



Elektromobilität im ländlichen Raum

Handlungsempfehlungen für die Gestaltung der
Mobilität von Morgen

Elektromobilität im ländlichen Raum

Handlungsempfehlungen für die Gestaltung der Mobilität von Morgen

im Auftrag des Naturschutzbundes Deutschland e.V. (NABU)

Autoren

Prof. Dr. Robert Keller, Alexander Stohr, Dr. Martin Weibelzahl und Linda Wolf

Der Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT vereint die Forschungsbereiche Digital Disruption, Digital Business und Digital Transformation in Augsburg und Bayreuth. Die interdisziplinäre Expertise in fachlichen und technischen Themen der Wirtschaftsinformatik, des Informations- und Energiemanagements sowie die Fähigkeit, methodisches Know-how auf höchstem wissenschaftlichem Niveau mit einer kunden-, ziel- und lösungsorientierten Arbeitsweise zu verbinden, sind ihre besonderen Merkmale.

Institutsteil Wirtschaftsinformatik, Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT

Alter Postweg 101 Wittelsbacherring 10
86159 Augsburg 95444 Bayreuth

Ansprechpartner:
Prof. Dr. Robert Keller
robert.keller@fit.fraunhofer.de

Dr. Martin Weibelzahl
martin.weibelzahl@fit.fraunhofer.de

Disclaimer

Die Studie wurde vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT nach bestem Wissen und unter Einhaltung der nötigen Sorgfalt erstellt.

Fraunhofer FIT, seine gesetzlichen Vertreter*innen und/oder Erfüllungsgehilf*innen übernehmen keinerlei Garantie dafür, dass die Inhalte dieses White Papers gesichert, vollständig für bestimmte Zwecke brauchbar oder in sonstiger Weise frei von Fehlern sind. Die Nutzung dieses White Papers geschieht ausschließlich auf eigene Verantwortung.

In keinem Fall haften das Fraunhofer FIT, seine gesetzlichen Vertreter*innen und/oder Erfüllungsgehilf*innen für jegliche Schäden, seien sie mittelbar oder unmittelbar, die aus der Nutzung des White Papers resultieren.

Empfohlene Zitierweise

Keller, R., Stohr, A., Weibelzahl, M., Wolf, L. (2022): Elektromobilität im ländlichen Raum – Handlungsempfehlungen für die Gestaltung der Mobilität von Morgen. Institutsteil Wirtschaftsinformatik, Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT, Augsburg und Bayreuth.

Bildquellen

© <https://www.shutterstock.com>

Executive Summary

Executive Summary

Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, besteht rascher Handlungsbedarf in allen Sektoren. Dies gilt insbesondere für den Verkehrssektor, für den eine umfassende Transformation unumgänglich ist. Aktuelle Forschungsarbeiten zeigen, dass neben der Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs insbesondere der Ausbau und die Umsetzung alternativer Mobilitätsformen mit geringeren Treibhausgasemissionen (z.B. ÖPNV, Radfahren und Carsharing) aus Klimasicht zu bevorzugen und weiter voranzutreiben sind. Daher reicht es nicht aus, den derzeitigen Fahrzeugbestand mit Verbrennungsmotoren „einfach“ durch Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb zu ersetzen. Vielmehr müssen Wege gefunden werden, das Verhältnis von hergestellten Fahrzeugen und ihrer tatsächlichen Nutzung zu verbessern, um eine umfassende Reduktion der Treibhausgase im Bereich der individuellen Mobilität zu erreichen. Es ist daher notwendig, ein Bewusstsein für die Relevanz alternativer Mobilitätsformen (z.B. Mobilität-on-Demand) zu schaffen und entsprechende Maßnahmen zum Ausbau dieser Mobilitätsformen zu ergreifen.

