation des Ladeenergieprofils vorgenommen. Dabei werden die Ladeprofile des ungesteuerten Heimladens und des Offpeak-Heimladens jeweils für die Grundgesamtheit untersucht. Das Ladeprofil Demografie beinhaltet das ungesteuerte Heimladen für eine angepasste Nutzergesamtheit mit geänderter Altersstruktur ab (vgl. Kapitel VI).

In allen Szenarien wird unterstellt, dass der gesamte Ladeenergiebedarf über die nächtliche Ladung an der Wohnung bei Pkws oder am Depot bei leichten Lkws gedeckt wird. Diese Vereinfachung und deren Auswirkungen sind in Kapitel V.1 bereits beschrieben worden. Für die Hauptszenarien nach Tabelle VII-2 wird jeweils die Heimladung der Fahrzeuge nach der Grundgesamtheit abgebildet. Wie bereits in Kapitel V.3 dargestellt, bedingt das ungesteuerte Heimladen der Fahrzeuge hohe Anforderungen an Stromerzeugung, -transport und -verteilung. Die Ladelastpeaks fallen dabei in Zeiten der Stromnachfragespitzen. Die unterstellten Heimlade-

Strategien stellen somit hohe Anforderungen an den Kraftwerkspark und dessen Optimierung ist somit als Worst-Case-Rechnung anzusehen. Durch angepasste Ladestrategien können die Stromerzeugung, der Transport und die Verteilung deutlich optimiert und dementsprechend können weitere Emissionen und Kosten reduziert werden.

**Tabelle VII-3: Szenarien für die hinterlegten Ladeprofile aufbauend auf dem Szenario Energiewende**

Szenario-Kürzel	Variante des Tagesprofils bezüglich Ladeenergiebedarf
Energiewende Verkehrsentlastung Sektorenziel	Ungesteuertes Heimladen der Grundgesamtheit (vgl. Kapitel V.3)
Energiewende&Offpeak	Offpeak-Heimladen der Grundgesamtheit (vgl. Kapitel V.3)
Energiewende&Demografie	Ungesteuertes Heimladen mit angepasster Altersstruktur der Nutzer nach dem Demografie-Szenario (vgl. Kapitel VI.4.3)

Quelle: eigene Annahmen

Mit den zusätzlich definierten Varianten „Energiewende&Offpeak“ bzw. „Energiewende&Demografie“ können die Auswirkungen einer geänderten Ladestrategie bzw. einer geänderten Nutzerzusammensetzung analysiert werden.

Ziel der Optimierungsrechnungen ist ein Vergleich der Option „Elektromobilität“ unter verschiedenen Zielregimen und mit unterschiedlichen Ladevarianten. Der sektorübergreifende Vergleich erfolgt dabei mit weiteren Technikmaßnahmen in allen Bereichen des Energiesystems (z. B. Gebäudedämmung in Wohngebäuden oder erneuerbare Energien zur Stromerzeugung).

### VII.6 Auswertung der Szenario-Rechnungen zum Energiesystem

Zusammen mit den vorgestellten Rahmendaten, den techno-ökonomischen Input-Daten der Fahrzeuge, den adaptierten Ladeenergieprofilen der xEV und den Zielregimen in den Szenarien wurden die Optimierungsrechnungen mit dem IKARUS-Modell durchgeführt. Die bereits beschriebenen Ziele der jeweiligen Szenarien (vgl. Tabelle VII-2 und Tabelle VII-3) und weitere energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen sind durch entsprechende Gleichungen berücksichtigt. Der Vergleich der Energie-, Emissions- und Kostenbilanzen zeigt auf, welchen Beitrag die Elektromobilität leisten kann und welche angenommenen Zielregime einen signifikanten Einfluss auf die xEV-Bestände haben. Darauf aufbauend wird untersucht, ob unterschiedliche Ladestrategien einen Einfluss auf die Ausgestaltung des gesamten Energiesystems haben.

Mit dem Energiesystemmodell IKARUS werden jeweils für Fünf-Jahres-Perioden beginnend für die Fünf-Jahres-Perioden bis 2050 alle Energieströme berechnet und die Kosten sowie Emissionen des Gesamtsystems bilanziert. Aus Gründen der verbesserten Übersicht des nachfolgenden Ergebnisvergleichs werden nur die Ergebnisse für die Perioden 2030, 2040 und 2050 gezeigt. Die Ergebnisse für alle Perioden und alle Hauptszenarien und Ladevarianten können den Tabellenwerken im Anhang (Kapitel XIII.6) entnommen werden.

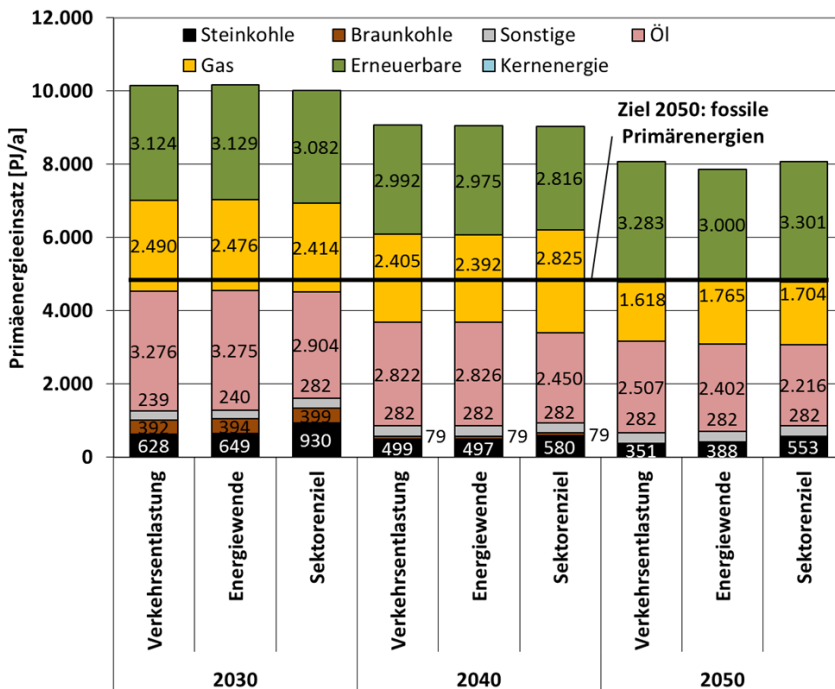
### VII.6.1 Vergleich der Hauptszenarien

Nachfolgend werden die errechneten Primärenergiebilanzen des Gesamtsystems, das Endenergeträger-Portfolio für den Verkehr, die berechneten Fahrzeugbestände des Straßenverkehrs an Pkw und leichten Lkw, die Bilanz der CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Systemkosten für die Hauptszenarien „Energiewende“, „Verkehrsentlastung“ und „Sektorenziel“ ausgewertet. In den Hauptszenarien ist das Ladebedarfsprofil des ungesteuerten Heimladens am nächtlichen Stellplatz der Grundgesamtheit aller Nutzer hinterlegt (siehe Tabelle VII-3).

#### VII.6.1.1 Primärenergie

Die zeitliche Entwicklung der Primärenergieträgerbilanzen und deren Vergleich zwischen den drei gewählten Szenarien sind in Abbildung VII-8 dargestellt. Als Primärenergieträger wird neben den Importen von Kohle, Erdöl und Erdgas auch die heimische Gewinnung fossiler und erneuerbarer Primärenergieträger bilanziert.

**Abbildung VII-8: Entwicklung der Primärenergieträgerbilanzen in den Hauptszenarien „Energiewende“, „Verkehrsentlastung“ und „Sektorenziel“ für die Perioden 2020, 2030, 2040 und 2050 in Deutschland**



Quelle: eigene Auswertung

Trotz zum größten Teil steigender bzw. stagnierender Nachfragen nach Energiedienstleistungen werden die vorgegebenen Zielwerte zur Primärenergieeinsparung von -50 % bis zum Jahr 2050 (Bezugsjahr 2008) erreicht. Im Szenario „Energiewende“ wird der Zielwert der Primärenergie-

einsparung sogar um knapp 3 % unterschritten. Dieser Effekt resultiert aus dem sektoralen Verkehrsziel mit einer Reduktion um -80 % und den gewählten Technikooptionen. Die Einsparungen an Primärenergie finden maßgeblich in den Umwandlungsbereichen durch Steigerung der Umwandlungseffizienz statt. Der Kernenergieausstieg bis 2022 wird wie vorgegeben eingehalten. Der geforderte Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergiebedarf von 60 % resultiert auch in einem deutlich in Richtung erneuerbare Energien verschobenen Primärenergie-Portfolio. Zu den sonstigen Energieträgern zählen Müll und Biomasse. Ihr Einsatz bleibt in den Szenarien annähernd konstant.

Der Bedarf an Erdgas in der Stromerzeugung geht in allen Szenarien trotz eines Mehreinsatzes an dynamischen Erdgaskraftwerken deutlich zurück. Die Primärenergie-Einsparungen beim Erdgas sind maßgeblich auf den Gebäudebereich zurückzuführen. Diese sind geprägt durch die unterstellte Verdopplung der energetischen Sanierungsrate des Gebäudebestands auf 2 % pro Jahr entsprechend den Zielen des Energiewende-Konzeptes [BMW, 2015].

Bedingt durch die unterstellten ambitionierten Ziele zur CO<sub>2</sub>-Reduktion wird in allen Szenarien ein deutlicher Rückgang der Primärenergienachfrage nach Steinkohle sowie Braunkohle errechnet. Der Anteil der Kohlen am Primärenergieeinsatz fällt in allen Szenarien auf unter 7 % bezogen auf den gesamten Primärenergiebedarf in der Periode 2050. In der Stromerzeugung findet ab 2040 keine Kohleverstromung mehr statt. Bedingt durch das sektorale CO<sub>2</sub>-Vermeidungsziel im Verkehrsbereich des Szenarios „Sektorenziel“ und die höheren Einsparungen in diesem Bereich wird ein Mehreinsatz von fossilen Energieträgern im Industriebereich beobachtet. Dieser Zusammenhang zeigt den Einfluss der sektoralen Verflechtung und das enge Zusammenspiel von Zielen für das Energiesystem auf. Dieses Zielregime gilt es auf Wechselwirkungen hin zu analysieren.

Der Primärenergiebedarf an Mineralöl reduziert sich von 2015 bis 2050 um ca. 39 % für das Szenario „Verkehrsentslastung“ bzw. um knapp 46 % für das Szenario „Sektorenziel“. Das gesetzte Ziel der Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehr (-40 %, Szenario Energiewende) wird durch Primärenergiereduktion im Szenario mit sektoralem CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel übertroffen. Der Mineralöl-Anteil am gesamten Primärenergiebedarf sinkt bedingt durch die deutlichen Effizienzsteigerungen im Verkehr und den Einsatz von xEV bei Pkw und leichten Lkw in allen Sektoren auf 27,4 % bis 31,0 % in allen Szenarien ab.

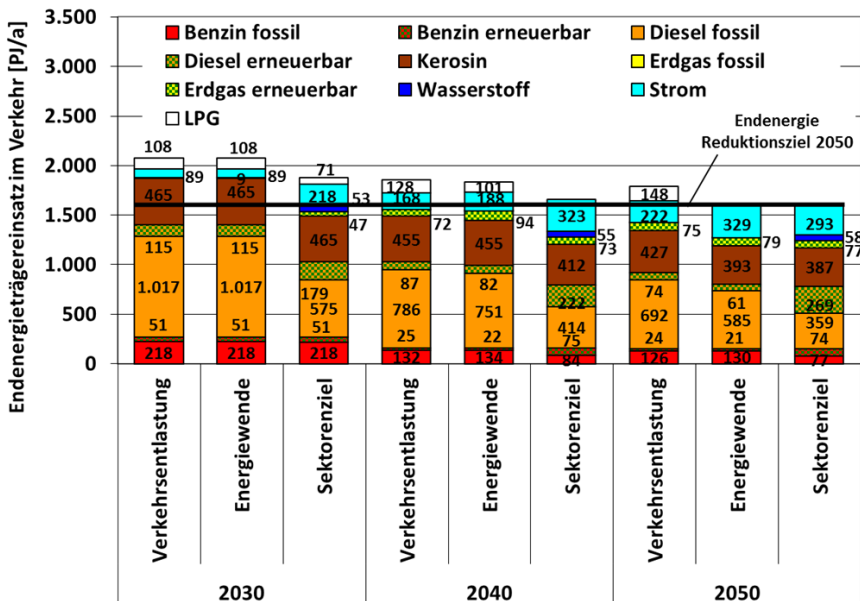
#### *VII.6.1.2 Endenergieträger im Verkehr*

Die Ergebnisse der Szenario-Rechnungen der Endenergieträgerbilanzen des Verkehrsbereichs sind in Abbildung VII-9 für die Hauptszenarien für die Zeitperioden 2030, 2040 und 2050 dargestellt. Der Gesamtbedarf und das Portfolio der Endenergieträger im Verkehr unterscheiden sich im Jahr 2050 deutlich in den drei Szenarien. Das Szenario „Verkehrsentslastung“ ermöglicht durch das Gesamtziel der CO<sub>2</sub>-Einsparung in allen Bereichen einen höheren Einsatz von fossilen Kraftstoffen im Verkehrsbereich. Dies bedeutet, dass die Reduktionsmaßnahmen in den anderen Sektoren kosteneffizienter sind als im Verkehrssektor. Der Anteil der fossilen Kraftstoffe am Gesamtbedarf des Verkehrs für das Szenario „Verkehrsentslastung“ beläuft sich im Jahr 2050 auf 80,3 %. Im Szenario „Energiewende“ beträgt der fossile Anteil 74,3 % bzw. im Szenario „Sektorenziel“ 74,3 %.

renziell“ 55,4 %. Der fossile Anteil der Stromerzeugung ist bei dieser Bilanzierung berücksichtigt. Weiterhin ist ein Wechsel zu LPG und CNG im Szenario „Verkehrsentlastung“ erkennbar. Insgesamt ist der Endenergieeinsatz in diesem Szenario um ca. 11 % höher im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien im Jahr 2050. Das gesetzte Ziel der Endenergie-Einsparung führt zu einer deutlichen Effizienzsteigerung (vollständiger Wechsel zu HEV-Antrieben bei den Pkw und Lkw) und einem teilweisen Umstieg auf xEV. Bei allen Szenarien wird ein deutlicher Rückgang beim Bedarf an Benzin und insbesondere an Diesel errechnet. Dieser Trend wird durch steigende Effizienzen bei den Fahrzeugen und auch durch einen Wechsel zu CO<sub>2</sub>-armen Kraftstoffen erreicht.

Der Strombedarf des gesamten Verkehrs (inklusive Personen- und Güterverkehr auf der Schiene) erhöht sich von 2015 bis 2050 um den Faktor 4,1 auf ca. 62 TWh im Szenario „Verkehrsentlastung“ bzw. um den Faktor 6,2 auf ca. 92 TWh im Szenario „Energiewende“. Der Anteil der xEV (Pkw und leichte Lkw) am verkehrsbedingten Stromverbrauch liegt in 2050 bei 75,1 % (Verkehrsentlastung) bzw. 84,5 % (Energiewende). Der Vergleich der xEV-Strombedarfe zwischen diesen beiden Szenarien zeigt deutlich den Einfluss des Einsparziels bezüglich Endenergie im Verkehr auf den kostenoptimalen Einsatz von xEV.

**Abbildung VII-9: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Personen- und Güterverkehr für die Szenarien und Perioden 2030, 2040 und 2050 in Deutschland**



Quelle: eigene Auswertung

Das Endenergeträgerportfolio für das Szenario „Sektorenziel“ weist die höchsten Anteile an erneuerbaren Kraftstoffen aus. Im Jahr 2050 betragen diese ca. 44,6 % des gesamten Energiebedarfs im Verkehr. Diese werden insbesondere im Schwerlastverkehr als Beimischung zu den

fossilen Kraftstoffen Benzin, Diesel und Erdgas genutzt. Dazu gehören auch strombasierte Kraftstoffe mit Elektrolyse und den notwendigen Umwandelungsschritten. Zur weiteren Detaillierung der Thematik sei an dieser Stelle auf [Schindler, 1997] und [Götz et al., 2016] verwiesen. Die strombasierten Kraftstoffe haben im Szenario nur einen geringen Gesamtanteil von 2 % an den gesamten erneuerbaren Kraftstoffen. Dies ist bedingt durch die geringe Kosteneffizienz als CO<sub>2</sub>-Reduktionsoption. Zusätzlich werden in diesem Szenario auch ca. 0,4 Mio. t gasförmiger, komprimierter Wasserstoff in Brennstoffzellen-Fahrzeugen genutzt. Diese Kraftstoff-Option ist sowohl bei Berücksichtigung eines CO<sub>2</sub>-Reduktionsziels für das Gesamtsystem (Verkehrsentlastung) als auch beim Endenergie-Reduktionsziel (Energiewende) im Verkehr unter den getroffenen Annahmen nicht Bestandteil der kostenoptimalen Lösung.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die betrachteten Szenarien eine deutliche Verschiebung der Endenergeträgerstrukturen bis zum Jahr 2050 zeigen. Diese wird nicht nur durch die angenommenen Kosten- und Effizienzen der Fahrzeuge bestimmt, sondern auch durch die unterstellten Ziele im Gesamt- und Verkehrssystem. Als deutlich fördernd für den Einsatz von Elektrofahrzeugen stellt sich das Endenergie-Reduktionsziel im Verkehr heraus.

Eine sektorales CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel (Sektorenziel) stellt die höchsten Anforderungen an die Auswahl an passenden Fahrzeugtechniken und Kraftstoffen. Es müssen dabei alle Effizienzpotenziale der Fahrzeuge in allen Bereichen Luft, Wasser, Schiene und Straße ausgeschöpft und additiv CO<sub>2</sub>-neutrale Kraftstoffe auf Basis von Biomasse und Strom genutzt werden. Dies zeigt, dass zusätzlich zur Elektromobilität bei Pkw und leichten Lkw auch deutliche Verbesserungen beim Langstrecken-Güterverkehr auf der Straße und im Flugverkehr erforderlich sind. Diese Potenziale gilt es für ambitionierte Klimaschutzziele im Verkehr zu erschließen.

#### *VII.6.1.3 Bestandsentwicklung*

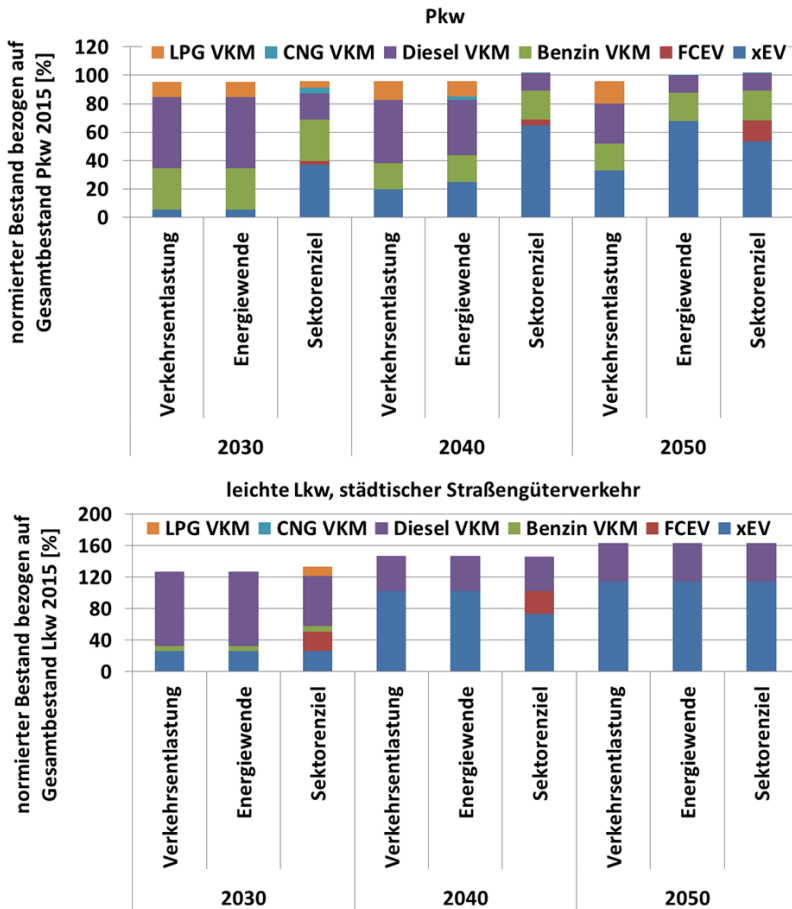
Die drei Hauptszenarien mit ihren verschiedenen Zielregimen werden weiter hinsichtlich des errechneten Bestands an Pkw und leichten Lkw (städtischer Güterverkehr) analysiert. Die Zusammensetzung des Bestandes wird dabei durch die Gesamtsystemoptimierung bestimmt. Es erfolgt keine Vorgabe von Anteilen bestimmter Antriebskonzepte. Wie bereits erwähnt, ist das Ziel des Energiekonzeptes von 1 bzw. 6 Mio. xEV in 2020 bzw. 2030 nicht hinterlegt.

Die folgende Abbildung VII-10 zeigt den Vergleich der normierten Bestände an Pkw und leichten Lkw in den jeweiligen Szenarien für die Perioden 2030, 2040 und 2050. Die Bestände sind dabei normiert auf den Ausgangsbestand in der Periode 2015 (Mittelwert innerhalb der Periode von 2013 bis 2017) von 44,5 Mio. Pkw und 2,2 Mio. leichten Lkw (< 3,5 t zGG). Bei den Pkw sind nur leichte Verschiebungen in der zeitlichen Entwicklung der absoluten Bestandszahlen zu erkennen. Dies ist bedingt durch die ab dem Jahr 2020 stagnierenden Verkehrsleistungen im Personenverkehr (siehe Abbildung VII-5). Die absoluten Bestände der einzelnen Szenarien variieren bedingt durch die gewählte Bestandszusammensetzung und die damit korrespondierenden Jahresfahrleistungen (siehe Tabelle XIII-6).

Die Szenarien „Verkehrsentlastung“ und „Energiewende“ weisen bis zur Periode 2030 einen deutlichen Trend von ca. +26 % in Richtung Diesel-Pkw auf. Die Wahl der Diesel-Pkw ist motiviert durch die ambitionierten CO<sub>2</sub>-Reduktionen für das Gesamtsystem. Neben den

Dieselfahrzeugen werden auch Pkw mit Flüssiggas und Erdgas als Option gewählt. Das Szenario „Sektorenziel“ hingegen weist schon im Jahr 2030 eine starke Verlagerung des Pkw-Verkehrs in Richtung xEV auf.

**Abbildung VII-10: Entwicklung des normierten Bestands an Pkw und leichten Lkw in den Hauptszenarien bis zum Jahr 2050, Deutschland**



Quelle: eigene Auswertung

Im Jahr 2050 erreicht der Bestandsanteil an xEV den höchsten Anteil von 67,3 % im Szenario „Energiewende“ mit der festgelegten Endenergieeinsparung im Verkehr. Für das Szenario mit sektoralem CO<sub>2</sub>-Ziel für den Verkehr wird ein xEV-Bestandsanteil von 52,8 % errechnet. Bei diesem Szenario werden zusätzlich 6,3 Mio. Brennstoffzellen-Pkw eingesetzt. Im Szenario „Verkehrsentlastung“ mit CO<sub>2</sub>-Ziel für das Gesamtsystem werden noch zu einem größeren Teil (65,5 %) VKM-Fahrzeuge eingesetzt. Der Bestand an xEV wird in allen Szenarien durch die Diesel-PHEV dominiert, was durch die Kostenrelationen zwischen den Antriebsvarianten BEV, PHEV-Benzin und PHEV-Diesel und den unterstellten Jahrfahrleistungen zu begründen ist. Der

PHEV-Diesel stellt sich bei den getroffenen Annahmen innerhalb der Optimierungsrechnungen als die günstigste Option der xEV-Optionen zur Effizienzsteigerung und CO<sub>2</sub>-Reduktion dar. Als Anmerkung sei hier angefügt, dass die Bilanzierung von Schadstoff-Emissionen wie Stickoxide oder Feinstaub nicht Bestandteil der Untersuchung ist, aber die zukünftige Auswahl an Antriebstechniken deutlich beeinflussen kann (vgl. [Muncrief, 2016]).