Bei der Umsetzung gilt es jedoch Unterschiede zwischen ländlichen und urbanen Gebieten in Deutschland für entsprechende Maßnahmen zu berücksichtigen: Die Elektrifizierung des Individualverkehrs ist aufgrund der schlechten Anbindung, der längeren Wege und der Verfügbarkeit von Flächen für die lokale Erzeugung erneuerbarer Energien ein wichtiger Hebel, um die Mobilitätsbedürfnisse im ländlichen Raum zu befriedigen und gleichzeitig einen zentralen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele zu leisten. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieser Studie Kernunterschiede sowie Spannungsfelder und Chancen für eine zunehmende Elektrifizierung des Individualverkehrs im ländlichen Raum aufgezeigt und bewertet. Die Studie zeigt, dass eine geeignete Ladeinfrastruktur erforderlich ist, um die Treibhausgasemissionen durch eine Elektrifizierung des Individualverkehrs im ländlichen Raum weiter zu senken. Diese Ladeinfrastruktur sollte in die gesamte Energielandschaft eingebettet sein und die Mobilitätsprofile der Fahrer*innen (insbesondere hinsichtlich der Frage, wann das Fahrzeug an welchem Ort geparkt ist) berücksichtigen. Ein entscheidender Faktor ist hierbei der dem Ladevorgang zugrundeliegende Strommix. Vor diesem Hintergrund werden in unserer Studie drei Maßnahmen vorgestellt, die zur Verbesserung des Klimabeitrags in Frage kommen:

- Maximierung des Anteils von erneuerbaren Energien am Ladevorgang, insbesondere durch eine gezielte Förderung und Umsetzung von Charge@Work (z.B. auch bei öffentlichen Gebäuden) als Grundlage für die Reduktion der Emissionen des Ladestroms.
- Nutzung von Fahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb als Speichertechnologie (bidirektionales Laden) und damit Reduktion der Notwendigkeit zusätzlicher dezentraler, stationärer Speicher.
- Aufbau und Planung zentraler Ladeinfrastruktur mit zentralen Speichermöglichkeiten und – wenn möglich – direkter lokaler Stromerzeugung durch erneuerbare Energien.

In urbanen Gebieten sind hingegen alternative Mobilitätsformen bereits in großem Umfang vorhanden oder werden aktiv entwickelt. Hier zeigt die Forschung, dass der Fokus auf neue Mobilitätsformen durch verbesserte Verbindungen und Anreize gelegt werden sollte, statt nur die Elektrifizierung des Individualverkehrs weiter voranzutreiben. Langfristig sollten aber auch im ländlichen Raum alternative Formen der Mobilität entwickelt werden. Zwar gibt es bereits eine Vielzahl von Ideen wie z.B. On-Demand-Dienste (öffentlich oder privat), doch sind viele dieser Dienste noch nicht überall verfügbar und konzentrieren sich fast ausschließlich auf urbane Gebiete. Der ländliche Raum spielt aktuell nur eine untergeordnete Rolle, obwohl dort fast die Hälfte der deutschen Bevölkerung lebt. Daher besteht ein zunehmender Bedarf, diese Gebiete bereits heute bei der Entwicklung geeigneter Mobilitätsangebote zu berücksichtigen. Dies erfordert eine entsprechende Priorisierung und konkrete Maßnahmen, um schon heute in die notwendige Infrastruktur von Morgen zu investieren, damit alternative Mobilitätsformen im ländlichen Raum eine wichtige Rolle in der Mobilität der Zukunft spielen können.

Executive Summary

To achieve the goals of the Paris Agreement, rapid action is needed in all sectors. This particularly applies to the transport sector, for which a comprehensive transformation is essential. Current research demonstrates that alternative forms of mobility to private motorized transport with lower greenhouse gas emissions (e.g., public transport, cycling, and car-sharing) are a preferred option from a climate perspective. Therefore, it would not be sufficient to simply replace the current fleet of vehicles with internal combustion engines with battery electric vehicles. Rather, one should find ways to improve the ratio of manufactured vehicles to their actual use for a comprehensive reduction of greenhouse gas emissions in the field of individual mobility. It is therefore necessary to create awareness for the relevance of alternative forms of mobility (e.g., mobility-on-demand) and to take appropriate measures to expand these forms of mobility.

For implementation, it is, however, essential to take into account the differences between rural and urban areas in Germany for corresponding measures: Due to poor connectivity, greater distances, and general availability of space for local renewable energy generation, electrification of individual transport is an important lever to meet rural mobility needs while making an important contribution to climate goals. Against this backdrop, this study identifies and evaluates core differences as well as areas of tension and opportunities for increasing electrification of individual transport in rural areas. This study demonstrates that suitable charging infrastructure is required to further reduce greenhouse gas emissions through the electrification of individual transport in rural areas. This charging infrastructure should be embedded in the overall energy landscape and consider drivers' mobility profiles (especially about when the vehicle is parked at which location). One decisive factor here is the electricity mix underlying the charging process. Against this backdrop, our study presents three measures to be considered for improving the climate contribution:

- Maximizing the share of renewable energies in charging, particularly by a targeted promotion and implementation of Charge@Work (e.g., also for public buildings) as a basis for reducing emissions for the charging process.
- Using battery electric vehicles as storage technology (bidirectional charging), thus, reducing the need for additional decentralized, stationary electricity storage.
- Developing and planning centralized charging infrastructure with centralized storage capabilities and, if possible, direct local electricity generation through renewable energies.

In urban areas, on the other hand, alternative forms of mobility are already available on a large scale or are being actively developed. Here, the focus should be on new forms of mobility through improved connections and incentives, rather than only continuing to drive forward the electrification of individual transport. In the long term, however, alternative forms of mobility should also be developed in rural areas. While there is already a variety of ideas such as on-demand services (public or private), many such services are not yet available everywhere and are almost exclusively concentrated in urban areas. Rural areas play only a subordinate role, although almost half of Germany's population lives there. Consequently, there is a growing need to consider these areas regarding the development of suitable mobility services. This requires appropriate prioritization and concrete measures to invest in the necessary infrastructure today so that alternative forms of mobility in rural areas can play an important role in the mobility of the future.

Inhalt

Executive Summary	3
1 Motivation und Relevanz	7
2 Problemstellung	11
2.1 Status Quo – Elektromobilität im ländlichen Raum	11
2.2 Einfluss und Notwendigkeit unterschiedlicher Ladeszenarien	14
3 Spannungsfelder und Chancen	19
3.1 Nutzung und Ausbau von erneuerbaren Energien zum Laden von Elektrofahrzeugen	19
3.2 Einfluss der Ladeinfrastruktur und weiterer Faktoren.....	20
4 Fokusanalyse – Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszenarien	24
5 Ausblick	32
5.1 Ausblick Systemperspektive	32
5.2 Ausblick technologischer Weiterentwicklungen mit Fokus auf bidirektionalem Laden	33
6 Abschließende Bewertung und politische Handlungsempfehlungen	38
Referenzen.....	40
Anhang	47



1

Motivation und Relevanz

Motivation und Relevanz

1 Motivation und Relevanz

Vor dem Hintergrund der vereinbarten Ziele des Pariser Klimaabkommens, der Begrenzung des globalen Durchschnittstemperaturanstiegs auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau [1], verpflichtete das Bundesverfassungsgericht den deutschen Gesetzgeber am 24.03.2021 mit einem wegweisenden Urteil zu höheren Klimaschutzzielen für die Bundesrepublik Deutschland. Insbesondere forderte das Gericht eine Nachbesserung des im Jahr 2019 verabschiedeten deutschen Klimaschutzgesetzes mit konkreten Vorgaben für die Treibhausgasemissionsminderungen ab dem Jahr 2031 [2]. Gleichzeitig hat die Europäische Union (EU) im Rahmen des European Green Deal 2021 auch ein Europäisches Klimaschutzgesetz verabschiedet, das bis 2030 eine Reduktion der Netto-Treibhausgasemissionen in der EU um mindestens 55 % gegenüber 1990 und Klimaneutralität bis 2050 vorsieht [3].

Zudem verdeutlicht der Krieg in der Ukraine und die damit verbundene Sanktionierung Russlands, dass Abhängigkeiten von importierten fossilen Energieträgern reduziert werden müssen, damit diese nicht als Druckmittel genutzt werden können. So werden in Deutschland im Februar 2022 noch ca. 35 % des Rohöl-, 55 % des Erdgas- und 50 % des Kohlebedarfs aus Russland importiert [4].

Um die Klimaziele zu erreichen und die zuvor genannten Abhängigkeiten zu reduzieren, besteht rascher Handlungsbedarf in allen Sektoren. Dies betrifft insbesondere auch den Verkehrssektor, der aktuell noch stark auf fossile Energieträger angewiesen ist und 2019 mit ca. 21 % bzw. 24 % einen substanziellen Anteil an den Treibhausgasemissionen (THG) in Deutschland bzw. der EU hatte [5]. Nachdem die THG des Verkehrssektors in Deutschland in Folge der COVID-19-Pandemie 2020 gesunken waren, sind diese zuletzt fast wieder auf – bzw. beim Straßengüterverkehr sogar über – das Vor-Pandemie Niveau angestiegen [6, 7]. Infolgedessen wurden die Sektor-bezogenen Klimaziele für 2021 auch um ca. 2 % verfehlt [7]. Um das Ziel für den Verkehrssektor für das Jahr 2030 zu erreichen, ist in Deutschland eine Reduktion der THG von ca. 50 % gegenüber 2019 erforderlich [8]. Zur Erreichung der Klimaneutralität in Europa bis 2050 wird für den Verkehrssektor letztlich eine Reduktionser-

fordernis bei THG von 90 % gegenüber 1990 erwartet [3]. Daher ist eine umfassende Umgestaltung des Sektors unumgänglich.