Für die Bestandsentwicklung der leichten Lkw im städtischen Güterverkehr zeigt sich ein anderes Bild. Die absoluten Bestände steigen bedingt durch den unterstellten Trend der deutlichen Steigerung der Güterverkehrsleistung um den Faktor 1,6 von der Periode 2015 auf 2050 an. Die Dominanz der Lkw mit Dieselmotoren bis 2030 wird in allen drei Szenarien durch die Dominanz der xEV abgelöst. Die Optimierungsergebnisse zeigen für das Jahr 2050 annähernd gleiche Bestandsanteile. Bei den xEV-Varianten dominiert ebenfalls der PHEV mit Dieselmotor. Die Auswirkungen des myopischen Modellansatzes werden für den Fall der Brennstoffzellen-Lkw deutlich. Nach einem anfänglichen Aufbau eines Bestands an Brennstoffzellen-Fahrzeugen werden diese in allen drei Zielregimen der Szenarien durch xEV abgelöst. Die Kosteneffizienz der Technik ergibt sich aus den techno-ökonomischen Annahmen (siehe Tabelle XIII-7) und dem Zusammenspiel von CO<sub>2</sub>-Reduktions- und Energieeinsparpotenzialen.

Festzuhalten bleibt, dass unter den getroffenen Annahmen in allen drei Szenarien der xEV-Einsatz sowohl bei den Pkw als auch bei den leichten Lkw als kosteneffiziente Maßnahme zur CO<sub>2</sub>-Reduktion sowie auch als effizienzsteigernde Maßnahme attraktiv ist. Der errechnete Bestand der Fahrzeuge hängt dabei stark von den unterstellten Zielregimen ab.

#### *VII.6.1.4 CO<sub>2</sub>-Emissionen und Systemkosten*

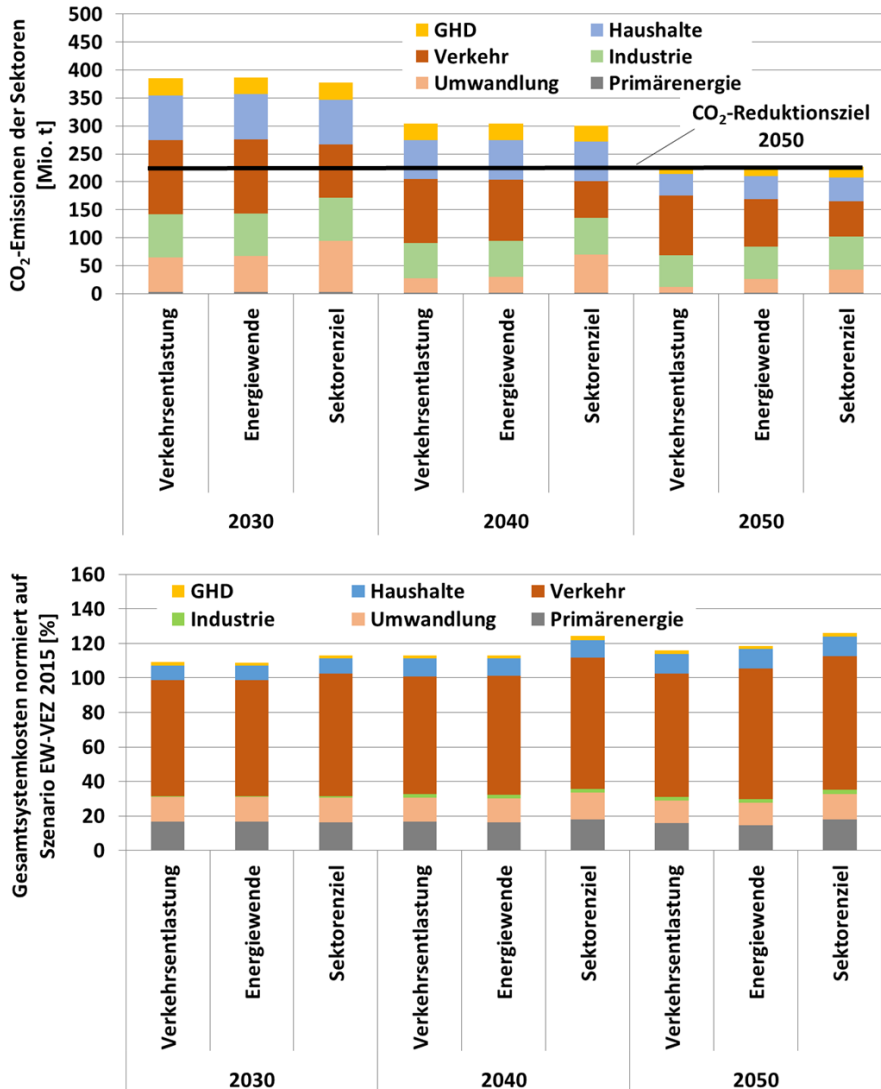
Das Energiesystemmodell bilanziert alle Energieströme, Emissionen und Kosten für das Gesamtsystem. Eine Differenzierung der jeweiligen Bilanzen nach Sektoren ist möglich. Abbildung VII-11 zeigt den errechneten Trend der CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Gesamtsystemkosten für die Hauptszenarien.

Die festgelegte CO<sub>2</sub>-Minderung von -80 % bis 2050 (im Vergleich zu 1990) wird in allen Szenarien entsprechend den angenommenen Zielwerten erreicht. In allen Szenarien wird die CO<sub>2</sub>-Reduktion maßgeblich durch den Umwandlungsbereich (maßgeblich Kraftwerke) und den Haushaltssektor getragen. Der Beitrag des Verkehrsbereichs in der Periode 2015 bis 2050 variiert signifikant zwischen den Szenarien. Im Fall eines CO<sub>2</sub>-Reduktionsziels für das Gesamtsystem (Verkehrsentlastung) wird eine deutliche Einsparung im Umwandlungsbereich errechnet. Der Verkehrsbereich muss dementsprechend einen geringeren Beitrag leisten. Das Endenergieziel für den Verkehr im Szenario „Energiewende“ führt dazu, dass durch die Effizienzgewinne weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen. Durch die vernetzte Abbildung des Systems wird der Umwandlungssektor entlastet und es wird dementsprechend weniger CO<sub>2</sub> in diesem Sektor eingespart. Dieser Effekt kann auch beim sektoralen CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel im Verkehr (Sektorenziel) beobachtet werden. Die zusätzlichen Einsparungen im Verkehrsbereich werden durch eine Relaxierung der CO<sub>2</sub>-Reduktion im Umwandlungsbereich aufgehoben. Eine exogen aufgeprägte zusätzliche Minderung der Emissionen im Verkehrsbereich führt nicht zu einer Minderung der



Gesamtemissionen, sondern nur zu einer Verschiebung der CO<sub>2</sub>-Einsparungen zwischen den Sektoren, da das Gesamtziel zur CO<sub>2</sub>-Einsparung weiterhin erfüllt werden muss.

**Abbildung VII-11: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Gesamtsystemkosten in den Hauptszenarien für die Perioden 2030, 2040 und 2050, Normierung auf die Gesamtemission des Szenarios „EW-VEK“ der Periode 2015, Deutschland**



Quelle: eigene Auswertung

Der Verkehrssektor wird in den Szenarien ohne sektorales CO<sub>2</sub>-Minderungsziel (Energiewende und Verkehrsentlastung) bereits ab 2030 zum größten Emittenten von CO<sub>2</sub>-Emissionen trotz des Einsatzes von xEV bzw. Biokraftstoffen. Im Szenario „Energiewende“ entwickelt sich der Luftver-

kehr mit 33 Mio. t CO<sub>2</sub> gefolgt vom Straßengüterverkehr mit 31 Mio. t CO<sub>2</sub> zu den größten Emittenten bis zur Periode 2050. Durch die hohen xEV-Bestände im Pkw-Bereich emittiert dieser in der Periode 2050 nur noch 17 Mio. t CO<sub>2</sub>.

Die errechnete Entwicklung der Systemkosten normiert auf die Gesamtsystemkosten des Szenarios „Verkehrsentlastung“ in der Periode 2015 ist ebenfalls in Abbildung VII-11 dargestellt. Man erkennt deutlich die Kosteneffizienz des Szenarios „Verkehrsentlastung“ im Vergleich zu den beiden anderen Projektionen. Die Gesamtsystemkosten für das Szenario „Energiewende“ liegen in der Periode 2050 um 2,3 % bzw. für das Szenario „Sektorenziel“ um 8,8 % höher im Vergleich zum Szenario „Verkehrsentlastung“. Der Anteil der Systemkosten des Verkehrs ist in allen gezeigten Szenarien dominant. Er beläuft sich in der Periode 2050 auf zwischen ca. 61 % (Energiewende) und ca. 64 % (Sektorenziel).

Basierend auf den Bilanzen der Kosten und Emissionen für das Gesamtsystem können mittlere CO<sub>2</sub>-Reduktionskosten für die Szenarien berechnet werden. Diese können nicht mit technikspezifischen Vermeidungskosten einer Referenztechnik oder den Zertifikatspreisen verglichen werden. An dieser Stelle sei auf die vertiefende Literaturstelle [Markewitz & Vögele, 2004] verwiesen. Für das Szenario „Verkehrsentlastung“ werden zwischen den Perioden 2015 bis 2050 mittlere Reduktionskosten von 213 €/2000/t<sub>CO2</sub> für „Energiewende“ 249 €/2000/t<sub>CO2</sub> und von 351 €/2000/t<sub>CO2</sub> für „Sektorenziel“ berechnet. Diese Werte sind sehr hoch und durch die ambitionierten Reduktionsziele bei Primär- und Endenergie sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen geprägt.

### **VII.6.2 Variation der Ladeprofile**

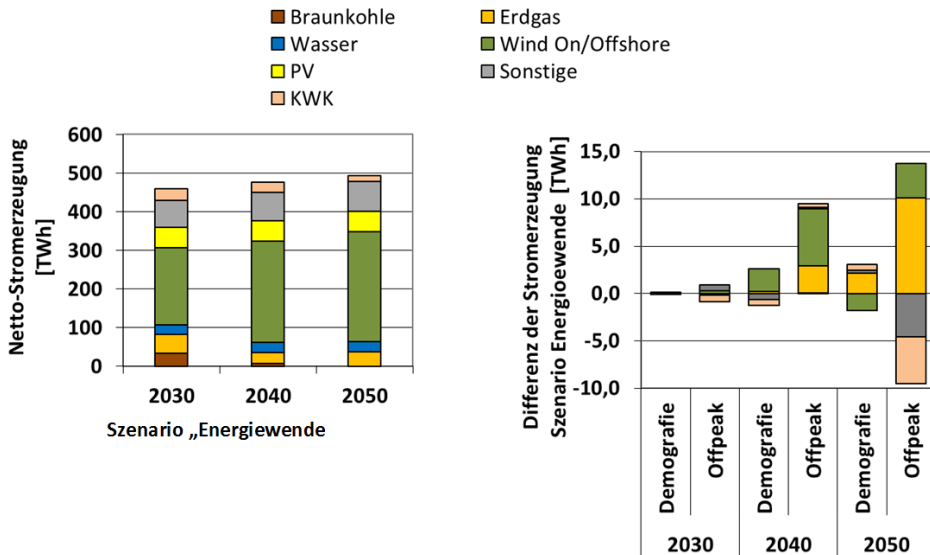
Die entwickelten Modelle und Verfahren zur Abbildung der Ladeprofile im Tagesverlauf und deren Übertragung in das Energiesystemmodell (siehe Kapitel VII.4.2) ermöglichen eine Analyse der Auswirkungen von geänderten Ladebedarfsprofilen auf das Energiesystem. Es werden die Nachfrageprofile des Hauptszenarios „Energiewende“ als Referenz für das ungesteuerte Heimladen der Grundgesamtheit und die Varianten „Energiewende&Offpeak“ und „Energiewende&Demografie“ (siehe Tabelle VII-3) miteinander verglichen. Abbildung VII-13 stellt die Auswirkungen der unterschiedlichen Ladeprofile auf die Stromerzeugung dar.

Im Hauptszenario „Energiewende“ steigt die Stromerzeugung trotz deutlicher Einsparungen beim Strombedarf in den Sektoren Haushalte (-44,0%), GHD (-38,3 %) und Industrie (-15,4 %) um ca. 5,1 % (bezogen auf die Periode 2015) auf 501 TWh im Jahr 2050 an (siehe Tabelle XIII-21Tabelle XIII-11 im Anhang). Dies ist wesentlich auf den zusätzlichen Bedarf der batterieelektrischen Pkw und leichten Lkw in allen Szenarien zurückzuführen. In der Periode 2050 beträgt dieser 65 TWh (Pkw) und 12,4 TWh (leichte Lkw) und entspricht einem Anteil von 16,2 % an der gesamten Stromerzeugung. Die Entwicklung der Stromerzeugung im Hauptszenario „Energiewende“ ist in der linken Darstellung der Abbildung VII-13 dargestellt.

Der Anteil der fossilen Stromerzeugung beträgt in der Periode 2050 nur noch 15,4 % und wird dominiert durch Erdgas. Das angenommene Ziel einer erneuerbaren Stromerzeugung von mindestens 80 % wird im Szenario bedingt durch die unterstellten CO<sub>2</sub>-Restriktionen und Energieeinsparziele übererfüllt. Die Windstromerzeugung stellt mit 59,9 % in der Periode 2050 den größten Anteil an der gesamten Stromerzeugung, gefolgt von Sonstige (16,1 %), PV (10,9 %)

und Wasser (5,2 %) im Szenario. Zur Kategorie „Sonstige“ gehört die thermische Stromerzeugung aus Müll und Biomasse.

**Abbildung VII-12: Entwicklung der installierten Kapazitäten und Netto-Stromerzeugung im Hauptszenario „Energiewende“ und die Varianten mit Ladestrategie „Offpeak“ und „Demografie“ für die Perioden 2030, 2040 und 2050 in Deutschland**



Quelle: eigene Auswertungen

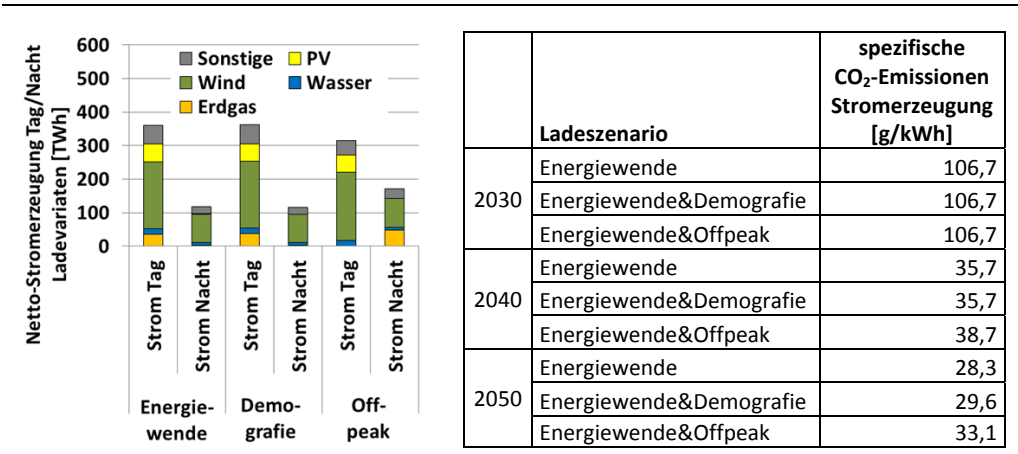
Die Differenz zwischen der Stromerzeugung bei verschiedenen Ladeszenarien (siehe Abbildung VII-12, linke Darstellung) zeigt eine Verschiebung der Stromerzeugung bei der Variante „Energiewende&Offpeak“ in Richtung Erdgas und Wind. Die Differenzen bei der Variante „Energiewende&Demografie“ sind deutlich weniger ausgeprägt. Die Begründung ist in der geringen Verschiebung der Ladeenergie zwischen den Zeitscheiben in den beiden Ladevarianten zu sehen (vgl. Tabelle VII-1).

Um die Verschiebung in der Stromerzeugung detaillierter analysieren zu können, werden die Tagesscheiben Tag und Nacht der Stromerzeugung in den Ladevarianten in Abbildung VII-13 dargestellt. Für die Ladevariante „Energiewende&Offpeak“ ergibt sich in der Zeitscheibe Nacht (vgl. Tabelle VII-1) eine deutliche Erhöhung der Erdgas-Verstromung um +45 TWh. Der Anteil der Windstromerzeugung bleibt bei allen Varianten annähernd gleich.

Durch die beschriebenen Änderungen in der Zusammensetzung der Stromerzeugung verschieben sich auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung. Abbildung VII-13 (Tabelle links) stellt die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung für die jeweiligen Ladevarianten dar. Der Vergleich zur Variante „Energiewende&Offpeak“ ergibt eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in

der Stromerzeugung um +17,0 % für die Periode 2050. Die Erhöhung im Vergleich zur Variante „Energiewende&Demografie“ fällt mit +4,9 % in der Periode 2050 moderat aus.

**Abbildung VII-13: Netto-Stromerzeugung in den Zeitscheiben Tag und Nacht (links), Entwicklung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung (rechts), Deutschland**



Quelle: eigene Auswertungen

Die Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Kraftwerksbereichs haben im vernetzten Energiesystemmodell Auswirkungen auf die kosteneffizienten CO<sub>2</sub>-Minderungsbeiträge der anderen Sektoren, da die Gesamtreduktion in allen Szenarien eingehalten werden muss. Die Mehremissionen im Kraftwerksbereich müssen durch andere Sektoren kompensiert werden. Für das Szenario „Energiewende&Offpeak“ in der Periode 2050 werden durch das geänderte Ladeprofil im Wesentlichen zusätzliche Maßnahmen im Industriebereich (-11,7 %-Punkte) als Kompensation getroffen (siehe Tabelle XIII-18 und Tabelle XIII-29 im Anhang).

Zusammenfassend lässt sich folgern, dass der Einfluss einer geänderten Ladestrategie u. U. signifikant sein kann. Mehremissionen im Kraftwerksbereich müssen durch weitere Maßnahmen in anderen Sektoren kompensiert werden. Die Ausgestaltung der kostenoptimalen Szenarien wird dementsprechend durch veränderte Ladestrategien beeinflusst.

## VII.7 Zusammenfassung und Diskussion der Energiesystemmodellierung

Mit der gewählten Abbildung der Elektromobilität in einem für die Fragestellung adaptierten Energiesystemmodell konnte der Beitrag der batterieelektrischen Fahrzeuge in Klimaschutz- und Effizienz-Strategien quantifiziert werden. Mit Hilfe von drei Szenarien mit den Prämissen „CO<sub>2</sub>-Reduktion im Gesamtsystem“, „sektorale Energieeffizienz im Verkehr“ und „sektorale CO<sub>2</sub>-Reduktion im Verkehr“ wurde die Kosteneffizienz von xEV im Verkehr untersucht. Mit den getroffenen Annahmen zu techno-ökonomischen Daten der Fahrzeuge konnte in allen drei Szenarien gezeigt werden, dass sowohl im Bereich der Pkw als auch der leichten Lkw der Einsatz von xEV als kosteneffiziente Maßnahme bewertet werden kann. Die kostenoptimale Zusammensetzung der Fahrzeugbestände hängt dabei wesentlich von den unterstellten Reduktionszielen bezüglich CO<sub>2</sub>-Emissionen und Endenergie ab. Das angenommene Ziel einer

Endenergie-Reduktion von -40 % im Verkehr bis zum Jahr 2050 ergibt die höchsten xEV-Bestandsanteile von ca. 67 % im Pkw-Bereich und von knapp 70 % bei den leichten Lkw in der Periode 2050. Die Annahme einer sektoralen CO<sub>2</sub>-Einsparung im Verkehrsbereich zusätzlich zu einem Gesamtziel erfordert additive Maßnahmen zur Elektromobilität bei Pkw und leichten Lkw. Die Erschließung von deutlichen Reduktionspotenzialen bezüglich CO<sub>2</sub>-Emissionen und Endenergie im Langstrecken-Güterverkehr auf der Straße und im Flugverkehr wird durch stringente Ziel-Regime zwingend notwendig.

Die Modellierung von zeitlich aufgelösten Ladeenergieprofilen hat gezeigt, dass nur eine sehr eingeschränkte Abbildung mit den berücksichtigten Zeitscheiben möglich ist. Die Auswertung der Szenarioergebnisse ergibt nur für das Laden zu Offpeak-Zeiten belastbare Ergebnisse. Durch den Vergleich dieses Ladeprofils mit dem ungesteuerten Heimpladeprofil konnte gezeigt werden, dass der Einfluss einer geänderten Ladestrategie vielfältige Auswirkungen auf die Ausgestaltung von kostenoptimalen Energiesystemen hat. So müssen z. B. Mehremissionen im Kraftwerksbereich durch Maßnahmen in anderen Sektoren kompensiert werden. Diesen Sachverhalt gilt es mit entsprechend höher zeitlich aufgelösten Energiesystemmodellen zukünftig zu detaillieren.

Der Vergleich mit anderen Szenarien außerhalb dieser Forschungsarbeit ist schwierig, da die Annahmen bezüglich wirtschaftlicher und soziodemografischer Rahmendaten sowie techno-ökonomischer Daten sehr unterschiedlich ausfallen. Dennoch wird im Folgenden am Beispiel des verkehrsseitigen Endenergiebedarfs und der xEV-Bestände ein Vergleich mit anderen Studien durchgeführt, um die erzielten Ergebnisse besser einordnen zu können.

Die Autoren der „Energierferenzprognose“ [Schlesinger et al., 2014] errechnen im Zielszenario einen Endenergiebedarf des gesamten Verkehrs von 1.547 PJ im Jahr 2050. Dieses Szenario bildet die Ziele des Energiekonzeptes ab. Dies deckt sich gut mit den Ergebnissen des Szenarios „Energiewende“ und den unterstellten spezifischen Energiebedarfe der vorliegenden Arbeit. Der Anteil der Elektrofahrzeuge im Jahr 2050 wird von [Schlesinger et al., 2014] mit knapp 53 % am Pkw-Bestand angegeben. Dieser Wert liegt um 15 %-Punkte unter dem berechneten Wert der eigenen Analysen. Die Autoren der „Energierferenzprognose“ gehen dabei von höheren Effizienzpotenzialen bei konventionellen Pkw aus. Dementsprechend können die Endenergieziele des Verkehrs mit mehr Verbrennungsmotor-Fahrzeugen erreicht werden.

Die aktuelle Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ [Pflüger et al., 2017] errechnet für das hinterlegte Basisszenario (Zielerfüllung Energiewende) einen Endenergiebedarf des Verkehrs von ca. 1.440 PJ im Jahr 2050. Der Gesamtbestand der xEV-Pkw wird mit ca. 30 Mio. angegeben. Der Strombedarf für die batterieelektrischen Fahrzeuge errechnet sich zu 68 TWh. Der Vergleich mit dem Szenario „Energiewende“ zeigt eine gute Übereinstimmung der Werte.

## VIII. Zusammenfassung und Ausblick

Die Notwendigkeit des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung zusammen mit den derzeitigen Entwicklungen im Verkehr indiziert dringenden Handlungsbedarf und die forcierte Umsetzung von Verkehrsstrategien. Der Beitrag, den die Elektromobilität zu einem klimaneutralen und effizienten Verkehr zu leisten vermag, ist derzeit unklar. Das erschließbare Reduktionspotenzial wird entscheidend durch das Ladeverhalten der Fahrzeugnutzer bestimmt. Hierzu fehlten bislang belastbare, empirische Erfahrungswerte. Das Ladeverhalten wird neben technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wesentlich durch das Mobilitätsverhalten geprägt. Dieses ist durch Lebensstile und Soziodemografie bestimmt, die einem Wandel unterliegen können. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Verfahren und Modellen, welche die Beurteilung des Ladeverhaltens unter Berücksichtigung von Lebensstilen und Soziodemografie ermöglichen. Darauf aufbauend erfolgt eine Quantifizierung des Beitrags der Elektromobilität im Kontext von Gesamtstrategien des Klimaschutzes und der Energieeffizienz.

Die Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zu bereits veröffentlichten Ansätzen zur Modellierung (Kapitel II) des Ladeverhaltens besteht in der Berücksichtigung von nutzungshomogenen Clustern für die Modellierung der Ladeenergieprofile. Zur Clusterung von potenziellen xEV-Nutzern wird ein Data-Mining-Verfahren speziell für das Clustern von Tagesprofilen für die Ladung am nächtlichen Stellplatz entwickelt. Daraus entsteht die Option, soziodemografische Effekte und Käuferschichtbildung mit in die Analysen einzubeziehen.

Die Modellierung von Ladebedarfsprofilen setzt eine Analyse des Status Quo der Elektromobilität bezüglich Fahrzeugkonzepte, Marktbedingungen, Nutzeranforderungen an die Ladeinfrastruktur und Mobilitätsverhalten voraus (Kapitel III und Kapitel IV). Eine Analyse des xEV-Marktes lässt derzeit nur ein sehr geringes Käuferinteresse erkennen. Derzeit besteht eine Diskrepanz zwischen gewünschten Reichweiten und tatsächlichem Bedarf an Tagesfahrleistungen, der die Marktpenetration derzeit negativ beeinflusst. Die gestarteten Anreizsysteme sind vielfältig und haben eine Markteinführung ermöglicht. Bisher haben die Maßnahmen aber die Kundenakzeptanz in Deutschland noch nicht deutlich beeinflussen können. Als Ladeoption hat sich die konduktive Ladung durchgesetzt. Das Laden am nächtlichen Stellplatz mit moderaten Leistungen zeichnet sich als bestimmende Ladeoption ab.

Die in Kapitel V entwickelte Modellierung von potenziellen xEV-Nutzern und den resultierenden Tagesganglinien der Ladeleistung am nächtlichen Stellplatz basiert auf einer großen Stichprobe zum Mobilitätsverhalten in Deutschland. Die aus dem nächtlichen Laden am Stellplatz resultierende Ladeleistung kann mit ausreichender Wahrscheinlichkeit abgebildet werden. Die gewählte Vorgehensweise eignet sich für übergeordnete Analysen, hat aber den Nachteil, dass die Berücksichtigung von soziodemografischen Effekten in Szenario-Analysen nicht möglich ist.

Der genannte Nachteil führte zur Entwicklung eines Data-Mining-Verfahrens, welches die Nutzergesamtheit in nutzungshomogene Cluster zerlegen kann. Der in Kapitel VI vorgestellte Ansatz zur Bildung von nutzungshomogenen Gruppen und deren Zuordnung zu soziodemografischen, haushaltstypischen und sonstigen Merkmalen ermöglicht eine Berücksichtigung einer

geänderten Zusammensetzung von potenziellen xEV-Nutzern. Dies ist als ein wesentlicher Vorteil im Vergleich zu bisherigen Ansätzen zu sehen.

Die Aufteilung in Cluster hat gezeigt, dass sich daraus wenige, aber signifikant unterschiedliche Tagesprofile der Ladeleistung eines Bestands an xEV ableiten lassen. Insbesondere eine nicht der Grundgesamtheit aller Pkw-Nutzer entsprechende Verteilung lässt teilweise deutliche Abweichungen von der erwarteten Tagesganglinie erwarten. Wie gezeigt, können demografische Effekte oder die Bildung von spezifischen Käuferschichten zu einer solchen geänderten Zusammensetzung führen.

Die Abbildung der Elektromobilität in einem für die Fragestellung angepassten Energiesystemmodell in Kapitel VII konnte den Beitrag der batterieelektrischen Fahrzeuge in Klimaschutz- und Effizienz-Strategien quantifizieren. Mit Hilfe von drei Szenarien mit den Prämissen „CO<sub>2</sub>-Reduktion im Gesamtsystem“, „sektorale Energieeffizienz im Verkehr“ und „sektorale CO<sub>2</sub>-Reduktion im Verkehr“ wurde die Kosteneffizienz von xEV im Verkehr analysiert. Mit den getroffenen Annahmen zu techno-ökonomischen Daten der Fahrzeuge konnte in allen drei Szenarien gezeigt werden, dass sowohl im Bereich der Pkw als auch der leichten Lkw der Einsatz von xEV als kosteneffiziente Maßnahme bewertet werden kann. Die kostenoptimalen Fahrzeugbestände hängen dabei stark von den unterstellten Reduktionszielen für die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Endenergie ab. Das angenommene Ziel einer Endenergie-Reduktion von -40 % bis 2050 ergibt die höchsten xEV-Bestandsanteile von ca. 67 % im Pkw-Bereich und von knapp 70 % bei den leichten Lkw in der Periode 2050. Die Annahme einer sektoralen CO<sub>2</sub>-Einsparung im Verkehrsbereich additiv zu einem CO<sub>2</sub>-Gesamtziel erfordert zusätzlich zur Elektromobilität bei Pkw und leichten Lkw auch das Erschließen von weiteren Reduktionsmaßnahmen bei Emissionen und den Energiebedarfen des Langstrecken-Güterverkehrs auf der Straße und des Flugverkehrs.

Durch einen Vergleich der Ladeprofile des ungesteuerten Heimladens und des Heimladens in Offpeak-Zeiten konnten signifikante Änderungen des berechneten Energiesystemdesigns beobachtet werden. Der Einfluss einer geänderten Ladestrategie zeigt vielfältige Auswirkungen auf die Ausgestaltung von kostenoptimalen Energiesystemen. So müssen z. B. Mehremissionen im Kraftwerksbereich durch Maßnahmen in anderen Sektoren kompensiert werden. Die zeitlich Auflösung des angepassten Energiesystemmodells mit einer sehr begrenzten Anzahl an Zeitscheiben hat sich als limitierender Faktor der Analyse erweisen. Die Analyse der Auswirkungen von Ladestrategien auf zukünftige Energiesystemdesigns gilt es zukünftig mit entsprechend höher zeitlich aufgelösten Energiesystemmodellen zu detaillieren.

Als wichtiger Punkt der Fortführung dieser Forschungsarbeiten ist die detaillierte Darstellung der Ladebedarfsprofile in räumlich und zeitlich höher auflösenden Energiesystemmodellen zu nennen. Diese Möglichkeit konnte mit dem zur Verfügung stehenden Optimierungsmodell nicht ausgeschöpft werden. Weiterhin kann die entwickelte Methode zur Clusterbildung auf zukünftige Mobilitätsstatistiken Anwendung finden. Durch eine längerfristig angelegte Analyse wäre es möglich, auch Verhaltensänderungen im Verkehr zu identifizieren. Weiterhin gilt es, neue Mobilitätskonzepte wie z. B. autonomes Fahren und Mobilitäts-Sharing und deren Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten und die Ladeenergieprofile zu untersuchen.

## IX. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Begriff
BEV	Battery Electric Vehicle, rein Batterie-elektrisches Straßenfahrzeug
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BWS	Bruttowertschöpfung
CDM	Charge Depleting Mode; PHEV Betriebsweise, Elektromotor wird Traktionsbatterie gespeist
CNG	Komprimiertes Erdgas @ 200 bar
CSM	Charge Sustaining Mode; PHEV Betriebsweise: Ladezustand der Traktionsbatterie konstant, elektrische Energie dem VKM/ RE entnommen
DC / AC:	DC/AC: Gleich-/Wechselrichter
DC / DC:	Gleichrichter
Di	Dienstag
Do	Donnerstag
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EM	Elektrische Antriebsmaschine
Energiewende	Szenario laut Tabelle VII-2 und Tabelle VII-3
Energiewende & Demografie	Szenario laut Tabelle VII-2 und Tabelle VII-3
Energiewende & Offpeak	Szenario laut Tabelle VII-2 und Tabelle VII-3
Sektorenziel	Szenario laut Tabelle VII-2 und Tabelle VII-3
Verkehrsentlastung	Szenario laut Tabelle VII-2 und Tabelle VII-3
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang; Kraftstoff: Wasserstoff
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit komprimierten Wasserstoff @ 350 oder 700 bar
Fr	Freitag
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
HEV	Hybrid Electric Vehicle, verbrennungsmotorischer Antrieb gekoppelt mit einem elektromotorischen Antrieb, die Batterie kann nicht aus dem Netz geladen werden und wird durch einen Generator oder Rekuperation gespeist
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
Kfz	Kraftfahrzeug
KomDrive	Öffentlich gefördertes Forschungsprojekt (siehe [Arndt et al., 2016])
KONTIV	Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten
KT	Kraftstofftank
LG	Onboard-Ladegerät / Netzanbindung
Lkw	Lastkraftwagen



LNF	Leichte Nutzfahrzeug
LPG	Liquefied Petroleum Gas, Flüssiggas, Gemisch aus Butan und Propan
Mi	Mittwoch
MiD	Mobilität in Deutschland
MIV	Motorisierter Individualverkehr
Mo	Montag
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
NET-ELAN	Projekt Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen (Forschungsprojekt)
NET-ELAN	Öffentlich gefördertes Forschungsprojekt (siehe [Linszen et al., 2012])
NL	Nutzlast, maximale Zuladung
NV	Nebenverbraucher
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle, Hybridfahrzeug, das auch bei rein elektrischem Antrieb die volle Fahrleistung hat und dessen Traktionsbatterie aus dem Netz aufgeladen werden kann
Pkw	Personenkraftwagen
PV	Kontext Verkehr: Personenverkehr
PV	Kontext Energie: Photovoltaik
RE	Range-Extender
REEV	Range Extender Electric Vehicle
Sa	Samstag
So	Sonntag
TFL	Tagesfahrleistung, zurückgelegte tägliche Wegstrecke
VDE	Verband der Elektrotechnik
VKM	Verbrennungskraftmaschine
xEV	Electric Vehicle: BEV, PHEV; FCEV
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

## X. Abbildungsverzeichnis

Abbildung II-1: Vorgehensweise und Abgrenzung der Arbeit.....	4
Abbildung II-2: Elektromobilität als System und Abgrenzung der Arbeit.....	5
Abbildung III-1: Konzeptionelle Verschaltung der Antriebskomponenten und des Energiespeichers.....	9
Abbildung III-2: Konzeptionelle Verschaltung der Antriebskomponenten und des Energiespeichers.....	10
Abbildung III-3: Konzeptionelle Verschaltung der Antriebskomponenten und des Energiespeichers.....	11
Abbildung III-4: Vergleich typischer Kenngrößen und Funktionen von xEV-Antriebskonzepten .....	12
Abbildung III-5: Vergleich von Leistungs- und Energiedichten für Lithium-basierte Systeme auf Zellebene.....	14
Abbildung III-6: Li-Übergangsmetalloxide im System $\text{LiCoO}_2\text{-LiNiO}_2\text{-LiMnO}_2$ .....	15
Abbildung III-7: Entwicklung der Energiedichte von Li-Ionen-Zellen und Batteriepacks von 2015 bis 2030.....	16
Abbildung III-8: Historische Entwicklung der Preise von Li-Ionen-Batteriepacks, 2006 bis 2014.....	18
Abbildung III-9: Mögliche Kostenentwicklung für Zellen und Batteriepacks von 2015 bis 2030, Lithium-Ionen.....	18
Abbildung III-10: Neuzulassungen von xEV im Pkw-Bereich in Deutschland, EU 28 und weltweit.....	19
Abbildung III-11: Auswertung nach Pkw-Segmenten von xEV-Neuzulassungen in Deutschland.....	20
Abbildung III-12: Nichterfüllung der Mobilitätswünsche (DRA) pro Jahr für Erst- und Zweit- Pkw.....	28
Abbildung III-13: Soziodemografische Daten von privaten xEV-Erstnutzern.....	29
Abbildung III-14: Schematische Darstellung der xEV als Element der Stromversorgung.....	31
Abbildung III-15: Vergleich von Ladezeiten und Fahrstrecken für verschiedene Ladeleistungen im Vergleich.....	33
Abbildung III-16: Mögliche Ladeoptionen an verschiedenen Standorten.....	34
Abbildung III-17: Entwicklung der Ladestellen in Deutschland, 2014 bis 2017.....	35
Abbildung III-18: Status Quo der öffentlichen Ladepunkte in ausgewählten Ländern der EU und EFTA im Jahr 2016.....	36
Abbildung III-19: Entwicklung der Lastreduktionspotenziale nach Sektoren.....	39
Abbildung IV-1: Aufteilung der Verkehre und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes.....	41
Abbildung IV-2: Befragungssystematik der Mobilität in Deutschland Studie 2008.....	44
Abbildung V-1: Schematische Vorgehensweise der Modellbildung.....	54
Abbildung V-2: Modellbildung der individuellen Nutzungsmuster.....	56
Abbildung V-3: Heatmap-Darstellung der relativen Häufigkeit „Startzeit der ersten Fahrt“.....	58
Abbildung V-4: Heatmap-Darstellung der relativen Häufigkeit der „Ankunftszeiten am nächtlichen Stellplatz“.....	59
Abbildung V-5: Heatmap-Darstellung der relativen Häufigkeit der „Fahraktivität“.....	60
Abbildung V-6: Heatmap-Darstellung der relativen Häufigkeit der täglichen Fahrleistung am Stichtag.....	61

Abbildung V-7: Zuordnung der Tagesfahrleistung (TFL) von Pkw-Nutzern, Grundgesamtheit .....	62
Abbildung V-8: Potenzielle Tagesfahrleistung für angenommene Reichweiten; BEV und PHEV .....	63
Abbildung V-9: Entscheidungslogik zur Modellierung der Heimladevorgänge potenzieller Pkw-Nutzer .....	65
Abbildung V-10: Standardlastprofile Haushalt (H0), dynamisch für verschiedene Wochentage und Jahreszeiten.....	67
Abbildung V-11: Resultierende Ladeleistung eines Bestands von 1 Million xEV, ungesteuertes Heimladen .....	70
Abbildung V-12: Gleichzeitigkeitsfaktor von BEV-Ladevorgängen für das ungesteuerte Heimladen mit unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen, Dienstag bis Donnerstag....	71
Abbildung V-13: Resultierende Ladeleistung für 1 Mio. BEV-Nutzer durch ungesteuertes Heimladen, Wochentagsaggregat Di bis Do, Parametervariationen der verfügbaren Leistung des Ladepunktes, elektrische Reichweite und Strombedarf BEV .....	72
Abbildung V-14: Ladeleistung eines Bestands von 1 Million BEV, Vergleich ungesteuertes Heimladen versus Offpeak-Heimladen .....	74
Abbildung V-15: Gleichzeitigkeitsfaktor von BEV-Ladevorgängen für das ungesteuerte Heimladen für die Wochentagsaggregat Di bis Do und Sa bis So; Vergleich der MiD 2002 und MiD 2008 Bewegungsprofile.....	76
Abbildung V-16: Mittlerer Lastgang (ungesteuertes Heimladen) eines privat genutzten xEV und eines durchschnittlichen Haushalts.....	77
Abbildung V-17: Problem der Mehrfachnutzung von Pkw durch Nutzer .....	78
Abbildung V-18: Vergleich der Fahraktivitäten für Pkw-Nutzer und Pkw-Profile .....	79
Abbildung VI-1: Data-Mining-Prozesses zur Bildung nutzungshomogener Cluster möglicher xEV-Nutzer.....	82
Abbildung VI-2: Auswahl an untersuchten Merkmalen der Pkw-Nutzer.....	83
Abbildung VI-3: Änderung der Mittelwerte von merkmalspezifischen Gruppen im Vergleich zur Grundgesamtheit aller Pkw-Nutzer .....	84
Abbildung VI-4: Ablaufschema der Clusterbildung im Anwendungsfall.....	86
Abbildung VI-5: Überblick möglicher Clusterverfahren.....	89
Abbildung VI-6: Ergebnisse des Mojena-Tests zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl .....	93
Abbildung VI-7: Elbow-Kriterium zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl.....	94
Abbildung VI-8: Ergebnisse des F-Test für gewählte Clusterzahlen .....	95
Abbildung VI-9: Boxplot der Parameter Startzeit, Endzeit, Standzeit am Tag und Tagesfahrleistung für verschiedene Clusterzahlen und Wochentagsaggregate.....	98
Abbildung VI-10: Verteilung der soziografischen, haushaltstypisierenden Merkmale der Nutzer in der Grundgesamtheit der Wochentagsaggregate.....	99
Abbildung VI-11: Verhältnis der Häufigkeiten von Merkmalen in den Clustern zur Grundgesamtheit aller Nutzer in den jeweiligen Wochentagsaggregaten .....	100
Abbildung VI-12: Tagesprofil der Gleichzeitigkeit der Ladeleistungsnachfrage für BEV-Nutzer @ Heimladen 3,3 kW, Strombedarf 17,5 kWh/100km, Reichweite 120 km .....	102
Abbildung VI-13: Vergleich des Ladeleistungsverlaufs 1 Mio. BEV der Grundgesamtheit und Linearkombination der nutzungshomogenen Cluster @ ungesteuertes Heimladen mit 3,3 kW, Strombedarf 17,5 kWh/100km, Reichweite 120 km.....	103

Abbildung VI-14: Vergleich der Ladeleistungskurve für die Szenarien „Demografie“ und „Käuferschicht“, 1 Mio. BEV.....	105
Abbildung VI-15: Vergleich der Tagesprofile der Gleichzeitigkeit in der Grundgesamtheit; ungesteuertes Heim- / Depotladen 3,3 kW, private und gewerbliche Pkw: Strombedarf 17,5 kWh/100km, Reichweite 120 km; leichte Lkw: Strombedarf 25,1 kWh/100km, Reichweite 115 km.....	108
Abbildung VI-16: Vergleich der Tagesprofile der Gleichzeitigkeit in nutzungshomogenen Clustern; ungesteuertes Heim- / Depotladen 3,3 kW, private und gewerbliche Pkw: Strombedarf 17,5 kWh/100km, Reichweite 120 km; leichte Lkw: Strombedarf 25,1 kWh/100km, Reichweite 115 km.....	108
Abbildung VI-17: Vergleich der Änderungen der Mittelwerte in den Clustern nach dem Ward- und k-Means-Verfahren .....	110
Abbildung VII-1: Struktur des verwendeten Energiesystemmodells.....	115
Abbildung VII-2: Historische Entwicklung des Bedarfs an Endenergieträgern nach Sektoren und Verkehrsträgern in Deutschland.....	116
Abbildung VII-3: Historische Entwicklung des Endenergieträgermix in den Endverbrauchssektoren in Deutschland .....	117
Abbildung VII-4: Historische Entwicklung der installierten Brutto-Erzeugungskapazität und der Bruttostromerzeugung in Deutschland.....	119
Abbildung VII-5: Angenommene Entwicklung der energienachfragebestimmenden Größen und Energieträgerpreise in den Szenarien.....	121
Abbildung VII-6: Angenommene Energiebedarfsdaten der Pkw und deren Trends für den städtischen und den außerstädtischen Verkehr.....	123
Abbildung VII-7: Angenommene Kostenentwicklung für Pkw und deren Trends .....	124
Abbildung VII-8: Entwicklung der Primärenergieträgerbilanzen in den Hauptszenarien „Energiewende“, „Verkehrsentlastung“ und „Sektorenziel“ für die Perioden 2020, 2030, 2040 und 2050 in Deutschland .....	130
Abbildung VII-9: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Personen- und Güterverkehr für die Szenarien und Perioden 2030, 2040 und 2050 in Deutschland.....	132
Abbildung VII-10: Entwicklung des normierten Bestands an Pkw und leichten Lkw in den Hauptszenarien bis zum Jahr 2050, Deutschland.....	134
Abbildung VII-11: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen und der Gesamtsystemkosten in den Hauptszenarien für die Perioden 2030, 2040 und 2050, Normierung auf die Gesamtemission des Szenarios „EW-VEK“ der Periode 2015, Deutschland .....	136
Abbildung VII-12: Entwicklung der installierten Kapazitäten und Netto-Stromerzeugung im Hauptszenario „Energiewende“ und die Varianten mit Ladestrategie „Offpeak“ und „Demografie“ für die Perioden 2030, 2040 und 2050 in Deutschland .....	138
Abbildung VII-13: Netto-Stromerzeugung in den Zeitscheiben Tag und Nacht (links), Entwicklung der spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionen der Stromerzeugung (rechts), Deutschland .....	139
Abbildung XIII-1: Ergebnisse des Mojena-Tests zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl, Wochentagsaggregat Di bis Do, gewerbliche Pkw und leichte Lkw...	171
Abbildung XIII-2: Elbow-Kriterium zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl für gewerbliche Pkw und leichte Lkw .....	171
Abbildung XIII-3: Ergebnisse des F-Test für gewählte Clusterzahlen, Wochentagsaggregat Di bis Do, gewerbliche Pkw und leichte Lkw .....	172

Abbildung XIII-4: Boxplot der Parameter Startzeit, Endzeit, Standzeit am Tag und Tagesfahrleistung, Wochentagsaggregat Di bis Do, gewerbliche Pkw.....	173
Abbildung XIII-5: Boxplot der Parameter Startzeit, Endzeit, Standzeit am Tag und Tagesfahrleistung, Wochentagsaggregat Di bis Do, leichte Lkw.....	174
Abbildung XIII-6: Verhältnis der Häufigkeiten von Merkmalen in den Clustern zur Grundgesamtheit, Wochentagsaggregat Di bis Do, gewerbliche Pkw.....	175
Abbildung XIII-7: Verhältnis der Häufigkeiten von Merkmalen in den Clustern zur Grundgesamtheit, Wochentagsaggregat Di bis Do, leichte Lkw.....	176
Abbildung XIII-8: Tagesprofil der Gleichzeitigkeit Ladeleistungsnachfrage für PHEV-Nutzer @ Heimpladen 3,3 kW, Strombedarf 19,9 kWh/100km, CDM-Reichweite 50 km.....	177
Abbildung XIII-9: Vergleich der Ladeleistungskurve für die Szenarien „Demografie“ und „Käuferschicht“, 1 Mio. PHEV.....	177