Diese Notwendigkeit zur Umgestaltung trifft auch den motorisierten Individualverkehr, der im Jahr 2018 ganze 74 % der Verkehrsleistung im Personenverkehr ausmachte [9]. Die Transformation des motorisierten Individualverkehrs ist damit ein großer Hebel und wird aktuell insbesondere durch eine zunehmende Elektrifizierung geleitet [10]. Eine Elektrifizierung ist damit auch ein Fokusfeld politischer Maßnahmen, wie z.B. der Förderung elektrisch betriebener Fahrzeuge [11] oder dem Ausbau der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur [12]. Auch bei der Art der Elektrifizierung zeigt sich eine gewisse Fokussierung. So gelten heute, aufgrund ihrer Effizienz beim Laden sowie des Fortschritts in Forschung und Entwicklung, insbesondere Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb (BEVs) als vielversprechendste Alternative [10]. Brennstoffzellen und E-Fuels werden dagegen im Individualverkehr eher als Nischenprodukte betrachtet. Für die Entwicklung der Batterietechnologie – als zentraler Baustein und Grundlage für die Elektrifizierung des Verkehrs [8] – existiert noch viel Entwicklungspotenzial. So wird erwartet, dass die Energiedichte in den nächsten 10 Jahren noch um 30 % gesteigert und die Kosten halbiert werden können [10]. Somit kann eine deutliche Erhöhung des Anteils an Elektrofahrzeugen letztlich auch einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele für 2030 leisten [8].

Ein einfaches Ersetzen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor durch BEVs ist allerdings zu kurz gedacht. Die Gründe hierfür sind vielfältig und umfassen insbesondere die Tatsache, dass auch die Anzahl an Personenkraftwagen (Pkws) deutlich sinken muss [13]. Zum einen sind mit dem individuellen Fahrzeugbesitz hohe Ineffizienzen bei Standzeiten – ein durchschnittlicher Privat-Pkw wird 97 % des Tages nicht genutzt – und der Flächennutzung (z.B. für notwendige Parkplätze) verbunden [14]. Zum anderen ist die Herstellung von BEVs heute noch mit einem sehr hohen Verbrauch natürlicher Ressourcen verbunden [15]. So sind die THG der Herstellung (und Entsorgung) eines BEVs der Kompaktklasse mit einer Batteriekapazität von 35 kWh in etwa 76 % höher als bei vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, deren Herstellung ebenfalls THG verursacht [16]. Unter der Annahme einer Lebensfahrleistung von 150.000 km und einer

Motivation und Relevanz

mittleren Klimawirkung des Strommix von 421 g CO₂-Äq./kWh¹ müssten mit einem entsprechenden BEV bereits 60.000 km bzw. 80.000 km gefahren werden, bis die höheren THG bei der Herstellung gegenüber eines Benzin- bzw. Dieselfahrzeugs kompensiert wären [16]. Auf Basis der zuvor genannten Lebensfahrleistung ergibt sich dennoch ein Klimavorteil für BEVs von 24 % bzw. 16 % gegenüber Benzin- bzw. Dieselfahrzeugen. Diese Lebensfahrleistung wird jedoch stark diskutiert. Andere Studien sehen z.B. eine weitaus höhere Lebensfahrleistungen von größer 200.000 km als realistisch an [17, 18]. Bei einer Lebensfahrleistung von 225.000 km und auf Basis des aktuellen Strommix sind die Lebenszyklusemissionen von BEVs in Deutschland im Durchschnitt bereits um 56 % geringer als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. In Ländern mit einem Strommix mit geringeren THG, wie z.B. Schweden, sind es sogar 79 % [18]. Dennoch sind aber auch BEVs emissionsbehaftet.