## XI. Tabellenverzeichnis

Tabelle III-1: Batterie-Nennkapazitäten, Normreichweiten und Gesamtkapazität der Neufahrzeugflotte in Deutschland .....	22
Tabelle III-2: Auswertung der Neuzulassungen von xEV und deren Batterienennkapazitäten .....	22
Tabelle III-3: Lademodi nach IEC-61851-1, typische Ladeleistungen und Ladeorte .....	32
Tabelle III-4: Beschreibung möglicher Ladestrategien .....	38
Tabelle IV-1: Auswahl geeigneter Datenerhebungen für die Fragestellung .....	42
Tabelle IV-2: Auswertung der KiD 2010; mit Fahrzeugbeständen hochgerechnete Jahresfahrleistungen nach Fahrzeugart und deren Zuordnung zum Privatverkehr .....	46
Tabelle IV-3: Auswertung des Panels aus der MoP für das Jahr 2012 .....	47
Tabelle IV-4: Bestand und Jahresfahrleistung von privaten Pkw für das Jahr 2002 .....	48
Tabelle IV-5: Statistische Kenngrößen des Verkehrs in den Mobilitätsstatistiken im Zeitverlauf .....	48
Tabelle IV-6: Bewertungsmatrix der Datenerhebungen zur Pkw-Nutzung .....	49
Tabelle V-1: Auswertung von Kenngrößen des Gesamtnutzerprofils nach Stichtagen .....	57
Tabelle V-2: Auswertung der mittleren Ladedauern, Ladeenergien und Stillstandszeiten .....	69
Tabelle V-3: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte zwischen den Erhebungen MiD 2002 und MiD 2008 .....	75
Tabelle V-4: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte Nutzer versus Pkw .....	79
Tabelle VI-1: Korrelationsmatrix der Parameter Dienstag bis Donnerstag .....	88
Tabelle VI-2: Ergebnisse der Clusterung; Mittelwerte für die Wochentagsaggregate Di bis Do und Sa / So .....	92
Tabelle VII-1: Modellierung der Tagesprofile der Ladeenergienachfrage für die Varianten .....	126
Tabelle VII-2: Angenommene Zielsetzungen in den Hauptszenarien .....	128
Tabelle VII-3: Szenarien für die hinterlegten Ladeprofile aufbauend auf dem Szenario Energiewende .....	129
Tabelle XIII-1: Neufahrzeugverkäufe und Kennwerte der Fahrzeuge - BEV .....	162
Tabelle XIII-2: Neufahrzeugverkäufe und Kennwerte der Fahrzeuge - PHEV .....	164
Tabelle XIII-3: Liste genutzter Variablen und deren Beschreibung .....	166
Tabelle XIII-4: Korrelationsmatrix der Parameter Samstag bis Sonntag .....	169
Tabelle XIII-5: Ergebnisse der Clusterung; Mittelwerte für die Wochentagsaggregate Di bis Do, gewerbliche Pkw und leichte Lkw .....	170
Tabelle XIII-6: Angenommene Energiebedarfe und techno-ökonomische Daten der Pkw und deren Trends für den städtischen und außerstädtischer Personenverkehr .....	178
Tabelle XIII-7: Angenommene Energiebedarfe und techno-ökonomische Daten und deren Trends im städtischen Straßengüterverkehr – leichte Lkw .....	180
Tabelle XIII-8: Bilanz der Primärenergieträger im Szenario „Verkehrsentlastung“ .....	181
Tabelle XIII-9: Bilanz der Endenergien nach Sektoren im Szenario „Verkehrsentlastung“ .....	182
Tabelle XIII-10: Bilanz der Endenergieträger im Verkehr im Szenario „Verkehrsentlastung“ .....	182
Tabelle XIII-11: Bilanz der Netto-Stromerzeugung im Szenario „Verkehrsentlastung“ .....	182
Tabelle XIII-12: Bilanz der CO <sub>2</sub> -Emissionen im Szenario „Verkehrsentlastung“ .....	183
Tabelle XIII-13: Bilanz der Systemkosten im Szenario „Verkehrsentlastung“ .....	183
Tabelle XIII-14: Bilanz der Primärenergieträger im Szenario „Energiewende“ .....	184

Tabelle XIII-15: Bilanz der Endenergien der Sektoren im Szenario „Energiewende“ .....	184
Tabelle XIII-16: Bilanz der Endenergieträger im Verkehr im Szenario „Energiewende“ .....	184
Tabelle XIII-17: Bilanz der Stromerzeugung im Szenario „Energiewende“ .....	185
Tabelle XIII-18: Bilanz der CO <sub>2</sub> -Emissionen im Szenario „Energiewende“ .....	185
Tabelle XIII-19: Bilanz der Systemkosten im Szenario „Energiewende“ .....	185
Tabelle XIII-20: Bilanz der Primärenergieträger im Szenario „Sektorenziel“ .....	186
Tabelle XIII-21: Bilanz der Endenergien der Sektoren im Szenario „Sektorenziel“ .....	186
Tabelle XIII-22: Bilanz der Endenergieträger im Verkehr im Szenario „Sektorenziel“ .....	186
Tabelle XIII-23: Bilanz der Stromerzeugung im Szenario „Sektorenziel“ .....	187
Tabelle XIII-24: Bilanz der CO <sub>2</sub> -Emissionen im Szenario „Sektorenziel“ .....	187
Tabelle XIII-25: Bilanz der Systemkosten im Szenario „Sektorenziel“ .....	187
Tabelle XIII-26: Bilanz der Stromerzeugung im Szenario „Energiewende&Demografie“ .....	188
Tabelle XIII-27: Bilanz der CO <sub>2</sub> -Emissionen im Szenario „Energiewende&Demografie“ .....	188
Tabelle XIII-28: Bilanz der Stromerzeugung im Szenario „Energiewende&Offpeak“ .....	189
Tabelle XIII-29: Bilanz der CO <sub>2</sub> -Emissionen im Szenario „Energiewende&Offpeak“ .....	189

## XII. Literaturverzeichnis

- ageb (2016) *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2015*. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. Abgerufen am 30.03.2017 von [http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=ausw\\_28072016\\_ovk.pdf](http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausw_28072016_ovk.pdf).
- Agsten, M. (2011) „Einfluss gesteuerten Ladens von Elektrofahrzeugen auf die Netzbetriebsführung bei volatiler Windeinspeisung“. (Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing.) Technische Universität Ilmenau.
- Aichinger, W. (2015) *Elektromobilität im städtischen Wirtschaftsverkehr - Chancen und Handlungsspielräume in den Kommunen*. Berlin: Deutsche Institut für Urbanistik. Abgerufen am 23.05.2016 von <http://www.difu.de/publikationen/2014/elektromobilitaet-im-staedtischen-wirtschaftsverkehr.html>.
- Anderson, J.; Bergfeld, M.; Hoffmann, N.; et al. (2016) *LADEN2020 Schlussbericht Konzepte zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur in Deutschland von heute bis 2020*. Berlin: DLR, Institut für Verkehrsforschung. Abgerufen am 04.03.2016 von [http://www.dlr.de/vf/Portaldata/12/Resources/dokumente/projekte/laden2020/LADEN2020\\_Schlussbericht.pdf](http://www.dlr.de/vf/Portaldata/12/Resources/dokumente/projekte/laden2020/LADEN2020_Schlussbericht.pdf).
- Arndt, W.-H.; Döge, N.; & Marker, Stefanie (2016) *Elektrifizierungspotential kommerzieller Kraftfahrzeug-Flotten im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource in städtischen Verteilnetzen*. Universitätsverlag der TU Berlin. — 978-3-7983-2801-3
- Bacher, J.; Pöge, A.; & Wenzig, K. (2010) *Clusteranalyse - Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren*. 3. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH. — 978-3-486-58457-8
- Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; et al. (2016) *Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung*. 14. Springer. (Springer Lehrbuch). — 978-3-662-46075-7
- Bafa (2017) „Elektromobilität (Umweltbonus) - Zwischenbilanz zum Antragsstand vom 28. Februar 2017“.
- BDEW (2017) *Erhebung der Ladeinfrastruktur vom 30.06.2017*. Abgerufen am 30.01.2018 von [https://www.bdew.de/media/documents/PI\\_20171024\\_Anlage\\_Grafiken-Erhebung-Ladeinfrastruktur.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/PI_20171024_Anlage_Grafiken-Erhebung-Ladeinfrastruktur.pdf).
- BDEW (2012) „Standardlastprofile“. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). Abgerufen am 26.04.2012 von [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE\\_Standartlastprofile](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Standartlastprofile).
- Becker, U.; Gerike, R.; & Völlings, A. (1999) *Gesellschaftliche Ziele von und für Verkehr*. Dresden: Dresdner Institut für Verkehr und Umwelt e. V. (Heft 1 der Schriftenreihe).
- BMU (2016) *Klimaschutzplan 2050, Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Abgerufen am 26.05.2018 von [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf).



- BMVI (2015) *Elektromobilität in Haushalten und Flotten: Was beeinflusst die Kauf- und Nutzungsbereitschaft?* Berlin. (Begleitforschung zu den Modellregionen Elektromobilität des BMVI), Abgerufen am 01.03.2016 von [https://www.now-gmbh.de/content/5-service/4-publikationen/1-begleitforschung/now\\_broschuere\\_emob\\_haushalte\\_flotten.pdf](https://www.now-gmbh.de/content/5-service/4-publikationen/1-begleitforschung/now_broschuere_emob_haushalte_flotten.pdf).
- BMVI (2016a) „Förderrichtlinie Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge“. *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Abgerufen am 02.05.2017 von <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Elektromobilitaet/Ladeinfrastruktur/Ladeinfrastruktur.html>.
- BMVI (2012) „Modellregionen Elektromobilität“. Abgerufen am 11.10.2016 von <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/modellregionen-elektromobilitaet.html>.
- BMVI (2016b) *Nationaler Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe als Teil der Umsetzung der Richtlinie 2014/94/EU*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Abgerufen am 23.02.2018 von <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-nationaler-strategierahmen-afid.pdf>.
- BMWi (2018) *Energiedaten - Zahlen und Fakten*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Abgerufen am 02.02.2018 von <http://www.bmwi.de/Navigation/DE/Themen/energiedaten.html>.
- BMWi (2016) *Fünfter Monitoring-Bericht der Energiewende*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Abgerufen am 02.02.2016 von <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.pdf>.
- BMWi (2017) *Strom 2030: Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Abgerufen am 30.08.2017 von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/strom-2030-ergebnispapier.pdf>.
- BMWi (2015) *Vierter Monitoring-Bericht der Energiewende*. Berlin. Abgerufen am 02.02.2016 von <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=739122.html>.
- BMWi & BMU (2010) *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Abgerufen am 23.03.2012 von <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/energiekonzept-2010,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- Bundesnetzagentur (2017) „Ladesäulekarte“. Abgerufen am 18.04.2017 von [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/HandelundVertrieb/Ladesaeulenkarte/Ladesaeulenkarte\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/HandelundVertrieb/Ladesaeulenkarte/Ladesaeulenkarte_node.html).
- Dallinger, D. (2012) „Plug-in electric vehicles integrating fluctuating renewable electricity“. Kassel: Universität Kassel. Abgerufen am 03.02.2014 von <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-86219-460-5.volltext.frei.pdf>.

- dena (2012) *dena- Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030*. Abgerufen am 02.03.2015 von [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen\\_und\\_Projekte/Energiesysteme/dena-Verteilnetzstudie/121210\\_denaVNS\\_Ergebniszusammenfassung\\_PSG\\_pdf.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen_und_Projekte/Energiesysteme/dena-Verteilnetzstudie/121210_denaVNS_Ergebniszusammenfassung_PSG_pdf.pdf).
- DESTATIS (2015) *Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung*. Wiesbaden: Statistische Bundesamt. Abgerufen am 02.10.2015 von <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/Vorausberechnung/Bevoelkerung/BevoelkerungDeutschland2060Presse5124204159004.pdf>.
- EAF0 (2017) „Vehicle stats“. *European Alternative Fuels Observatory*. Abgerufen von <http://www.eafo.eu/>.
- EASE & EERA (2013) *Joint EASE/EERA recommendations for a European Energy Storage Technology Development Roadmap Towards 2030*. [www.ease-storage.eu](http://www.ease-storage.eu).
- Edwards, R.L.; Hass, H.; Larive, J.-F.; et al. (2014) *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Report Version 4.a.* (JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration), Abgerufen am 22.04.2017 von [http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/files/documents/wtw\\_report\\_v4a\\_march\\_2014\\_final.pdf](http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/files/documents/wtw_report_v4a_march_2014_final.pdf).
- Everitt, B.; Landau, S.; Leese, M.; et al. (2011) *Cluster Analysis*. 5. Auflage. Wiley VCH. — 978-0-470-74991-3
- Fayyad, U.; Piatestsky-Shapiro, G.; & Smyth, P. (1996) „From Data Mining to Knowledge Discovery in Database“. *AI Magazine*. 17(3), S. 37–54.
- Fischer, A. (2011) „Innovative materials for today's and future generations of batteries“. *DPG AKE Herbstsitzung 2011*. Bad Honnef. 21.10.2011, [http://www.fze.uni-saar-land.de/AKE\\_Archiv/AKE2011H/AKE2011H\\_Vortraege/AKE2011H\\_07Fischer\\_Chemistry-forBatteries.pdf](http://www.fze.uni-saar-land.de/AKE_Archiv/AKE2011H/AKE2011H_Vortraege/AKE2011H_07Fischer_Chemistry-forBatteries.pdf).
- Franke, F. (2013) „Nachhaltige Mobilität mit begrenzten Ressourcen: Erleben und Verhalten im Umgang mit der Reichweite von Elektrofahrzeugen“. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz. Abgerufen am 03.02.2016 von [http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/13350/Dissertation\\_Thomas\\_Franke.pdf](http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/13350/Dissertation_Thomas_Franke.pdf).
- Französische Botschaft (2015) „Klimaschutz: Das französische Bonus-Malussystem beim Neuwagenkauf“. Abgerufen am 09.03.2015 von <http://www.ambafrance-de.org/Klimaschutz-Das-franzoesische-Bonus>.
- Frenzel, I.; Jarass, J.; Trommer, S.; et al. (2015) *Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland - Nutzerprofile, Anschaffung Fahrzeugnutzung*. (Forschungsbericht) Berlin. Abgerufen am 11.10.2016 von [http://www.dlr.de/vf/Portaldata/12/Resources/dokumente/projekte/pakt2/Ergebnisbericht\\_E-Nutzer\\_2015.pdf](http://www.dlr.de/vf/Portaldata/12/Resources/dokumente/projekte/pakt2/Ergebnisbericht_E-Nutzer_2015.pdf).
- Frontier Economics (2014a) *Strommarkt in Deutschland – Gewährleistet das derzeitige Marktdesign Versorgungssicherheit?* London, UK. Abgerufen am 03.03.2016 von <http://frontier-economics.com/de/documents/2014/07/strommarkt-in-deutschland-gewaehrleistet-das-derzeitige-marktdesign-versorgungssicherheit-frontier-report.pdf>.

- Frontier Economics (2014b) *Strommarkt in Deutschland - Gewährleistet das derzeitige Marktdesign Versorgungssicherheit?* (Bericht für das BMWi) Köln.
- Funk, C. (2008) „Versorgung des europäischen Marktes durch synthetische Kraftstoffe aus Biomasse“. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Funk, C. & Linssen, J. (2007) „Bewertung der energetischen Nutzung von Biomasse in Deutschland bis 2030“. Gehalten auf der: 16. *Symposium Bioenergie 2007 - OTTI Energie Kolleg*. <https://juser.fz-juelich.de/record/2180>.
- Geitmann, S. (2010) *Alternative Kraftstoffe - Flüssiggas – Biodiesel & Pflanzenöl – Wasserstoff & Strom Womit fahre ich am besten?* 2. Auflage. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. — 978-3-937863-15-3
- Geske, J. (2014) „Präferenzen, Geschäftsmodelle und Marktpotential der V2G-Technologie“. Gehalten auf der: 13. *Symposium Energieinnovation*. Graz, Österreich. Abgerufen am 12.02.2014 von <https://juser.fz-juelich.de/record/172469>.
- Götz, A. (2016) „Zukünftige Belastungen von Niederspannungsnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität“. Chemnitz: Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Abgerufen am 02.02.2018 von [http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/19840/Goetz\\_Andreas\\_Dissertation.pdf](http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/19840/Goetz_Andreas_Dissertation.pdf).
- Götz, M.; Lefebvre, J.; Mörs, F.; et al. (2016) „Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review“. *Renewable Energy*. 85, S. 1371–1390, doi:10.1016/j.renene.2015.07.066.
- Grube, T. (2014) „Potentiale des Strommanagements zur Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs von Pkw“. Jülich, Forschungszentrum: TU Berlin. <http://juser.fz-juelich.de/record/151986>.
- Günther, C.; Jossen, A.; & Späth, V. (2010) „Lifetime Models for Lithium-ion Batteries“. Gehalten auf der: *2nd Technical Conference Advanced Battery Technologies for Automobiles and Their Electric Power Grid Integration*. Mainz, Germany.
- H. U. Heinrichs; J. Linssen; & B. Gillissen (2017) „Climate policy beyond the European emissions trading system: Spotlight on the transport sector in Germany“. Gehalten auf der: *2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. S. 1–6, doi:10.1109/EEM.2017.7981994.
- Hacker, F.; von Waldenfels, R.; & Mottschall, M. (2015) *Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen*. Berlin: Öko-Institut e.V. Abgerufen am 05.05.2016 von <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Gesamtbericht-Wirtschaftlichkeit-von-Elektromobilitaet.pdf>.
- Hair, J.; Black, W.; & Babin, B. (2014) *Multivariate Data Analysis*. 7. Auflage. Essex: Person Education Limited. — 0-13-813263-1
- Hautzinger, H.; Mayer, K.; Schmidt, J.; et al. (2005) *Fahrleistungserhebung 2002 - Inländerfahrleistung*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW. (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 120). — ISBN 3-86509-277-2
- Heinrichs, H. & Markewitz, P. (2015) „A Coal Phase-out in Germany – Clean, Efficient and Affordable?“. *Energy Procedia*. 75, S. 2541–2547, doi:10.1016/j.egypro.2015.07.283.

- Heinrichs, H.U. (2013) „Analyse der langfristigen Auswirkungen von Elektromobilität auf das deutsche Energie-system im europäischen Energieverbund“. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Abgerufen am 30.01.2015 von <http://www.ksp.kit.edu/download/1000037111>.
- Heinrichs, H.U.; Schumann, D.; Vögele, S.; et al. (2017) „Integrated assessment of a phase-out of coal-fired power plants in Germany“. *Energy*. 126, S. 285–305, doi:10.1016/j.energy.2017.03.017.
- Helms, H.; Jöhrens, J.; Hanusch, J.; et al. (2011) *UMBRéLA Umweltbilanzen Elektromobilität*. Heidelberg: IFEU. (Wissenschaftlicher Grundlagenbericht), Abgerufen am 02.02.2017 von [https://www.ifeu.de/Umbrela/images/pdf/ifeu\\_\(2011\)\\_UMBReLA\\_grundlagenbericht.pdf](https://www.ifeu.de/Umbrela/images/pdf/ifeu_(2011)_UMBReLA_grundlagenbericht.pdf).
- Hirsch-Kreinsen, H. (2016) „Arbeit und Technik bei Industrie 4.0“. (Arbeit und Digitalisierung), 66. Jahrgang (18-19/2016).
- Hochfeld, C.; Jung, A.; Klein-Hitpaß, A.; et al. (2017) *Agora Verkehrswende: Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern*. Berlin und München: Agora Verkehrswende. Abgerufen am 28.03.2017 von [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12\\_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen\\_WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf).
- Hocking, M.; Kan, J.; Young, P.; et al. (2016) *Industry Lithium 101*. Deutsche Bank Markets Research. (Deutsche Bank Markets Research), Abgerufen am 20.03.2017 von <http://europeanlithium.com/wp-content/uploads/2016/05/17052016-Lithium-research-Deutsche-Bank.compressed.pdf>.
- IfV-KIT & TNS (2016) „Mobilitätspanel Deutschland“. *Jährliche Panelbefragung von Haushalten zu ihrem Mobilitätsverhalten im Alltag*. Abgerufen am 10.11.2016 von <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/192/>.
- infas & DLR (2009) *Mobilität in Deutschland 2008 (Datenbank)*. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung. [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/02\\_MiD2008/index.htm](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/02_MiD2008/index.htm).
- infas & DLR (2010a) *Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht*. Bonn und Berlin: infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung. Abgerufen am 16.04.2012 von [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008\\_Abschlussbericht\\_I.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Abschlussbericht_I.pdf).
- infas & DLR (2010b) *Mobilität in Deutschland 2008 Variablenübersicht Autodatensatz*. Abgerufen am 12.03.2012 von [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/3\\_Variablenubersicht.zip](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/3_Variablenubersicht.zip).
- Inside EVs (2017) „Monthly Plug-In sales scorecard“. *Inside EVs*. Abgerufen am 03.03.2017 von <http://insideevs.com/monthly-plug-in-sales-scorecard/>.
- Jakobsson, N.; Gnann, T.; Plötz, P.; et al. (2016) „Are multi-car households better suited for battery electric vehicles? – Driving patterns and economics in Sweden and Germany“. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 65, S. 1–15, doi:10.1016/j.trc.2016.01.018.

- JRC (2011) *Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) - Technology Descriptions*. Brussels, Belgium: European Commission, Joint Research Centre. Abgerufen am 02.01.2016 von [https://setis.ec.europa.eu/system/files/Technology\\_Map\\_2011.pdf](https://setis.ec.europa.eu/system/files/Technology_Map_2011.pdf).
- Kasten, P.; Mottschall, M.; Köppl, W.; et al. (2016) *Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050*. (Nr. 72/2016) Berlin: Umweltbundesamt. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>.
- KBA (2016a) „Fahrzeugstatistik FZ4 2012 bis 2015,“. *Neuzulassungen nach Herstellern und Handelsnamen (FZ 4)*. Abgerufen am 06.05.2016 von [https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz4\\_n\\_uebersicht.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz4_n_uebersicht.html).
- KBA (2017) „Jahresbilanz der Neuzulassungen 2016“. Abgerufen am 13.03.2017 von [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/n\\_jahresbilanz.html?nn=644522](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/n_jahresbilanz.html?nn=644522).
- KBA (2014) *Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2013*. Flensburg. (Fahrzeugzulassungen (FZ14)), Abgerufen am 13.03.2017 von [http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2013/fz14\\_2013.pdf](http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2013/fz14_2013.pdf).
- KBA (2015) *Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2014*. (Fahrzeugzulassungen (FZ14)), Abgerufen am 13.03.2017 von [http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2014/fz14\\_2014.pdf](http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2014/fz14_2014.pdf).
- KBA (2016b) *Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2015*. (Fahrzeugzulassungen (FZ14)), [http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz14\\_2015.pdf](http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz14_2015.pdf).
- Krafftahrtbundesamt (2017a) „Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) 1. Januar 2017 FZ 25“.
- Krafftahrtbundesamt (2016) „FZ 23 - Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen 1. Januar 2015“.
- Krafftahrtbundesamt (2017b) *FZ 24 - Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen Jahr 2015*. Abgerufen am 30.01.2017 von [http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz24\\_2015\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz24_2015_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=6).
- Kuhr, D. (2014) „Im Porsche auf der Busspur“. *Süddeutsche Zeitung*. Deutschland. 2014, Abgerufen am 08.12.2015 von <http://www.sueddeutsche.de/auto/elektromobilitaetsgesetz-im-porsche-auf-der-busspur-1.2142713>.
- Laskowski, M. (2011) „Übertragungsnetz, Verteilnetz, Speicherung: Technische Ausstattung im Jahr 2020“. *VDE-Management Forum - Smart Grid 2011*. Berlin. 2011.

- Link, J. (2011) „Elektromobilität und erneuerbare Energien: Lokal optimierter Einsatz von netzgekoppelten Fahrzeugen“. Dortmund: Technische Universität Dortmund. Abgerufen am 13.12.2015 von <https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/29350/1/Dissertation.pdf>.
- Linssen, J.; Bickert, S.; Hennings, W.; et al. (2012) *Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen - Advances in Systems Analyses 1*. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH. — 978-3-89336-811-2
- Markewitz, P.; Stein, G. (Hrsg.) (2003) *Markewitz, Peter; Stein, Gotthard Das IKARUS-Projekt Energietechnische Perspektiven für Deutschland*. Jülich, Forschungszentrum: Schriften des Forschungszentrums Jülich. (Reihe Umwelt/Environment). — 978-3-89336-333-9
- Markewitz, P. & Vögele, S. (2004) „Technikspezifische CO<sub>2</sub> -Vermeidungskosten – Eine geeignete Bewertungsgröße für Treibhausgasminierungsmaßnahmen“. (Energiewirtschaftliche Tagesfragen), 54 (9).
- Martinsen, D.; Funk, C.; & Linssen, J. (2010) „Biomass for transportation fuels-A cost-effective option for the German energy supply?“. *Energy policy*. 38, S. 128–140, doi:10.1016/j.enpol.2009.08.064.
- Matthes, F.; Busche, J.; Döring, U.; et al. (2013) *Politikszenerarien für den Klimaschutz VI*. Berlin. (Climate Change 04/2013), Abgerufen am 02.02.2016 von <http://www.uba.de/uba-info-medien/4412.html>.
- Matthies, E.; Bobeth, S.; Klöckner, C.; et al. (2016) „Zur besseren Verbreitung von Elektroautos – Was können wir in Deutschland von Norwegen lernen?“. *Policy Brief Ausgabe*. 01/2016.
- McKinsey & Company (2017) „Electric Vehicle Index“. *Electric Vehicle Index*. Abgerufen am 23.03.2017 von <https://www.mckinsey.de/elektromobilitaet>.
- Muncrief, R. (2016) *NOx emissions from heavy-duty and light-duty diesel vehicles in the EU: Comparison of real-world performance and current type-approval requirements*. icct Briefing December 2016. The international council on clean transportation. Abgerufen am 31.01.2017 von [www.theicct.org](http://www.theicct.org).
- National Research Council (2003) *A Century of Innovation: Twenty Engineering Achievements that Transformed our Lives*. Washington, DC, USA: The National Academies Press.
- Nationale Plattform Elektromobilität (2014) *Fortschrittsbericht 2014 - Bilanz der Marktvorbereitung*. Abgerufen am 19.08.2015 von [http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/NPE\\_Fortschrittsbericht\\_2014\\_Barrierefrei.pdf](http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_Fortschrittsbericht_2014_Barrierefrei.pdf).
- Nobis (2016) „Entwicklung und Anwendung eines Modells zur Analyse der Netzstabilität in Wohngebieten mit Elektrofahrzeugen, Hausspeichersystemen und PV-Anlagen“. München: Technische Universität München. Abgerufen am 09.08.2016 von <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1276473/1276473.pdf>.

- Nobis, P.; Pelling, C.; & Staudacher, T. (2011) *eFlott - Wissenschaftliche Analysen zur Elektromobilität*. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. Abgerufen am 02.02.2016 von [https://www.ffe.de/download/article/333/eFlott\\_Abschlussbericht\\_FfE.pdf](https://www.ffe.de/download/article/333/eFlott_Abschlussbericht_FfE.pdf).
- NPE (2015) *Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland - Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015*. Berlin: AG 3 – Ladeinfrastruktur und Netzintegration, Nationale Plattform Elektromobilität. Abgerufen am 20.12.2015 von [http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/NPE\\_AG3\\_Statusbericht\\_LIS\\_2015\\_barr\\_bf.pdf](http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG3_Statusbericht_LIS_2015_barr_bf.pdf).
- Nuhn, H. & Hesse, M. (2006) *Verkehrsgeographie*. 1. Auflage. Paderborn: Schöningh. (Grundriss Allgemeine Geographie). — 978-3-8252-2687-9
- Nykqvist, B. & Nilsson, M. (2015) „Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles“. *Nature Clim. Change*. 5 (4), S. 329–332.
- oemof (2018) *oemof - open energy system modelling framework*. Abgerufen am 20.05.2018 von <https://github.com/oemof/oemof>.
- Oertel, D. (2008) *Energiespeicher, Stand und Perspektiven*. (Arbeitsbericht Nr. 123) Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Abgerufen am 02.05.2014 von <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab123.pdf>.
- Palzer, A. & Henning, H.-M. (2013) „A Future German Energy System with a Dominating Contribution from Renewable Energies: A Holistic Model Based on Hourly Simulation“. *Energy Technology*. 2 (1), S. 13–28, doi:10.1002/ente.201300083.
- Peters, A.; Doll, C.; Plötz, P.; et al. (2013) *Konzepte der Elektromobilität - Ihre Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt*. — 978-3-8360-8138-2
- Peukert, M. (2012) *RWE E-Mobility: Technische Lösungsansätze & Beispiele aus der Praxis*. Abgerufen am 05.06.2016 von [www.nua.nrw.de/uploads/media/RWE\\_E-MOBILITY\\_Technische\\_Loesungsansaeetze\\_und\\_Beispiele\\_aus\\_der\\_Praxis\\_Peukert.pdf](http://www.nua.nrw.de/uploads/media/RWE_E-MOBILITY_Technische_Loesungsansaeetze_und_Beispiele_aus_der_Praxis_Peukert.pdf).
- Pfenninger, S.; Hawkes, A.; & Keirstead, J. (2014) „Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 33, S. 74–86.
- Pflüger, B.; Tersteegen, B.; & Franke, B. (2017) *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario*. Berlin. (Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie), Abgerufen am 02.03.2018 von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf>.
- Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A.; et al. (2015a) *Markthochlaufszzenarien für Elektrofahrzeuge - Langfassung*. Abgerufen am 20.06.2017 von <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Fraunhofer-ISI-Markthochlaufszzenarien-Elektrofahrzeuge-Langfassung.pdf>.

- Plötz, P.; Gnann, T.; Ullrich, S.; et al. (2015b) *Elektromobilität in gewerblichen Flotten*. Abgerufen am 20.05.2017 von [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Get\\_eReady\\_web.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Get_eReady_web.pdf).
- Pregger, T.; Schmid, S.; Wille-Hausmann, B.; et al. (2012) *Perspektiven von Elektro-/Hybridfahrzeugen in einem Versorgungssystem mit hohem Anteil dezentraler und erneuerbarer Energiequellen*. (Nr. Schlussbericht BMWi – FKZ 0328005 A-C) Stuttgart: DLR-TT Systemanalyse und Technikbewertung. Abgerufen am 12.10.2014 von [http://www.dlr.de/fk/Portaldata/40/Resources/dokumente/publikationen/Perspektiven\\_von\\_Elektro-\\_und\\_Hybridfahrzeugen\\_in\\_einem\\_Versorgungssystem\\_mit\\_hohem\\_Anteil\\_dezentraler\\_und\\_erneuerbarer\\_Energiequellen.pdf](http://www.dlr.de/fk/Portaldata/40/Resources/dokumente/publikationen/Perspektiven_von_Elektro-_und_Hybridfahrzeugen_in_einem_Versorgungssystem_mit_hohem_Anteil_dezentraler_und_erneuerbarer_Energiequellen.pdf).
- Radke, S. (2017) *Verkehr in Zahlen 2017/2018*. Hamburg: DVV Media Group. — 978-3-87154-617-4
- Reuter, B. (2016) „Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten zur Rohstoff- und Technologieauswahl für Elektrofahrzeuge“. (Reihe Fahrzeugtechnik) München: Technische Universität München. <http://www.dr.hut-verlag.de/978-3-8439-2758-1.html>.
- Robinius, M.; Linßen, J.; Grube, T.; et al. (2018) *Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles*. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag. (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, FZJ-2018-00702), <http://juser.fz-juelich.de/record/842477>. — 978-3-95806-295-5
- Samweber, F.; Fischhaber, S.; & Nobis, P. (2015) „Electric Mobility as a Functional Energy Storage in Comparison to On-Site Storage Systems for Grid Integration“. *Energy Procedia*. 73 (94), S. 94–102, doi:10.1016/j.egypro.2015.07.572.
- Schendera, C. (2010) *Clusteranalyse mit SPSS*. 1. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH. — 978-3-486-58691-6
- Schindler, V. (1997) *Kraftstoffe für morgen - Eine Analyse von Zusammenhängen und Handlungsoptionen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. — 978-3-642-64497-9
- Schlesinger, M.; Hofer, P.; Kemmler, A.; et al. (2014) *Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin. Abgerufen am 02.05.2016 von <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-kurzfassung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- Scholz, Y. (2012) „Renewable energy based electricity supply at low costs - Development of the REMix model and application for Europe“. Stuttgart: Universität Stuttgart. [http://elib.dlr.de/77976/1/REMix\\_Thesis\\_YS.pdf](http://elib.dlr.de/77976/1/REMix_Thesis_YS.pdf).
- Shell & Prognos (2014) *Shell PKW-Szenarien bis 2040 Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität*. Hamburg: Shell Deutschland Oil GmbH. Abgerufen am 13.02.2017 von [https://www.prognos.com/uploads/tx\\_atwpubdb/140900\\_Prognos\\_Shell\\_Studie\\_Pkw-Szenarien2040.pdf](https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/140900_Prognos_Shell_Studie_Pkw-Szenarien2040.pdf).



- Soares, J.; Borges, N.; Fotouhi Ghazvini, M.A.; et al. (2016) „Scenario generation for electric vehicles' uncertain behavior in a smart city environment“. *Energy*. 111, S. 664–675, doi:10.1016/j.energy.2016.06.011.
- Stenzel, P.; Hennings, W.; & Linssen, J. (2017) „Energiespeicher“. *BWK*. 69 (5), S. 42–55.
- Stenzel, P.; Linssen, J.; Stemmer, S.; et al. (2018) „Energiespeicher“. *BWK*. 70 (5), S. 35–46.
- Sterner, M.; Stadler, I. (Hrsg.) (2018) *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*; , I. Stadler; Springer 2018; ISBN: 9783662488928. Springer Vieweg. — 978-3-662-48892-8
- Stöckl, G. (2014) „Integration der Elektromobilität in das Energieversorgungssystem“. München: Technische Universität München.
- Thielmann, A.; Sauer, A.; Isenmann, R.; et al. (2012) *Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030*. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. (Technologie-Roadmapping am Fraunhofer ISI: Konzepte – Methoden – Praxisbeispiele; Nr.4).
- Trost, T. (2016) „Erneuerbare Mobilität im motorisierten Individualverkehr - Modellgestützte Szenarioanalyse der Marktdiffusion alternativer Fahrzeugantriebe und deren Auswirkungen auf das Energieversorgungssystem“. Leipzig: Universität Leipzig,. Abgerufen am 10.06.2017 von <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-432324.html>.
- Vogler-Ludwig, K.; Düll, N.; & Kriechel, B. (2016) *Arbeitsmarkt 2030 – Wirtschaft und Arbeitsmarkt im digitalen Zeitalter*. Bielefeld. Abgerufen am 06.07.2017 von [wbw-open-access.de](http://wbw-open-access.de).
- Vogt, M. & Bongard, S. (2015) *Treiber und Hemmnisse bei der Anschaffung von Elektroautos - Ergebnisse der Nutzerbefragung von elektromobilitätsinteressierten Personen im Rahmen der Begleit- und Wirkungsforschung*. Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW). (Schaufenster Elektromobilität), Abgerufen am 02.02.2017 von [http://schaufenster-elektromobilitaet.org/media/media/documents/dokumente\\_der\\_begleit\\_und\\_wirkungsforschung/Ergebnisbericht\\_10\\_Nutzerumfrage\\_BuW.pdf](http://schaufenster-elektromobilitaet.org/media/media/documents/dokumente_der_begleit_und_wirkungsforschung/Ergebnisbericht_10_Nutzerumfrage_BuW.pdf).
- Weijermars, R.; Taylor, P.; Bahn, O.; et al. (2012) „Review of models and actors in energy mix optimization – can leader visions and decisions align with optimum model strategies for our future energy systems?“. *Energy Strategy Reviews*. (Energy Strategy Reviews), 1 (1), S. 5–18.
- Weinberg, J. (2014) „Die zukünftige Entwicklung der straßengebundenen Mobilität in Deutschland“. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Welder, L.; Ryberg, S.; Kotzur, L.; et al. (2017) „Spatio-Temporal Optimization of a Future Energy System for Power-to-Hydrogen Applications in Germany“. Gehalten auf der: *SDEWES Proceedings*. Dubrovnik, Croatia. Abgerufen am 10.02.2018 von <http://www.dubrovnik2017.sdewes.org/>.
- Wermuth, M. (2012) *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KID 2010) -Schlussbericht*. Abgerufen am 08.02.2015 von <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/240/9/KiD2010-Schlussbericht.pdf>.

- Wermuth, M.; Wirth, R.; Neef, C.; et al. (2003) *Kontinuierliche Befragung des Wirtschaftsverkehrs in unterschiedlichen Siedlungsräumen - Phase 2, Hauptstudie. (Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland - KiD 2002). Band 1 (Textteil)*. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen. Abgerufen am 24.04.2012 von <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/194/>.
- Wieland, T.; Reiter, M.; Schmutzger, E.; et al. (2015) „Probabilistische Methode zur Modellierung des Ladeverhaltens von Elektroautos anhand gemessener Daten elektrischer Ladestationen – Auslastungsanalysen von Ladestationen unter Berücksichtigung des Standorts zur Planung von elektrischen Stromnetzen“. *Elektrotechnik und Informatik*. 132 (3), S. 160–167, doi:10.1007/s00502-015-0299-0.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; et al. (2017) *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw*. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung (ISI). Abgerufen am 23.03.2018 von [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-potentiale-hybridoberleitungs-lkw.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-potentiale-hybridoberleitungs-lkw.pdf?__blob=publicationFile).
- Wietschel, M.; Ullrich, S.; Markewitz, P.; et al. (Hrsg.) (2015) *Energietechnologien der Zukunft Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze*. 1. Heidelberg: Springer Vieweg. — 978-3-658-07129-5
- WVI & BMVBS (2012) „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland - Public Use File (KiD 2010)“. *Erhebung zum motorisierten Wirtschaftsverkehr in Deutschland*. Abgerufen von [www.clearingstelle-verkehr.de](http://www.clearingstelle-verkehr.de).
- Zeng, Y.; Cai, Y.; Huang, G.; et al. (2011) „A Review on Optimization Modeling of Energy Systems Planning and GHG Emission Mitigation under Uncertainty“. *Energies*. 4 (10), S. 1624–1656.

### XIII. Anhang

#### XIII.1 xEV Datenbank

Tabelle XIII-1: Neufahrzeugverkäufe und Kennwerte der Fahrzeuge - BEV

Fahrzeugparameter	Nissan Leaf	Tesla Model S 75 D	Mitsubishi i-MiEV, Citroen C-Zero, Peugeot Lion	Ford Focus Electric	Toyota RAV4 EV	Honda Fit EV	Smart ED	Chev. Spark EV	Fiat 500e	BMW i3	Mercedes B-Class ED	Kia Soul EV	
Nennkapazität [kWh]	24	75	16	23	42	20	17	19	11	19	28	23	
NEFZ, EPA Reichweite [km]	199	480	150	162	166	120	140	130	100	190	200	162	
Normverbrauch elektr. [kWh/100 km]	15,0	19,0	12,6	15,4	25,2		12,0	17,1	12,0	12,9	16,6	15,4	
Pkw Segment	C	F	A	C	G	C	A	A	A	B	V	V	
Listenpreis inkl. Batterie [€]	29.265	86.000	19.360	34.900	40.000		22.600	25.000	26.750	34.500	39.200	28.900	
<b>Neufahrzeugverkäufe</b>													
2016	Welt												
	USA	14006	29421	94	901			657	3035	5330	7625	1728	
	EU28 & EFTA	18614	12358	1893							9739	4440	
	D	1121	1474	154							1521	1384	
2015	Welt												
	USA	17269	25202	115	1582			1387	2629	6194	11024	1906	1015
	EU28 & EFTA	15345	16643	1477							6216	5812	
	D	948	1582	21							940	3839	
2014	Welt												
	USA	30200	17300	196	1964	1184	407	2594	1145	5132	6092	774	359
	EU28 & EFTA	10142	5032	696	51			2951			3199		
	D	812	814	30							1246	14	
2013	Welt	22610	17650	1096	1738	1068	569	923	539	645			
	USA												
	EU28 & EFTA	6162	1823	1283	101			2941	456		881		
	D	855	204	41							413		
2012	Welt	9819	2650	588	685	192	93						
	USA												
	EU28 & EFTA	2835		5969	15			969			14		
	D	454	1000	811	15			734			14		

## Fortsetzung Tabelle XIII-1

Fahrzeugparameter	VW e-Golf	Tesla Model X	Tesla Roadster	Renault Fluence Z:E	Renault ZOE	VW E-Up	MIA	THINK CITY	BLUECAR	Volvo C30 EV	Chevrolet Bolt / Opel Ampera E	Hyundai Ionic	Mercedes B 250E
Nennkapazität [kWh]	24	75	56	22	22	19	12	23	30	24	60	28	28
NEFZ, EPA Reichweite [km]	190	417	350	185	240	160	93	160	250	150	520	250	200
Normverbrauch elektr [kWh/100 km]	12,7	19,0	19,2	14,4	13,3	11,7	15,5	12,0	12,0	19,2	11,5	11,5	16,6
Pkw Segment	C	G	S	C	B	A	A	A	B	C	C	C	V
Listenpreis inkl. Batterie [€]	34.900	96.000	98.000	30.000	25.000	26.900	15.000	36.000	23.800		35.000	33.300	39.200
Neufahrzeugverkäufe													
2016	Welt												
	USA	3937	18223								579		632
	EU28 & EFTA	6678	3708			21338	2576					1113	
	D		449			2804	592					57	437
2015	Welt												
	USA	4232	214										
	EU28 & EFTA	11170				18566	2976						2593
	D	989				1787	534						485
2014	Welt												
	USA	357											
	EU28 & EFTA	1361			91	10378	2330		88	1100	64		
	D	601				1498	1354						162
2013	Welt												
	USA												
	EU28 & EFTA	92			325	8539	1021		19	638			
	D					1019	150						
2012	Welt												
	USA												
	EU28 & EFTA	76		167	1325	41	65	517	65	1543	119		
	D	51		68	213	0	65	111	12	0	12		

Quelle: [Inside EVs, 2017], [EAFO, 2017], [KBA, 2014], [KBA, 2015], [KBA, 2016b], [KBA, 2017], Herstellerangaben



## Fortsetzung Tabelle XIII-2

Fahrzeugparameter	Honda Accord PHEV	Porsche Panamera S-E	Cadillac ELR	BMW i8	Porsche Cayenne SE	Porsche 918 Spyder	Mercedes S500 PHV	BMW X5 DriveE	Volvo XC90	Hyundai Sonata PHV	Audi A3 e-tron	Fisker Karma
Nennkapazität [kWh]	7	9	17	7	11	5	9	9	9	10	9	20
NEFZ, EPA Reichweite [km]	21	36	60	37	38	25	33	31	43	38	56	60
Normverbrauch elektr. [kWh/100 km]	17,0	16,2	25,0	11,9	20,8	21,0	16,0	16,5	19,0	19,0	11,4	18,0
Normverbrauch Kraftstoff [l/100 km]	5,0	3,1	2,4	2,1	3,4	3,1	2,8	3,3	2,1	2,5	1,5	2,2
Pkw Segment	D	F	D	S	J	S	F	J	J	D	C	S
Preis inkl. Batterie [€]	40500	104340	68000	130000	86100	768000	110300	69200	76700	35800	39400	108900
2016	Welt											
	USA		393	534	1594	2111		550	5995	2015	3095	4280
	EU28 & EFTA								5394	9589		
	D									689		1615
2015	Welt											
	USA	64	407	1024	2265	1103	203	118	892	86	160	49
	EU28 & EFTA								1539	2859		11100
	D									77		1854
2014	Welt											
	USA	449	879	1310	555	100						
	EU28 & EFTA		964		1003	367	97	138				908
	D											460
2013	Welt	526	86	6								
	USA											
	EU28 & EFTA				24							91
	D											
2012	Welt											
	USA											
	EU28 & EFTA											273
	D											52

Quelle: [Inside EVs, 2017], [EAFO, 2017], [KBA, 2014], [KBA, 2015], [KBA, 2016b], [KBA, 2017], Herstellerangaben

## XIII.2 Datensatzaufbereitung der MiD 2008

**Tabelle XIII-3: Liste genutzter Variablen und deren Beschreibung**

### Haushaltsdatensatz

Variable	Beschreibung
anzerw	Anzahl der Personen im Haushalt ab 18 Jahren
bland	Bundesland
fahrj_h	Fahrleistung des Haushalts [km/a]
grkpkw	Gründe für Nicht-Pkw-Besitz: Prioritäten
h01	Angabe zur Art des Haushalts
h02	Anzahl Personen im Haushalt (inkl. Person 1)
h04_3	Anzahl Autos
hh_gew	Gewichtungsfaktor Haushalte
hheink	ungefähres monatliches HH-Nettoeinkommen
hhid	Haushalts-ID
hhtyp	Haushaltstyp: differenziert nach Haushaltsgröße und Alter
klasse_h	Höchste Typklasse der Autos im Haushalt
ktyp	BBSR Kreistyp
ktyp_zsg	BBSR Zusammengefasster Kreistyp nach ROB2005
oek_stat	ökonomischer Status des Haushalts
polgk	politische Gemeindegrößenklasse
psu_nr	Primary Sampling Unit (laufende Nummer)
rtyp	BBSR Regionsgrundtyp
rtypd7	BBSR differenzierter Regionstyp
sgtyp	BBSR Stadt- und Gemeindetyp (4er) 2006
sgtypd	BBSR differenzierter Stadt- und Gemeindetyp (7er) 2006
sourceid	Methode des Haushalts-Interviews
status_h	Höchster Status der Autos im Haushalt
westost	West-Ost-Kennung

### Personendatensatz

Variable	Beschreibung
anzerw	Anzahl der Personen im Haushalt ab 18 Jahren
anzkm	Tagesstrecke [km] (Summe wegkm_k)
anzmin	Unterwegszeit [min] (Summe wegmin_k)
bland	Bundesland
co2tag_p	CO <sub>2</sub> -Emission der Wege der Person am Stichtag [kg]
h02	Anzahl Personen im Haushalt (inkl. Person 1)
hhgr06	Anzahl der Personen im Haushalt unter 6
hhgr14	Anzahl der Personen im Haushalt unter 14
hhgr18	Anzahl der Personen im Haushalt unter 18
hhid	Haushalts-ID
hhtyp	Haushaltstyp: differenziert nach Haushaltsgröße und Alter
hp_alter	Alter (fehlende Angaben ergänzt aus HH-Interview)
hp_altg1	Altersgruppen (Variante 1)
hp_altg2	Altersgruppen (Variante 2)
hp_altg3	Altersgruppen (Variante 3)
hp_beruf	Sind Sie zurzeit berufstätig? (Ang. aus Pers- / HH-Interview)
hp_besch	Tätigkeit (inkl. Diff. Berufstätigk., Ang. aus Pers.- / HH-Int.)