Vor diesem Hintergrund müssen alternative Mobilitätskonzepte mitgedacht sowie geeignete Ansätze für die Stadt- und Infrastrukturplanung entwickelt werden, um den Individualverkehr für die Zukunft auszurichten und diesen ressourcenschonender und effizienter zu gestalten [19, 20]. Neben dem Carpooling kommt dabei auch Sharing-Angeboten eine wichtige Rolle zu. Bei den Sharing-Angeboten zeigt sich zudem ein zunehmender Trend zur Mikromobilität (z.B. Bike-Sharing) auf Kurzstrecken [21]. Das Potenzial von Letzterem liegt insbesondere auch in der Einbettung in Mobilitätsketten mit einem Ausbau von öffentlichem Personennahverkehr (ÖPNV) und Schienenpersonenfernverkehr (SPFV). Darüber hinaus ist generell der Ausbau der Fahrradinfrastruktur und die damit verbundene Stärkung des Radverkehrs ein wichtiger Baustein einer zukunftsgerichteten, nachhaltigen Mobilität [22]. Das Potenzial der Transformation liegt jedoch nicht nur auf alternativen Mobilitätskonzepten, sondern auch auf einer intelligenten Steuerung der Mobilität durch den Einsatz digitaler Technologien (z.B. kürzere Liefer Routen und intelligente Verkehrs-/Ampelsteuerung) [23].

Bei der Planung der Verkehrswende müssen auch die Mobilitätsbedürfnisse der Bürger*innen aktiv berücksichtigt werden. Dabei spielen unter anderem Faktoren wie Flexibilität, Fahrkomfort und Stauraum eine wichtige Rolle. Daher ist es von

zentraler Bedeutung, Alternativen zu schaffen und im Sinne einer modernen Klimapolitik klimafreundliches Verhalten zu unterstützen, anstelle klimaschädliches Verhalten nur zu bestrafen [24]. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Ausbau der Infrastruktur für ÖPNV und Sharing-Angeboten sowie eine Veränderung des Mobilitätsverhaltens Zeit benötigt.

Darüber hinaus liegt der Fokus aktueller Studien und politischer Handlungsansätze häufig auf dem „urbanen Raum“, z.B. beim Ausbau der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur oder auch bei der Umsetzung von Privilegien für Fahrer*innen von BEVs, wie etwa einer kostenlosen Nutzung von Parkflächen in Städten [25]. Im Gegensatz dazu spielt die Elektromobilität im ländlichen Raum mit einer entsprechend spezifischen Betrachtung und Förderung, beispielsweise im politischen Diskurs, aktuell noch eher eine untergeordnete Rolle. Doch gerade der ländliche Raum – häufig gekennzeichnet durch eine geringe Anbindung (u.a. durch fehlenden ÖPNV) und zusätzlich längere Wege (z.B. Arbeitswege für Pendler und Schulwege) – muss im Sinne eines ganzheitlichen Mobilitätskonzepts zwingend berücksichtigt werden. So dürfte der Individualverkehr im ländlichen im Gegensatz zum urbanen Raum – und somit bei je nach Klassifizierung zwischen 32 % und 57 % der Einwohner Deutschlands [14, 26] – aus den genannten Gründen (z.B. geringe Anbindung und längere Wege) perspektivisch vermutlich eine noch wichtigere Rolle einnehmen. Hierfür gilt es, Handlungsfelder aufzuzeigen, welche den Unterschieden zum urbanen Raum gerecht werden.

Eine zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs hat jedoch auch systemische Auswirkungen. Der zusätzliche Bedarf an elektrischer Energie sollte z.B. im Sinne der CO₂-Neutralität durch erneuerbare Energien (EE) gedeckt werden. Dies kann entsprechend auch zu einer höheren Netzbelastung führen [27]. Allerdings können Elektrofahrzeuge bei intelligenter Steuerung und einer zugehörigen Ladeinfrastruktur auch einen wesentlichen Beitrag zur Netzstabilität leisten. So können Elektrofahrzeuge z.B. dabei helfen, Lastspitzen auszugleichen, oder als mobiles Speichermedium fungieren [28–30].

Vor diesem Hintergrund sollen im Rahmen dieser Studie Kernunterschiede sowie Spannungsfelder

¹ 2021 waren es ca. 410 g CO₂-Äq./kWh [6].

Motivation und Relevanz

und Chancen für eine zunehmende Elektrifizierung des Individualverkehrs im ländlichen Raum aufgezeigt und bewertet werden. Im Fokus der Analyse stehen dabei die CO₂-Einsparpotenziale unterschiedlicher Ladeszenarien als Kriterium für die Bewertung des Auf- und Ausbaus von Ladeinfrastruktur. Darüber hinaus gibt die Studie auch einen Ausblick auf die Auswirkungen einer zunehmenden Elektromobilität auf das Energiesystem sowie auf technologische Weiterentwicklungen, wie beispielsweise bidirektionales Laden.