Variable	Beschreibung
hp_bkat	Art / Umfang Berufstätigkeit (Angaben Pers- / HH-Interview)
hp_sex	Geschlecht (fehlende Angaben ergänzt aus HH-Interview)
hp_taet	Tätigkeit (Angaben aus Pers- / HH-Interview)
int_typ9	Form des Personen- / Wegeinterviews (9 Typen)
ktyp	BBSR Kreistyp
ktyp_zsg	BBSR Zusammengefasster Kreistyp nach ROB2005
lebensph	Lebensphase (gebildet aus hp_besch)
mobil	Mobilität am Stichtag
oek_stat	ökonomischer Status des Haushalts
ov_seg	Verkehrsmittel-Nutzersegment
p_gew	Gewichtungsfaktor Personen
p031	Nutzungshäufigkeit Auto
p16_1	Wie sind Ihre Arbeitszeiten hauptsächlich organisiert?
pergrup	Verhaltenshomogene Personengruppe (9 Gruppen)
pergrup1	Verhaltenshomogene Personengruppe (12 Gruppen)
pid	Personen-ID
polgk	politische Gemeindegrößenklasse
rbw1	In welcher Branche / welchem Wirtschaftszweig beschäftigt?
rtyp	BBSR Regionsgrundtyp
rtypd7	BBSR differenzierter Regionstyp
s01	War der Stichtag für Sie persönlich ein normaler Tag?
s04	Stand Ihnen ein Kfz für private Fahrten zur Verfügung?
saison	Jahreszeit des Stichtags
sgtyp	BBSR Stadt- und Gemeindetyp (4er) 2006
sgtypd	BBSR differenzierter Stadt- und Gemeindetyp (7er) 2006
stich_j	Stichtag (Kalenderjahr)
stich_m	Stichtag (Kalendermonat)
stichtag	Stichtag (Wochentag)
stichwo	Stichtag (Kalenderwoche)
w12	Anzahl weiterer Wege am Stichtag

### Autodatensatz

Variable	Beschreibung
a_gew	Gewichtungsfaktor Autos
alter_hn	Alter Hauptnutzer (Basis hp_alter)
anzerw	Anzahl der Personen im Haushalt ab 18 Jahren
anzfahrt	Anzahl der Fahrten des Autos am Stichtag
anzfpers	insgesamt mit dem Auto am Stichtag beförderte Personen
besch_hn	Beschäftigung Hauptnutzer (Basis hp_besch)
besgrad	durchschnittlicher Besetzungsgrad der Fahrten am Stichtag
bland	Bundesland
durchkm	durchschnittliche Entfernung der Fahrten am Stichtag [km]
durchmin	durchschnittliche Dauer der Fahrten am Stichtag [min]
fahrlj	Jahresfahrleistung [km]
gesfkm	Gesamtwegestrecke des Autos am Stichtag [km]
gesfmin	Gesamtfahrzeit des Autos am Stichtag [min]
h02	Anzahl Personen im Haushalt (inkl. Person 1)
h04_3	Anzahl Autos im Haushalt
h041	Hersteller
h0411	Üblicher Stellplatz
h0412	Baujahr (JJJJ)



Variable	Beschreibung
h0413	Erwerbsjahr (JJJJ)
h0414	Aktueller Kilometerstand
h0416	Suche nach Stellplatz
h042	Typ bzw. Modellbezeichnung
h044	Personen-Nr. des Hauptnutzers im Haushalt
h046	Halter
h048	Antriebstyp
hhid	Haushalts-ID
klasse	Typklasse (nach Hersteller und Leistung)
kW	kW (inkl. umgerechnete PS-Angaben)
oek_stat	ökonomischer Status des Haushalts
polgk	politische Gemeindegrößenklasse
ps	PS (inkl. umgerechnete kW-Angaben)
seg_kba	Pkw-Segmenteinteilung nach KBA
sex_hn	Geschlecht Hauptnutzer (Basis hp_sex)
status	Statusklasse (nach Typklasse und Baujahr)
stich_j	Stichtag (Kalenderjahr)
stich_m	Stichtag (Kalendermonat)
stichtag	Stichtag (Wochentag)
stichwo	Stichtag (Kalenderwoche)
vmid	ID von Auto im Haushalt

### Wegdatensatz

Variable	Bezeichnung
co2weg	CO2-Emission Gesamtweg [kg]
en_dat	Ende Weg (Stichtag / Folgetag)
en_min	Ende Weg (Minute)
en_std	Ende Weg (Stunde)
en_time	Ende Weg (Uhrzeit)
hhid	Haushalts-ID
hvm	Hauptverkehrsmittel
hvm_diff	Hauptverkehrsmittel (differenziert)
hvm_oev	Hauptverkehrsmittel (ÖV-Variante)
hwzweck	Hauptzweck des Weges
int_typ9	Form des Personen- / Wegeinterviews (9 Typen)
kraftweg	Kraftstoffverbrauch Gesamtweg (nur für MIV-Wege) [Liter]
lkw_f	Genutztes Verkehrsmittel: Lkw (als Fahrer)
lkw_mf	Genutztes Verkehrsmittel: Lkw (als Mitfahrer)
ov_seg	Verkehrsmittel-Nutzersegment
p070	überwiegende Fahrscheinart ÖPNV
pid	Personen-ID
pkw_f	Genutztes Verkehrsmittel: Auto (als Fahrer)
pkw_mf	Genutztes Verkehrsmittel: Auto (als Mitfahrer)
st_dat	Beginn Weg (Stichtag / Folgetag)
st_min	Beginn Weg (Minute)
st_std	Beginn Weg (Stunde)
st_stdg	Startzeit des Weges gruppiert
st_time	Beginn Weg (Uhrzeit)
stich_j	Stichtag (Kalenderjahr)
stich_m	Stichtag (Kalendermonat)
stichtag	Stichtag (Wochentag)

Variable	Bezeichnung
stichwo	Stichtag (Kalenderwoche)
tempo	Wegegeschwindigkeit [km/h]
vm_kombi	Verkehrsmittelkombination
w_gew	Gewichtungsfaktor Wege
w01	Ausgangspunkt des ersten Weges
w04	Wegezzweck
w04_dzw	detaillierter Wegezzweck
w04_sons	sonstiger Wegezzweck: offene Nennung
w044	Zielpunkt bei Einkaufs-, Erledigungs-, Freizeitwegen
w05_5	Genutztes Verkehrsmittel: Auto
w05_7	Genutztes Verkehrsmittel: Lkw
w061	Fahrer oder Mitfahrer?
w062	Auto aus dem eigenen Haushalt?
w063	Welches Auto? ID des Haushaltsautos (vmid)
w13	Zielpunkt des Weges
wegkm_k	Wegelänge [km] korrigiert
wegmin_k	Wegedauer [min] korrigiert
wid	Wege-ID (Primärschlüssel)
wsid	sortierte Wege-ID (mit rbW)
wsource	Quelle für Wegeangaben

Quelle: [infas & DLR, 2010b]

### XIII.3 Statistische Beschreibung der Nutzergesamt und Cluster

Tabelle XIII-4: Korrelationsmatrix der Parameter Samstag bis Sonntag

Korrelationskoeffizient [dimensionslos]	Startzeit	Endzeit	Ø Standzeit am Tag	Tagesfahr- leistung
<b>Startzeit</b>	1,000	0,354	-0,406	-0,119
<b>Endzeit</b>	0,354	1,000	0,388	0,251
<b>Ø Standzeit am Tag</b>	-0,406	0,388	1,000	0,109
<b>Tagesfahrleistung</b>	-0,119	0,251	0,109	1,000

Quelle: eigene Berechnung

### XIII.4 Ergebnisse der Clusteranalyse der gewerblichen Pkw und leichte Lkw

**Tabelle XIII-5: Ergebnisse der Clusterung; Mittelwerte für die Wochentagsaggregate Di bis Do, gewerbliche Pkw und leichte Lkw**

Grundgesamtheit				
	gewerbliche Pkw		leichte Lkw	
	Anzahl	Mittelwert	Anzahl	Mittelwert
Startzeit	3.428	9:21	2.024	08:04
Endzeit		13:07		12:06
Standzeit Tag [h]		1,27		1,39
Tagesfahrleistung [km]		78,34		56,33

Aufteilung in zwei Cluster				
	gewerbliche Pkw		leichte Lkw	
	Anzahl	Mittelwerte	Anzahl	Mittelwert
Cluster C2-1				
Startzeit	1.738	8:22	1.690	8:22
Endzeit		10:05		10:05
Standzeit Tag [h]		0,48		0,48
Tagesfahrleistung [km]		48,17		48,17
Cluster C2-2				
Startzeit	1.690	10:22	1.066	7:19
Endzeit		16:13		8:41
Standzeit Tag [h]		2,08		0,32
Tagesfahrleistung [km]		109,35		40,11

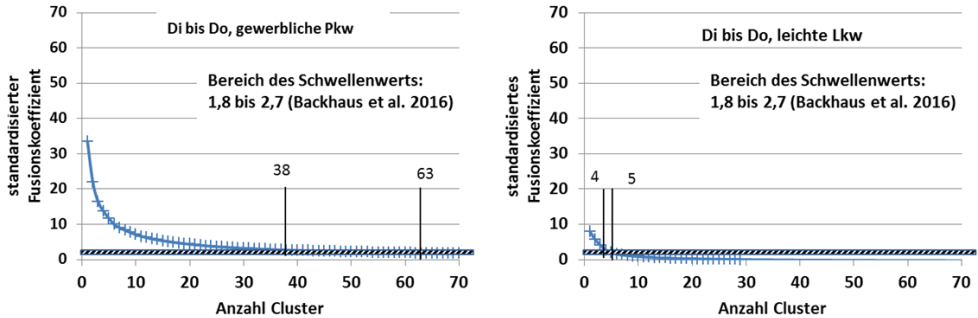
Aufteilung in drei Cluster				
	gewerbliche Pkw		leichte Lkw	
	Anzahl	Mittelwerte	Anzahl	Mittelwert
Cluster C3-1				
Startzeit	1.738	8:22	767	7:27
Endzeit		10:05		15:36
Standzeit Tag [h]		0,48		3,01
Tagesfahrleistung [km]		48,17		86,22
Cluster C3-2				
Startzeit	456	15:15	1.066	7:19
Endzeit		17:03		8:41
Standzeit Tag [h]		0,60		0,32
Tagesfahrleistung [km]		47,43		40,11
Cluster C3-3				
Startzeit	1.234	8:34	191	14:50
Endzeit		15:55		17:09
Standzeit Tag [h]		2,62		0,87
Tagesfahrleistung [km]		132,24		26,82

Aufteilung in vier Cluster				
	gewerbliche Pkw		leichte Lkw	
	Anzahl	Mittelwerte	Anzahl	Mittelwert
Cluster C4-1				
Startzeit	1.738	8:22	530	7:39
Endzeit		10:05		15:37
Standzeit Tag [h]		0,48		1,65
Tagesfahrleistung [km]		48,17		101,80
Cluster C4-2				
Startzeit	456	15:15	237	6:59
Endzeit		17:03		15:35
Standzeit Tag [h]		0,60		6,04
Tagesfahrleistung [km]		47,43		51,36
Cluster C4-3				
Startzeit	883	8:44	1.066	7:19
Endzeit		15:51		8:41
Standzeit Tag [h]		1,56		0,32
Tagesfahrleistung [km]		161,93		40,11
Cluster C4-4				
Startzeit	351	8:07	191	14:50
Endzeit		16:04		17:09
Standzeit Tag [h]		5,29		0,87
Tagesfahrleistung [km]		57,52		26,82

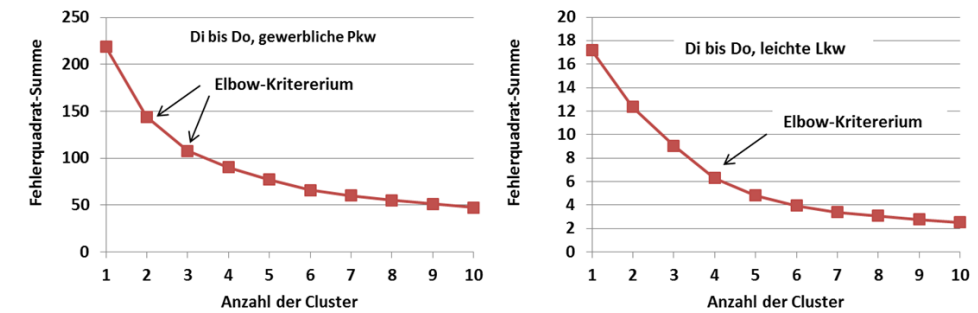
Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung XIII-1: Ergebnisse des Mojena-Tests zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl, Wochentagsaggregat Di bis Do, gewerbliche Pkw und leichte Lkw**



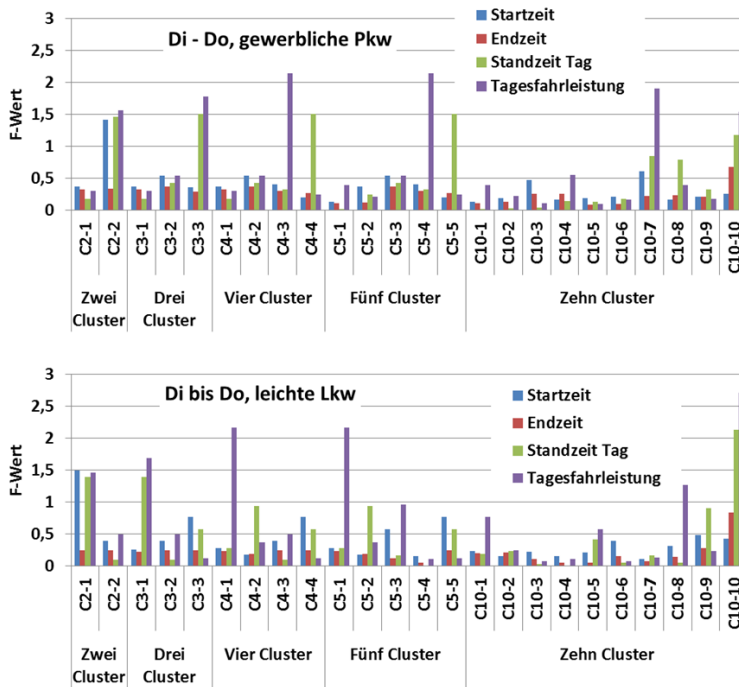
Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung XIII-2: Elbow-Kriterium zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl für gewerbliche Pkw und leichte Lkw**



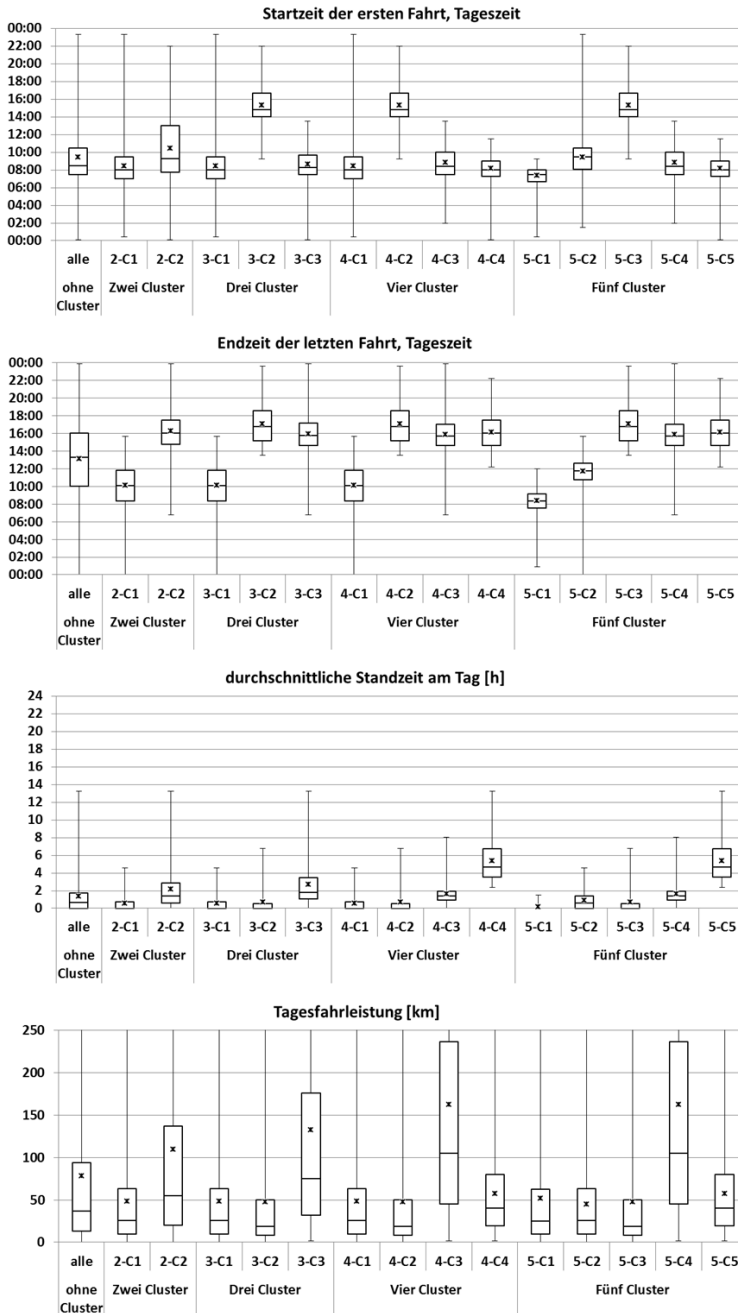
Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung XIII-3: Ergebnisse des F-Test für gewählte Clusterzahlen, Wochentagsaggregat Di bis Do, gewerbliche Pkw und leichte Lkw**



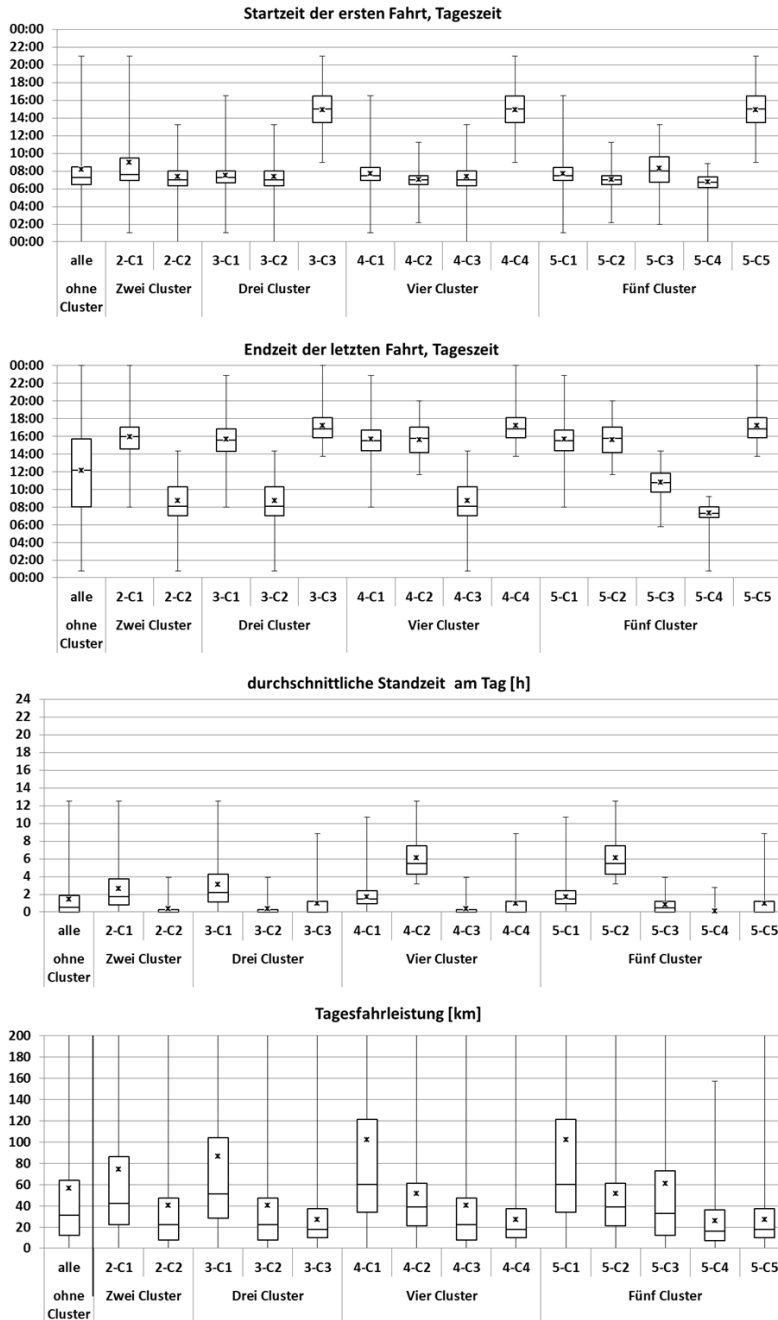
Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung XIII-4: Boxplot der Parameter Startzeit, Endzeit, Standzeit am Tag und Tagesfahrleistung, Wochentagsaggregat Di bis Do, gewerbliche Pkw**



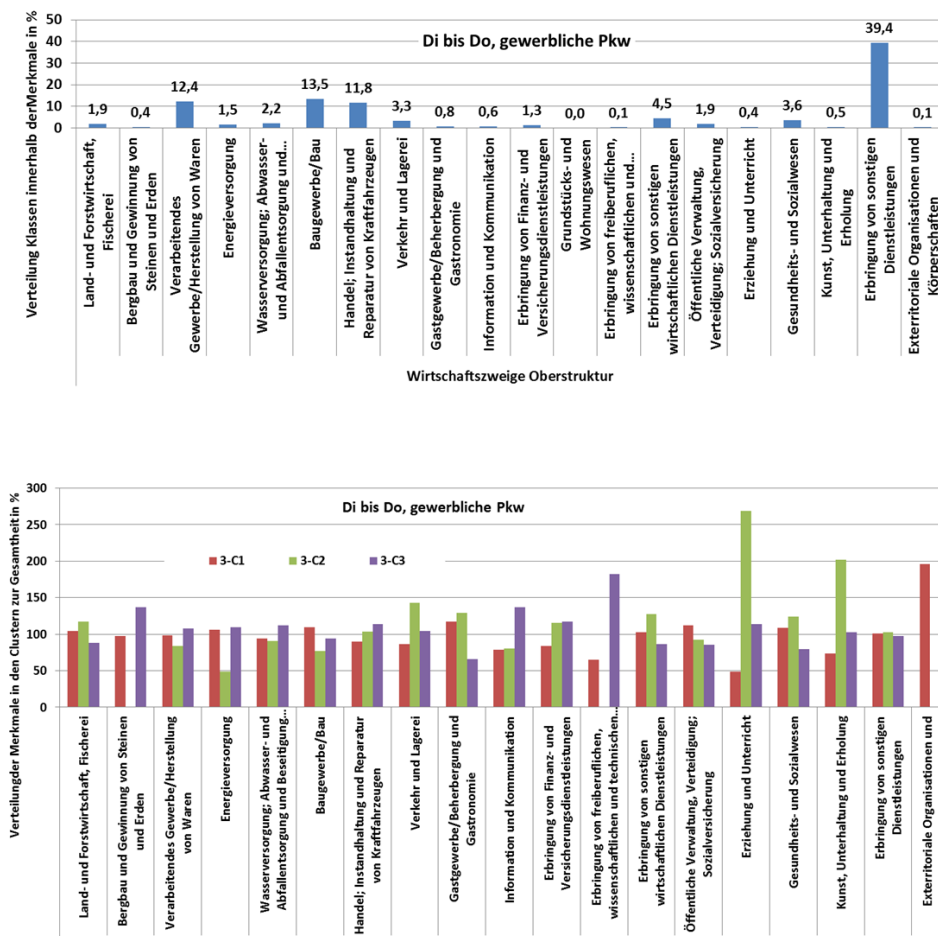
Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung XIII-5: Boxplot der Parameter Startzeit, Endzeit, Standzeit am Tag und Tagesfahrleistung, Wochentagsaggregat Di bis Do, leichte Lkw**



Quelle: eigene Berechnung

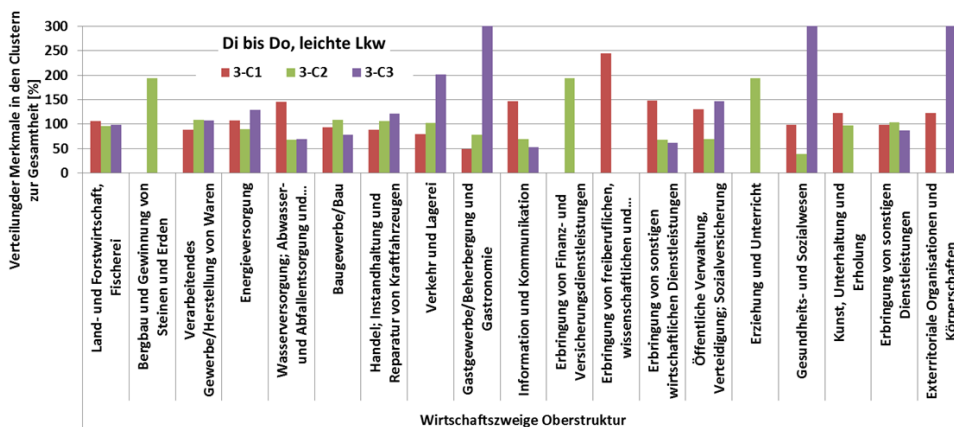
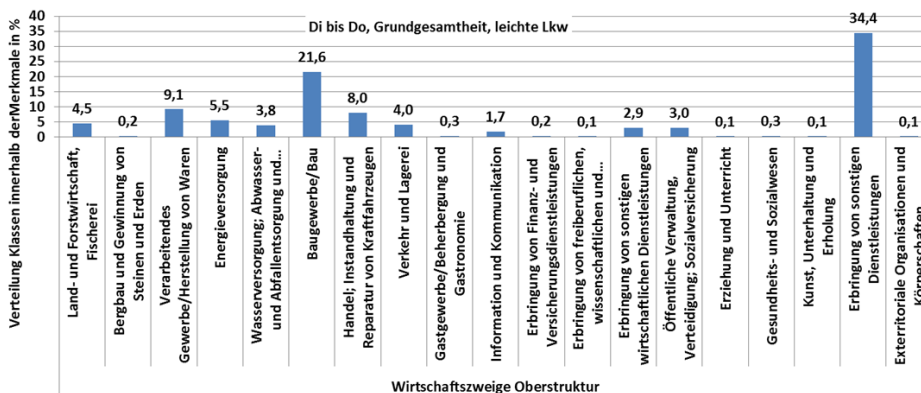
**Abbildung XIII-6: Verhältnis der Häufigkeiten von Merkmalen in den Clustern zur Grundgesamtheit, Wochentagsaggregat Di bis Do, gewerbliche Pkw**



Quelle: eigene Berechnung

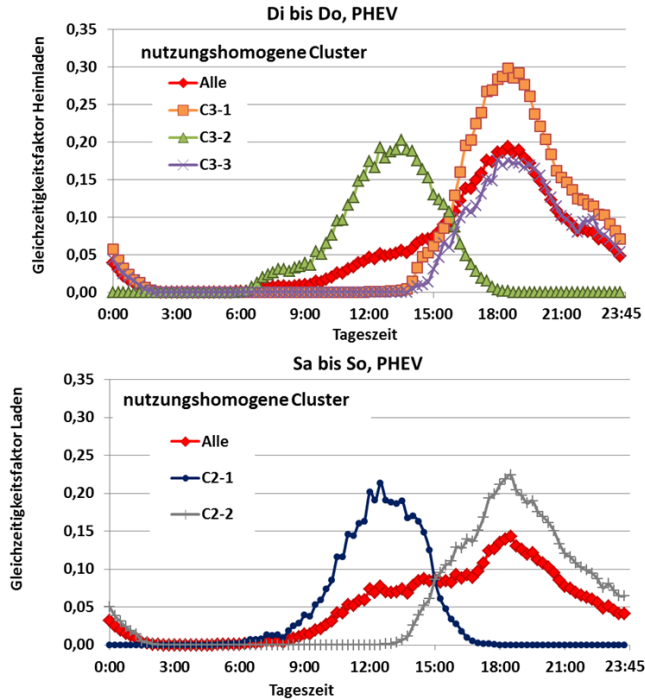


**Abbildung XIII-7: Verhältnis der Häufigkeiten von Merkmalen in den Clustern zur Grundgesamtheit, Wochentagsaggregat Di bis Do, leichte Lkw**



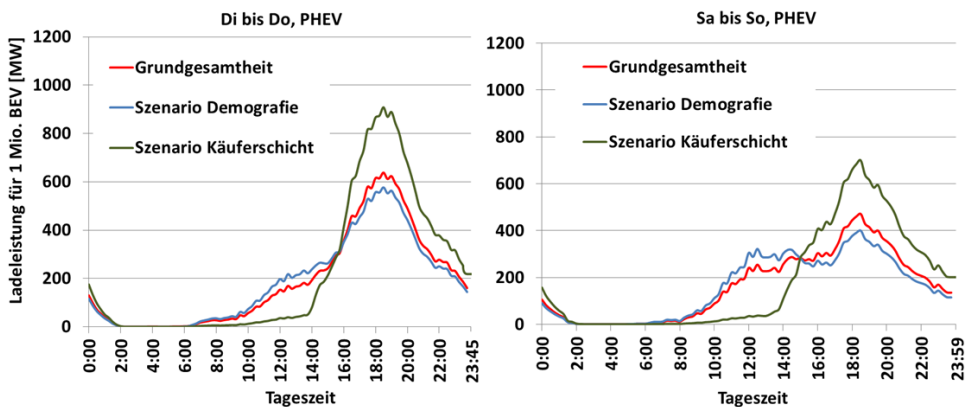
Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung XIII-8: Tagesprofil der Gleichzeitigkeit Ladeleistungsnachfrage für PHEV-Nutzer @ Heimpladen 3,3 kW, Strombedarf 19,9 kWh/100km, CDM-Reichweite 50 km**



Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung XIII-9: Vergleich der Ladeleistungskurve für die Szenarien „Demografie“ und „Käuferschicht“, 1 Mio. PHEV**



Quelle: eigene Berechnung

### XIII.5 Techno-ökonomische Annahmen zu den Fahrzeugen und Ergebnistabellen der Energieszenario-Rechnungen

**Tabelle XIII-6: Angenommene Energiebedarfe und techno-ökonomische Daten der Pkw und deren Trends für den städtischen und außerstädtischen Personenverkehr**

Verbrauch im städtischen Verkehr GJ/100km												
Jahr	BEV	FCEV	Benzin	Benzin-HEV	Diesel	Diesel-HEV	CNG	LPG	Benzin PHEV Strom	Benzin PHEV Kraftstoff	Diesel PHEV Strom	Diesel PHEV Kraftstoff
2015	0,074	0,135	0,239	0,217	0,229	0,209	0,217	0,239	0,075	0,000	0,086	0,000
2020	0,071	0,116	0,213	0,194	0,204	0,186	0,194	0,213	0,072	0,000	0,082	0,000
2025	0,067	0,097	0,197	0,179	0,190	0,173	0,179	0,197	0,069	0,000	0,079	0,000
2030	0,063	0,081	0,165	0,150	0,162	0,147	0,150	0,165	0,067	0,000	0,076	0,000
2035	0,061	0,080	0,162	0,147	0,158	0,144	0,147	0,162	0,065	0,000	0,073	0,000
2040	0,060	0,078	0,159	0,144	0,155	0,141	0,144	0,159	0,063	0,000	0,071	0,000
2045	0,059	0,076	0,156	0,141	0,152	0,138	0,141	0,156	0,061	0,000	0,069	0,000
2050	0,058	0,075	0,152	0,139	0,149	0,136	0,139	0,152	0,060	0,000	0,068	0,000
Verbrauch im außerstädtischen Verkehr GJ/100km												
2015	0,066	0,119	0,211	0,192	0,203	0,185	0,196	0,211	0,038	0,093	0,043	0,088
2020	0,063	0,104	0,190	0,173	0,182	0,166	0,176	0,190	0,036	0,090	0,041	0,085
2025	0,060	0,087	0,176	0,160	0,170	0,155	0,163	0,176	0,035	0,087	0,039	0,084
2030	0,057	0,073	0,149	0,135	0,146	0,132	0,138	0,149	0,033	0,085	0,038	0,082
2035	0,055	0,072	0,146	0,133	0,143	0,130	0,135	0,146	0,032	0,084	0,037	0,081
2040	0,054	0,070	0,143	0,130	0,140	0,127	0,133	0,143	0,031	0,084	0,036	0,080
2045	0,053	0,069	0,140	0,127	0,137	0,125	0,130	0,140	0,030	0,083	0,035	0,080
2050	0,052	0,068	0,137	0,125	0,134	0,122	0,127	0,137	0,030	0,083	0,034	0,080
Investitionen € <sub>2000</sub> /Pkw												
Jahr	BEV	FCEV	Benzin	Benzin-HEV	Diesel	Diesel-HEV	CNG	LPG	Benzin PHEV	Diesel PHEV		
2015	24.255	25.721	19.342	24.059	21.068	25.062	22.054	20.646	26.559	27.562		
2020	24.012	25.464	19.729	24.540	21.278	25.312	22.275	20.853	26.310	27.312		
2025	24.012	25.209	20.124	25.031	21.491	25.565	22.497	21.061	26.263	27.165		
2030	24.493	25.209	20.526	25.532	21.706	25.821	22.722	21.272	26.489	27.121		
2035	24.983	25.462	20.731	25.787	21.923	26.079	22.950	21.485	26.787	27.079		
2040	25.232	25.716	20.939	26.045	22.142	26.340	23.179	21.700	27.045	27.340		
2045	25.485	25.973	21.148	26.305	22.364	26.603	23.411	21.917	27.305	27.603		
2050	25.740	26.233	21.360	26.568	22.588	26.869	23.645	22.136	27.568	27.869		
Fixkosten € <sub>2000</sub> /Jahr												
2015	2.162	2.058	1.547	1.925	1.685	2.005	1.764	1.685	1.747	1.885		
2020	2.140	2.037	1.578	1.963	1.702	2.025	1.782	1.702	1.778	1.902		
2025	2.140	2.017	1.610	2.002	1.719	2.045	1.800	1.719	1.810	1.919		
2030	2.183	2.017	1.642	2.043	1.736	2.066	1.818	1.736	1.842	1.936		
2035	2.226	2.037	1.659	2.063	1.754	2.086	1.836	1.754	1.859	1.954		
2040	2.249	2.057	1.675	2.084	1.771	2.107	1.854	1.771	1.875	1.971		
2045	2.271	2.078	1.692	2.104	1.789	2.128	1.873	1.789	1.892	1.989		
2050	2.294	2.099	1.709	2.125	1.807	2.150	1.892	1.807	1.909	2.007		

## Fortsetzung Tabelle XIII-6

Verbrauch im städtischen Verkehr GJ/100km										
Jahr	BEV	FCEV	Benzin	Benzin-HEV	Diesel	Diesel-HEV	CNG	LPG	Benzin PHEV	Diesel PHEV
<b>Betriebskosten €<sub>2000</sub>/100km (ohne Kraftstoff/Strom)</b>										
2015	1,83	3,46	2,03	2,11	2,36	2,33	3,21	2,32	2,30	2,64
2020	1,87	3,43	2,07	2,15	2,38	2,36	3,25	2,35	2,34	2,66
2025	1,90	3,40	2,12	2,19	2,40	2,38	3,28	2,37	2,38	2,68
2030	1,94	3,40	2,16	2,24	2,43	2,40	3,31	2,39	2,42	2,71
2035	1,96	3,43	2,18	2,26	2,45	2,43	3,34	2,42	2,44	2,73
2040	1,98	3,46	2,20	2,28	2,48	2,45	3,38	2,44	2,46	2,76
2045	2,00	3,50	2,22	2,31	2,50	2,48	3,41	2,47	2,49	2,78
2050	2,02	3,53	2,25	2,33	2,53	2,50	3,45	2,49	2,51	2,81
<b>Jahresfahrleistung km</b>										
2015	10.900	11.466	11.700	16.730	16.730	16.730	16.730	16.730	16.730	16.730
2020	11.118	11.466	11.466	15.910	15.910	15.910	15.910	15.910	15.910	15.910
2025	11.118	10.950	10.950	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972
2030	11.174	10.950	10.950	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972
2035	11.283	10.950	10.950	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972
2040	11.365	10.950	10.950	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972
2045	11.447	10.950	10.950	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972
2050	11.529	10.950	10.950	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972	14.972

Quelle: [Linssen et al., 2012], [Arndt et al., 2016], [Schlesinger et al., 2014] und eigene Annahmen IKARUS Modelldaten

**Tabelle XIII-7: Angenommene Energiebedarfe und techno-ökonomische Daten und deren Trends im städtischen Straßengüterverkehr – leichte Lkw**

Verbrauch im städtischen Verkehr GJ/100km										
Jahr	BEV	FCEV	Benzin	Benzin-HEV	Diesel	Diesel-HEV	CNG	LPG	Diesel PHEV Strom	Diesel PHEV Kraftstoff
2015	0,095	0,349	0,510	0,459	0,449	0,404	0,449	0,400	0,099	0,033
2020	0,083	0,340	0,497	0,448	0,438	0,394	0,438	0,390	0,065	0,028
2025	0,080	0,332	0,485	0,437	0,427	0,384	0,427	0,380	0,064	0,025
2030	0,076	0,325	0,473	0,426	0,416	0,375	0,416	0,371	0,062	0,022
2035	0,075	0,318	0,461	0,415	0,406	0,365	0,406	0,361	0,061	0,022
2040	0,073	0,312	0,450	0,405	0,396	0,356	0,396	0,352	0,060	0,022
2045	0,072	0,307	0,438	0,394	0,386	0,347	0,386	0,343	0,059	0,022
2050	0,071	0,303	0,427	0,385	0,376	0,338	0,376	0,335	0,058	0,022
Investitionen € <sub>2000</sub> /Pkw										
Jahr	BEV	FCEV	Benzin	Benzin-HEV	Diesel	Diesel-HEV	CNG	LPG	Diesel PHEV	
2015	35.248	28.943	20.643	24.772	22.095	27.715	23.751	21.857	34.625	
2020	30.021	28.653	20.849	25.019	22.316	27.981	23.988	22.075	29.180	
2025	27.978	28.367	21.058	25.269	22.539	28.248	24.228	22.296	28.787	
2030	26.659	28.367	21.268	25.522	22.764	28.519	24.471	22.519	29.058	
2035	26.659	28.650	21.481	25.777	22.992	28.792	24.715	22.744	29.331	
2040	26.917	28.937	21.696	26.035	23.222	29.068	24.963	22.972	29.607	
2045	27.177	29.226	21.913	26.295	23.454	29.347	25.212	23.201	29.885	
2050	27.440	29.518	22.132	26.558	23.689	29.628	25.464	23.433	30.167	
Fixkosten € <sub>2000</sub> /Jahr										
2015	2.162	2.058	1.547	1.925	1.685	2.005	1.764	1.685	1.885	
2020	2.140	2.037	1.578	1.963	1.702	2.025	1.782	1.702	1.902	
2025	2.140	2.017	1.610	2.002	1.719	2.045	1.800	1.719	1.919	
2030	2.183	2.017	1.642	2.043	1.736	2.066	1.818	1.736	1.936	
2035	2.226	2.037	1.659	2.063	1.754	2.086	1.836	1.754	1.954	
2040	2.249	2.057	1.675	2.084	1.771	2.107	1.854	1.771	1.971	
2045	2.271	2.078	1.692	2.104	1.789	2.128	1.873	1.789	1.989	
2050	2.294	2.099	1.709	2.125	1.807	2.150	1.892	1.807	2.007	

## Fortsetzung Tabelle XIII-7

Jahr	BEV	FCEV	Benzin	Benzin-HEV	Diesel	Diesel-HEV	CNG	LPG	Diesel PHEV
<b>Betriebskosten €<sub>2000</sub>/100km (ohne Kraftstoff/Strom)</b>									
2015	3,73	9,87	8,06	7,59	4,99	4,75	9,49	9,59	5,37
2020	3,92	9,98	8,40	7,91	5,15	4,90	9,80	9,89	5,14
2025	4,30	10,32	8,95	8,43	5,43	5,17	10,34	10,44	5,71
2030	4,67	11,11	9,83	9,26	5,91	5,62	11,24	11,35	6,46
2035	4,67	11,22	9,93	9,35	5,96	5,68	11,35	11,47	6,46
2040	4,67	11,34	10,03	9,45	6,02	5,73	11,47	11,58	6,46
2045	4,67	11,45	10,13	9,54	6,08	5,79	11,58	11,70	6,46
2050	4,67	11,57	10,23	9,64	6,14	5,85	11,70	11,81	6,46
<b>Jahresfahrleistung km</b>									
2015	21.622	21.622	21.622	21.622	24.413	24.420	21.622	21.622	24.807
2020	20.440	20.440	20.440	20.440	23.941	23.949	20.440	20.440	23.004
2025	20.489	20.489	20.489	20.489	23.326	23.333	20.489	20.489	22.133
2030	20.895	20.895	20.895	20.895	22.927	22.934	20.895	20.895	22.030
2035	20.895	20.895	20.895	20.895	23.042	23.049	20.895	20.895	22.030
2040	20.895	20.895	20.895	20.895	23.157	23.164	20.895	20.895	22.030
2045	20.895	20.895	20.895	20.895	23.273	23.280	20.895	20.895	22.030
2050	20.895	20.895	20.895	20.895	23.389	23.396	20.895	20.895	22.030

Quelle: [Linssen et al., 2012], [Arndt et al., 2016], [Schlesinger et al., 2014] und eigene Annahmen IKARUS Modelldaten

## XIII.6 Ergebnis-Tabellen der Szenarien

## Szenario „Verkehrsentlastung“

Tabelle XIII-8: Bilanz der Primärenergieträger im Szenario „Verkehrsentlastung“

Periode	Steinkohle [PJ]	Braunkohle [PJ]	Sonstige [PJ]	Erdöl [PJ]	Gase [PJ]	Erneuerbare [PJ]	Kernenergie [PJ]	Gesamt [PJ]
2015	970	1.305	282	4.092	2.504	1.644	985	11.782
2020	1.056	695	278	3.741	2.536	2.137	669	11.113
2025	928	689	272	3.591	2.546	2.604	0	10.629
2030	628	392	239	3.276	2.490	3.124	0	10.148
2035	522	288	282	3.039	2.390	2.871	0	9.392
2040	499	79	282	2.822	2.405	2.992	0	9.079
2045	534	27	282	2.591	2.068	3.143	0	8.645
2050	351	23	282	2.507	1.618	3.283	0	8.064

Quelle: eigene Analysen

Tabelle XIII-9: Bilanz der Endenergien nach Sektoren im Szenario „Verkehrsentlastung“

Periode	Industrie [PJ]	Haushalte [PJ]	GHD [PJ]	Verkehr [PJ]	Gesamt [PJ]
2015	2.008	2.504	1.289	2.414	8.216
2020	1.917	2.530	1.239	2.315	8.001
2025	1.882	2.508	1.156	2.243	7.789
2030	1.924	2.513	1.006	2.072	7.515
2035	1.726	2.353	1.017	1.941	7.037
2040	1.689	2.141	944	1.852	6.626
2045	1.751	1.916	803	1.788	6.257
2050	1.553	1.710	671	1.789	5.724

Quelle: eigene Analysen

Tabelle XIII-10: Bilanz der Endenergieträger im Verkehr im Szenario „Verkehrsentlastung“

Periode	LPG [PJ]	Benzin fossil [PJ]	Benzin erneuerbar [PJ]	Diesel fossil [PJ]	Diesel erneuerbar [PJ]	Kerosin [PJ]	Erdgas fossil [PJ]	Erdgas erneuerbar [PJ]	Wasserstoff [PJ]	Strom [PJ]	Gesamt [PJ]
2015	19,3	657,3	65,7	1.097,2	99,9	421,2	0,0	0,1	0,0	53,4	2.414,1
2020	34,6	462,6	61,2	1.090,0	122,2	467,8	0,0	0,5	0,0	76,5	2.315,4
2025	64,7	412,4	56,4	1.041,2	117,1	463,6	0,0	2,5	0,0	84,6	2.242,7
2030	107,8	218,3	51,0	1.016,8	114,9	464,5	0,0	8,7	0,8	89,0	2.071,7
2035	116,2	176,8	27,0	924,1	102,1	448,6	0,0	36,3	0,8	109,2	1.941,2
2040	127,7	131,8	24,7	786,5	86,5	454,7	0,0	71,6	0,8	167,7	1.851,8
2045	138,0	129,4	24,7	678,2	73,4	441,9	0,0	73,7	0,8	227,8	1.787,9
2050	148,4	126,2	24,1	691,5	74,1	427,0	0,0	75,3	0,8	221,6	1.789,1

Quelle: eigene Analysen

Tabelle XIII-11: Bilanz der Netto-Stromerzeugung im Szenario „Verkehrsentlastung“

Periode	Kernenergie [TWh]	Braunkohle [TWh]	Steinkohle [TWh]	Gase [TWh]	Wasser [TWh]	Wind On/Offshore [TWh]	PV [TWh]	Sonstige [TWh]	KWK [TWh]	Gesamt [TWh]
2015	84,3	117,6	24,3	35,0	20,7	100,6	40,9	44,9	30,6	498,9
2020	57,0	62,5	44,1	45,0	20,6	130,8	52,2	50,4	28,1	490,8
2025	0,0	56,8	40,3	52,2	20,6	161,9	52,2	66,3	26,7	477,1
2030	0,0	29,7	0,0	49,0	25,0	203,5	52,2	70,8	31,1	461,3
2035	0,0	19,2	9,8	36,2	25,0	204,6	52,2	72,4	31,0	450,6
2040	0,0	6,5	0,0	28,3	26,1	246,6	63,7	71,8	35,4	478,5
2045	0,0	0,0	0,0	16,4	26,1	279,7	63,7	70,4	30,6	486,8
2050	0,0	0,0	0,0	9,3	26,1	276,4	52,2	77,5	31,6	473,0

Quelle: eigene Analysen

**Tabelle XIII-12: Bilanz der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Verkehrsentlastung“**

Periode	Primärenergie [kt]	Stromerzeugung [kt]	Wärmeerzeugung [kt]	Raffinerie [kt]	Gasversorgung [kt]	Veredlung [kt]	Industrie [kt]	Verkehr [kt]	Haushalte [kt]	GHD [kt]	Gesamt [kt]
2015	2.899	155.456	24.215	10.944	938	9.101	77.733	160.597	92.056	42.817	576.757
2020	3.045	108.789	17.098	7.476	954	8.849	74.625	149.982	84.895	39.092	494.806
2025	3.514	102.868	8.481	7.179	959	9.046	75.216	144.954	85.107	34.353	471.678
2030	3.213	45.667	217	6.257	942	8.933	76.062	132.760	80.863	30.731	385.644
2035	2.042	37.147	509	3.967	1.007	6.262	66.405	125.001	76.088	30.031	348.460
2040	1.711	15.834	5	2.217	1.150	6.152	63.977	113.599	70.182	29.472	304.300
2045	1.765	5.564	5	1.962	1.022	6.138	67.344	104.586	55.008	22.405	265.800
2050	1.797	3.098	6	1.838	848	3.992	57.316	106.884	37.976	13.746	227.500

Quelle: eigene Analysen

**Tabelle XIII-13: Bilanz der Systemkosten im Szenario „Verkehrsentlastung“**

Periode	Primärenergie [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Stromerzeugung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Wärmeerzeugung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Raffinerie [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Gasversorgung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Veredlung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Industrie [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Verkehr [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Haushalte [Mio. € <sub>2000</sub> ]	GHD [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Gesamt [Mio. € <sub>2000</sub> ]
2015	72.350	53.632	5.432	1.532	4.380	1.111	2.406	283.191	38.719	7.447	470.199
2020	74.267	54.835	5.324	1.104	4.308	1.110	3.291	299.270	35.041	7.228	485.778
2025	78.169	54.425	4.819	1.064	4.255	1.139	4.284	314.782	38.740	8.463	510.138
2030	79.225	54.739	5.088	925	4.093	1.243	3.270	316.079	39.707	8.584	512.953
2035	77.374	52.239	4.510	706	3.959	882	3.326	311.298	40.142	7.264	501.700
2040	78.429	54.702	4.601	800	3.878	1.009	10.855	320.738	47.669	8.433	531.113
2045	76.481	55.063	5.361	719	3.045	1.056	9.652	332.786	51.836	9.470	545.468
2050	75.172	51.266	5.125	582	3.012	918	9.416	336.312	53.305	9.469	544.575

Quelle: eigene Analysen



## Szenario „Energiewende“

Tabelle XIII-14: Bilanz der Primärenergieträger im Szenario „Energiewende“

Periode	Steinkohle [PJ]	Braunkohle [PJ]	Sonstige [PJ]	Erdöl [PJ]	Gase [PJ]	Erneuerbare [PJ]	Kernenergie [PJ]	Gesamt [PJ]
2015	970	1.305	282	4.092	2.504	1.644	985	11.782
2020	1.056	695	278	3.741	2.536	2.137	669	11.113
2025	927	702	272	3.545	2.538	2.591	0	10.575
2030	649	394	240	3.275	2.476	3.129	0	10.163
2035	525	293	282	3.039	2.400	2.878	0	9.416
2040	497	79	282	2.826	2.392	2.975	0	9.051
2045	543	27	282	2.536	2.140	3.095	0	8.624
2050	388	24	282	2.402	1.765	3.000	0	7.862

Quelle: eigene Analysen

Tabelle XIII-15: Bilanz der Endenergien der Sektoren im Szenario „Energiewende“

Periode	Industrie [PJ]	Haushalte [PJ]	GHD [PJ]	Verkehr [PJ]	Gesamt [PJ]
2015	2.008	2.504	1.289	2.414	8.216
2020	1.917	2.530	1.239	2.315	8.001
2025	1.882	2.505	1.156	2.205	7.748
2030	1.925	2.520	1.006	2.072	7.522
2035	1.731	2.388	1.017	1.941	7.077
2040	1.696	2.172	947	1.828	6.643
2045	1.758	1.931	811	1.718	6.218
2050	1.563	1.705	722	1.599	5.589

Quelle: eigene Analyse

Tabelle XIII-16: Bilanz der Endenergieträger im Verkehr im Szenario „Energiewende“

Periode	LPG [PJ]	Benzin fossil [PJ]	Benzin erneuerbar [PJ]	Diesel fossil [PJ]	Diesel erneuerbar [PJ]	Kerosin [PJ]	Erdgas fossil [PJ]	Erdgas erneuerbar [PJ]	Wasserstoff [PJ]	Strom [PJ]	Gesamt [PJ]
2015	19,3	657,3	65,7	1.097,2	99,9	421,2	0,0	0,1	0,0	53,4	2.414,1
2020	34,6	462,6	61,2	1.090,0	122,2	467,8	0,0	0,5	0,0	76,5	2.315,4
2025	45,0	325,5	46,6	1.082,9	123,5	463,6	0,0	20,3	0,0	97,3	2.204,8
2030	107,8	218,3	51,0	1.016,8	114,9	464,5	0,0	8,7	0,8	89,0	2.071,7
2035	116,2	176,8	27,0	924,1	102,1	448,6	0,0	36,3	0,8	109,2	1.941,2
2040	101,2	134,3	22,3	750,9	82,1	454,7	0,0	94,3	0,8	187,7	1.828,1
2045	134,6	133,0	21,2	569,5	59,6	441,9	0,0	73,7	0,8	283,3	1.717,5
2050	0,0	129,8	20,6	585,5	60,5	393,3	0,0	78,7	0,8	329,4	1.598,7

Quelle: eigene Analyse

**Tabelle XIII-17: Bilanz der Stromerzeugung im Szenario „Energiewende“**

Periode	Kernenergie [TWh]	Braunkohle [TWh]	Steinkohle [TWh]	Gase [TWh]	Wasser [TWh]	Wind On/Off shore [TWh]	PV [TWh]	Sonstige [TWh]	KWK [TWh]	Gesamt [TWh]
2015	84,5	109,5	30,1	35,0	20,7	100,6	40,9	39,3	36,9	497,5
2020	57,2	101,0	0,0	45,1	20,6	130,8	52,2	51,8	32,0	490,8
2025	0,0	97,7	0,0	52,3	24,1	161,9	52,2	66,8	25,2	480,3
2030	0,0	32,8	0,0	48,6	25,0	200,3	52,2	70,9	30,4	460,2
2035	0,0	26,2	0,0	36,5	25,0	204,6	52,2	74,5	29,3	448,4
2040	0,0	6,2	0,0	29,1	25,0	263,9	52,2	72,6	28,1	477,2
2045	0,0	0,0	0,0	32,5	25,0	289,3	52,2	75,2	20,5	494,7
2050	0,0	0,0	0,0	37,7	25,0	286,0	52,2	77,0	15,6	493,5

Quelle: eigene Analyse

**Tabelle XIII-18: Bilanz der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Energiewende“**

Periode	Primärenergie [kt]	Stromerzeugung [kt]	Wärmeerzeugung [kt]	Raffinerie [kt]	Gasversorgung [kt]	Veredlung [kt]	Industrie [kt]	Verkehr [kt]	Haushalte [kt]	GHD [kt]	Gesamt [kt]
2015	2.852	132.073	28.578	7.220	1.030	9.031	78.022	160.578	99.245	48.157	566.785
2020	3.037	103.704	22.337	6.132	1.013	8.885	74.619	149.737	91.725	41.236	502.425
2025	2.992	102.935	5.980	5.212	1.216	8.524	75.944	141.156	87.438	36.344	467.742
2030	3.121	45.843	1.239	4.470	945	8.597	76.332	132.742	80.638	30.991	384.919
2035	2.029	36.428	861	3.924	1.029	6.005	67.572	125.010	76.587	31.482	350.927
2040	1.640	16.021	493	4.040	1.337	5.763	66.113	110.240	68.583	30.070	304.300
2045	1.472	11.508	317	4.366	1.107	5.982	68.774	94.565	54.284	23.426	265.800
2050	1.099	13.501	282	3.734	1.005	4.133	65.097	84.674	36.719	17.256	227.500

Quelle: eigene Analyse

**Tabelle XIII-19: Bilanz der Systemkosten im Szenario „Energiewende“**

Periode	Primärenergie [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Stromerzeugung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Wärmeerzeugung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Raffinerie [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Gasversorgung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Veredlung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Industrie [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Verkehr [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Haushalte [Mio. € <sub>2000</sub> ]	GHD [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Gesamt [Mio. € <sub>2000</sub> ]
2015	72.350	53.632	5.432	1.532	4.380	1.111	2.406	283.191	38.719	7.447	470.199
2020	74.267	54.835	5.324	1.104	4.308	1.110	3.291	299.270	35.041	7.228	485.778
2025	76.847	54.432	4.876	1.064	4.320	1.072	4.300	316.073	38.766	8.463	510.213
2030	79.133	54.468	5.139	925	4.134	1.217	3.267	316.079	39.701	8.584	512.647
2035	77.493	52.131	4.534	706	3.998	877	3.296	311.298	40.175	7.264	501.771
2040	76.714	55.102	4.200	800	3.973	971	10.769	322.908	47.669	8.279	531.387
2045	73.488	54.865	4.638	771	3.195	1.011	8.898	338.973	52.321	9.137	547.297
2050	69.460	52.655	3.537	639	3.166	808	9.149	355.597	53.519	8.840	557.370

Quelle: eigene Analyse

## Szenario „Sektorenziel“

Tabelle XIII-20: Bilanz der Primärenergieträger im Szenario „Sektorenziel“

Periode	Steinkohle [PJ]	Braunkohle [PJ]	Sonstige [PJ]	Erdöl [PJ]	Gase [PJ]	Erneuerbare [PJ]	Kernenergie [PJ]	Gesamt [PJ]
2015	970	1.294	282	4.093	2.503	1.642	985	11.769
2020	1.108	670	278	3.628	2.582	2.127	669	11.061
2025	1.050	828	272	3.267	2.544	2.583	0	10.544
2030	930	399	282	2.904	2.414	3.082	0	10.010
2035	797	484	282	2.609	2.274	2.836	0	9.283
2040	580	79	282	2.450	2.825	2.816	0	9.032
2045	568	24	282	2.317	2.471	2.987	0	8.649
2050	553	64	282	2.216	1.704	3.301	0	8.119

Quelle: eigene Analyse

Tabelle XIII-21: Bilanz der Endenergien der Sektoren im Szenario „Sektorenziel“

Periode	Industrie [PJ]	Haushalte [PJ]	GHD [PJ]	Verkehr [PJ]	Gesamt [PJ]
2015	2.004	2.499	1.289	2.414	8.206
2020	1.916	2.511	1.239	2.253	7.919
2025	1.877	2.469	1.119	2.086	7.550
2030	1.911	2.438	972	1.877	7.199
2035	1.727	2.262	949	1.710	6.648
2040	1.702	2.093	913	1.655	6.363
2045	1.733	2.019	838	1.625	6.216
2050	1.529	1.788	811	1.588	5.716

Quelle: eigene Analyse

Tabelle XIII-22: Bilanz der Endenergieträger im Verkehr im Szenario „Sektorenziel“

Jahr	LPG [PJ]	Benzin fossil [PJ]	Benzin erneuerbar [PJ]	Diesel fossil [PJ]	Diesel erneuerbar [PJ]	Kerosin [PJ]	Erdgas fossil [PJ]	Erdgas erneuerbar [PJ]	Wasserstoff [PJ]	Strom [PJ]	Gesamt [PJ]
2015	19,3	657,1	65,8	1.097,0	100,1	421,2	0,0	0,1	0,0	53,4	2.414,1
2020	55,5	432,1	69,1	965,0	144,2	467,8	0,0	32,0	9,9	77,4	2.253,3
2025	75,1	324,8	77,4	759,1	155,4	463,6	0,0	50,4	17,3	162,5	2.085,7
2030	71,3	218,2	51,1	575,1	179,3	464,5	0,0	46,8	53,1	218,0	1.877,4
2035	5,3	169,8	35,0	491,5	198,6	448,6	0,0	34,4	54,0	273,6	1.710,7
2040	0,0	83,5	74,7	413,7	222,2	411,7	0,0	73,3	55,0	323,0	1.657,2
2045	0,0	80,5	73,5	384,4	245,6	400,3	0,0	75,0	58,0	312,9	1.630,2
2050	0,0	77,0	73,5	359,4	268,9	387,0	0,0	76,5	58,0	292,7	1.593,0

Quelle: eigene Analyse

Tabelle XIII-23: Bilanz der Stromerzeugung im Szenario „Sektorenziel“

Periode	Kern-energie [TWh]	Braun- kohle [TWh]	Stein- kohle [TWh]	Gase [TWh]	Wasser [TWh]	Wind On/Off- shore [TWh]	PV [TWh]	Sonstige [TWh]	KWK [TWh]	Gesamt [TWh]
2015	84,3	116,5	21,0	35,0	20,7	100,6	40,9	44,8	35,2	498,9
2020	57,0	59,5	43,6	45,0	20,6	130,8	52,2	50,4	31,9	491,0
2025	0,0	71,4	45,5	52,5	20,6	161,9	52,2	63,0	34,0	501,1
2030	0,0	31,1	37,4	47,8	25,0	196,3	52,2	70,6	39,0	499,3
2035	0,0	37,2	43,6	36,7	25,0	204,6	52,2	69,6	31,0	500,0
2040	0,0	6,7	6,3	28,6	25,1	216,9	95,4	47,1	100,5	526,8
2045	0,0	0,0	0,0	14,5	25,1	239,0	94,3	35,1	97,8	505,8
2050	0,0	5,2	17,3	4,8	24,5	248,2	80,1	59,0	41,1	480,2

Quelle: eigene Analyse

Tabelle XIII-24: Bilanz der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Sektorenziel“

Periode	Primär-energie [kt]	Stromer- zeugung [kt]	Wärmeer- zeugung [kt]	Raffinerie [kt]	Gasversor- gung [kt]	Veredlung [kt]	Industrie [kt]	Verkehr [kt]	Haushalte [kt]	GHD [kt]	Gesamt [kt]
2015	2.895	151.811	26.630	10.806	938	9.140	77.689	160.574	92.056	42.817	575.356
2020	3.219	105.208	22.910	8.601	1.108	9.179	74.728	141.511	85.517	39.092	491.075
2025	3.459	121.811	15.654	9.141	1.174	9.161	75.856	118.497	84.387	32.540	471.679
2030	3.310	71.773	1.334	8.763	1.121	7.923	76.790	95.483	80.533	30.783	377.813
2035	2.621	79.300	4.089	4.584	1.017	5.431	67.090	79.805	76.768	31.525	352.231
2040	1.854	21.037	33.822	6.845	1.401	5.201	64.718	65.919	71.062	28.743	300.600
2045	1.813	5.552	32.402	6.839	1.270	5.387	67.987	64.954	57.200	22.397	265.800
2050	2.120	18.099	12.271	6.700	976	2.925	58.320	63.944	41.695	20.451	227.500

Quelle: eigene Analyse

Tabelle XIII-25: Bilanz der Systemkosten im Szenario „Sektorenziel“

Periode	Primärenergie [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Stromerzeugung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Wärmeerzeugung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Raffinerie [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Gasversorgung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Veredlung [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Industrie [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Verkehr [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Haushalte [Mio. € <sub>2000</sub> ]	GHD [Mio. € <sub>2000</sub> ]	Gesamt [Mio. € <sub>2000</sub> ]
2015	72.335	53.675	5.543	1.551	4.404	1.114	2.454	283.191	38.820	7.447	470.533
2020	74.465	54.890	5.224	1.237	4.494	1.175	3.307	303.748	35.428	7.228	491.196
2025	75.874	54.403	4.795	1.274	4.463	1.286	5.026	327.669	38.991	8.821	522.604
2030	77.387	54.583	4.936	1.231	4.469	1.761	4.326	332.834	41.222	8.944	531.693
2035	76.079	52.637	4.408	762	4.292	1.553	3.537	330.598	41.042	8.848	523.755
2040	83.660	56.747	7.999	1.353	5.581	1.492	10.778	357.215	48.939	10.781	584.546
2045	85.735	56.413	8.423	1.353	4.799	1.496	11.649	364.447	52.988	10.852	598.155
2050	85.393	52.804	7.821	1.352	4.759	1.268	12.710	362.639	54.228	9.794	592.768

Quelle: eigene Analyse

## Szenario „Energiewende&Demografie“

Tabelle XIII-26: Bilanz der Stromerzeugung im Szenario „Energiewende&Demografie“

Periode	Kern- energie [TWh]	Braun- kohle [TWh]	Stein- kohle [TWh]	Gase [TWh]	Wasser [TWh]	Wind On/Offs hore [TWh]	PV [TWh]	Sonsti- ge [TWh]	KWK [TWh]	Summe [TWh]
2015	84,5	100,7	30,1	35,0	20,7	100,6	40,9	40,4	44,6	497,5
2020	57,1	93,9	0,0	45,1	20,6	130,8	52,2	51,6	39,4	490,8
2025	0,0	94,4	0,0	52,3	24,1	161,9	52,2	66,3	29,2	480,4
2030	0,0	32,8	0,0	48,5	25,0	200,2	52,2	70,9	30,5	460,1
2035	0,0	26,5	0,0	36,5	25,0	204,6	52,2	74,9	29,2	448,9
2040	0,0	6,2	0,0	29,4	25,0	266,3	52,2	72,0	27,5	478,6
2045	0,0	0,0	0,0	33,5	25,0	287,5	52,2	75,6	22,6	496,4
2050	0,0	0,0	0,0	39,8	25,0	284,2	52,2	77,3	16,2	494,8

Quelle: eigene Analyse

Tabelle XIII-27: Bilanz der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Energiewende&Demografie“

Periode	Primär- energie [kt]	Stromer- zeugung [kt]	Wärmeer- zeugung [kt]	Raffinerie [kt]	Gasversor- gung [kt]	Veredlung [kt]	Industrie [kt]	Verkehr [kt]	Haushalte [kt]	GHD [kt]	Gesamt [kt]
2015	2.839	124.319	32.507	7.137	1.030	9.036	77.625	160.579	99.013	48.157	562.243
2020	3.032	97.544	26.357	6.136	1.013	8.887	74.558	149.736	91.863	41.236	500.361
2025	2.999	100.110	7.038	5.285	1.202	8.523	75.890	141.146	88.211	36.522	466.926
2030	3.121	45.836	1.239	4.472	945	8.597	76.328	132.743	80.629	30.991	384.900
2035	2.029	36.735	875	3.926	1.026	6.006	67.572	125.010	76.545	31.093	350.816
2040	1.622	16.100	470	4.305	1.407	5.763	65.711	110.297	68.555	30.070	304.300
2045	1.518	11.792	293	4.459	1.106	5.982	68.370	94.565	54.292	23.426	265.800
2050	1.099	14.166	434	3.735	1.018	4.136	63.764	84.674	36.671	17.803	227.500

Quelle: eigene Analyse

## Szenario „Energiewende&Offpeak“

Tabelle XIII-28: Bilanz der Stromerzeugung im Szenario „Energiewende&Offpeak“

Periode	Kern- energie [TWh]	Braun- kohle [TWh]	Stein- kohle [TWh]	Gase [TWh]	Wasser [TWh]	Wind On/Offs hore [TWh]	PV [TWh]	Sonsti- ge [TWh]	KWK [TWh]	Summe [TWh]
2015	84,5	99,4	30,1	35,0	20,7	100,6	40,9	40,9	45,4	497,5
2020	57,2	94,4	0,0	45,1	20,6	130,8	52,2	51,5	39,0	490,8
2025	0,0	93,6	0,0	52,2	24,1	161,9	52,2	66,3	30,1	480,4
2030	0,0	32,7	0,0	48,5	25,0	200,6	52,2	71,6	29,7	460,2
2035	0,0	27,3	0,0	36,4	25,0	204,6	52,2	75,6	28,8	450,0
2040	0,0	6,3	0,0	32,0	25,0	269,9	52,2	72,8	28,5	486,7
2045	0,0	0,0	0,0	41,6	25,0	292,9	52,2	63,6	29,1	504,5
2050	0,0	0,0	0,0	47,8	25,0	289,6	52,2	72,4	10,7	497,7

Quelle: eigene Analyse

Tabelle XIII-29: Bilanz der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Szenario „Energiewende&Offpeak“

Periode	Primärenergie [kt]	Stromer- zeugung [kt]	Wärmeer- zeugung [kt]	Raffinerie [kt]	Gasversorgung [kt]	Veredlung [kt]	Industrie [kt]	Verkehr [kt]	Haushalte [kt]	GHD [kt]	Gesamt [kt]
2015	2.839	123.116	33.371	7.137	1.030	7.393	77.625	162.221	99.077	48.157	561.966
2020	3.033	97.992	26.007	6.136	1.014	7.244	74.553	151.379	91.925	41.236	500.519
2025	3.001	99.449	7.832	5.285	1.202	6.881	75.890	142.788	88.460	36.330	467.118
2030	3.121	45.861	1.275	4.472	946	6.954	76.328	134.385	80.715	30.991	385.048
2035	2.029	37.245	910	3.926	1.021	4.876	67.104	126.139	76.538	30.517	350.306
2040	1.630	17.359	565	4.965	1.527	4.634	63.416	111.525	68.609	30.070	304.300
2045	1.445	14.491	346	4.323	1.107	4.932	66.482	95.614	53.635	23.426	265.800
2050	1.099	15.803	477	3.735	1.080	3.077	57.493	85.730	38.966	20.040	227.500

Quelle: eigene Analyse



Band / Volume 444

**Inverse conditioning of a high resolution integrated terrestrial model at the hillslope scale: the role of input data quality and model structural errors**

S. Gebler (2018), xxii, 160 pp  
ISBN: 978-3-95806-372-3

Band / Volume 445

**Cathode Stability and Processing in Inert Substrate-Supported Solid Oxide Fuel Cells**

E. Matte (2018), viii, 178 pp  
ISBN: 978-3-95806-373-0

Band / Volume 446

**Aging and Degradation Behavior of Electrode Materials in Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs)**

X. Yin (2018), x, 103 pp  
ISBN: 978-3-95806-374-7

Band / Volume 447

**TRENDS 2017**

**Transition to Renewable Energy Devices and Systems**

D. Stolten, R. Peters (Eds.) (2018), 206 pp  
ISBN: 978-3-95806-376-1

Band / Volume 448

**3D simulation of impurity transport in a fusion edge plasma using a massively parallel Monte-Carlo code**

J. Romazanov (2018), xvi, 149 pp  
ISBN: 978-3-95806-377-8

Band / Volume 449

**Projektbericht Adelheid – aus dem Labor heraus in die Lüfte**

R. Peters, J. Pasel, R. C. Samsun, A. Tschauder, C. Wiethage, F. Scharf, D. Stolten (2018), xxi, 321 pp  
ISBN: 978-3-95806-378-5

Band / Volume 450

**Microstructure and Thermomechanical Properties of  $\text{SrTi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$  Oxygen Transport Membranes and Supports**

R. Oliveira Silva (2019), vi, 148 pp  
ISBN: 978-3-95806-381-5

Band / Volume 451

**Sodium Ion Conducting Ceramics for Sodium Ion Batteries**

S. Naqash (2019), vii, 134 pp  
ISBN: 978-3-95806-382-2



Band / Volume 452

**Quantitative Analyse der Trocknungsverläufe von  
Katalysatordispersionen**

F. Scheepers (2019), VIII, 191 pp

ISBN: 978-3-95806-384-6

Band / Volume 453

**Neue Optionen für einen wirtschaftlichen Betrieb von Wasserstoffzügen  
durch Nutzung der LOHC-Technologie?**

P. Wasserscheid, T. Grube, D. Sternfeld, M. Essl, M. Robinus, D. Stolten  
(2019), II, 88 pp

ISBN: 978-3-95806-386-0

Band / Volume 454

**Reformierung von BtL-Kraftstoffen für die HT-PEFC  
in luftfahrttechnischen Systemen**

C. Wilbrand (2019), IV, 312 pp

ISBN: 978-3-95806-387-7

Band / Volume 455

**Entwicklung von thermischen Spritzprozessen für  
fortschrittliche Schutz- und Funktionsschichten**

G. Mauer (2019), vi, 57 pp

ISBN: 978-3-95806-388-4

Band / Volume 456

**Columnar Structured Thermal Barrier Coatings Deposited  
by Axial Suspension Plasma Spraying**

D. Zhou (2019), VI, 126 pp

ISBN: 978-3-95806-391-4

Band / Volume 457

**Modellierung zeitlich aufgelöster Ladeenergienachfragen von  
batterie-elektrischen Fahrzeugen und deren Abbildung in einem  
Energiesystemmodell**

J. F. Linßen (2019), VIII, 189 pp

ISBN: 978-3-95806-395-2

Weitere **Schriften des Verlags im Forschungszentrum Jülich** unter  
<http://www.zb1.fz-juelich.de/verlagextern1/index.asp>



Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 457  
ISBN 978-3-95806-395-2