Diese Studie gliedert sich entsprechend in insgesamt sechs Kapitel. In Kapitel 2 wird die Problemstellung konkretisiert. Darüber hinaus findet sich darin eine Beschreibung des Status Quo von Elektromobilität im ländlichen Raum sowie eine Beschreibung des Einflusses und der Notwendigkeit unterschiedlicher Ladeszenarien. Kapitel 3 zeigt Spannungsfelder und Chancen in Bezug auf die Elektrifizierung des Individualverkehrs auf, die zum einen im Ausbau der EE und zum anderen in der Ladeinfrastruktur und damit verbundenen Themen (z.B. Speichertechnologien, Reichweiten usw.) begründet liegen. In Kapitel 4 werden die zentralen Ergebnisse einer Analyse von CO₂-Einsparpotenzialen unterschiedlicher Ladeszenarien vorgestellt. Kapitel 5 befasst sich mit weiteren Entwicklungen in Bezug auf Elektromobilität, insbesondere der systemischen Perspektive, aber auch technologischen Weiterentwicklungen wie z.B. dem bidirektionalen Laden. Abschließend werden in Kapitel 6 die Ergebnisse der Studie bewertet und Handlungsempfehlungen für die Politik abgeleitet.

2

Problemstellung



Problemstellung

2 Problemstellung

Bei der Transformation des Verkehrssektors gilt es, die Mobilitätsbedürfnisse der Bürger*innen (z.B. Arbeits- und Schulwege oder Freizeitaktivitäten) zu berücksichtigen. Gerade im ländlichen Raum wird dabei kurz- bis mittelfristig vermutlich insbesondere der Individualverkehr eine wichtige Rolle einnehmen.

Um die gesteckten Klimaziele zu erreichen, ist jedoch eine rasche und flächendeckende Elektrifizierung dessen unumgänglich [8]. Hinsichtlich des Klimabeitrags von BEVs ist hierbei auch die Gesamtbilanz inklusive der Herstellung zu berücksichtigen, wenngleich der Strommix für den Ladevorgang eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der Vorteilhaftigkeit spielt. Bereits mit dem heutigen Strommix sind die THG von BEVs in der Kompaktklasse beim Betrieb wesentlich geringer als bei vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ca. 66 g CO₂-Äq./km bei BEVs im Vergleich zu ca. 140 bzw. 125 g CO₂-Äq./km bei Benzin- bzw. Dieselfahrzeugen²). Entsprechend sind, bestärkt durch zugehörige Anreizmechanismen (z.B. Umweltbonus und Innovationsprämie), über die letzten Jahre auch die Zulassungszahlen von BEVs gestiegen [32] und haben 2021 einen Rekordwert von 355.961 Neuzulassungen erreicht [33]. Der Anteil von BEVs an den gesamten Neuzulassungen stieg zwischen 2019 und 2021 von 1,8 % auf 13,6 % [32, 33]. Allerdings ist der Anteil an Elektrofahrzeugen am gesamten Fahrzeugbestand immer noch gering. Nimmt man BEVs und Plug-In Hybride (PHEVs) – Fahrzeuge, die sowohl mit einem Verbrennungsmotor, als auch mit einem Elektromotor ausgestattet sind – zusammen, so betrug deren Anteil zum 1. Januar 2022 lediglich 2,4 % [34].

Informationen zur „Verteilung“ der Elektrofahrzeuge sind im Allgemeinen selten. Dies betrifft zum einen die unterschiedlichen Antriebsarten (BEVs und PHEVs), aber insbesondere auch die regionale Verteilung. Durch das Zusammenfassen von Zulassungszahlen ist beispielsweise schwer abzuschätzen, wie groß die Akzeptanz von BEVs in verschiedenen Bereichen der Bevölkerung (z.B. bezogen auf sozio-ökonomische Faktoren oder

den Wohnort) aktuell ist oder auch, welchen Bedarf es für entsprechende Ladeinfrastruktur gibt. Da PHEVs sowohl bei der Herstellung als auch beim Betrieb (abhängig davon, ob die Wegstrecke mit dem Elektroantrieb zurückgelegt wird oder nicht) einen deutlich höheren Einfluss auf die THG haben [35] und damit – abhängig von der Nutzung – deren Beitrag zur Erreichung der Klimaziele fraglich ist [36], fokussiert sich die vorliegende Studie im Folgenden rein auf BEVs.

In Bezug auf regionale Unterschiede lässt sich feststellen, dass im Jahr 2020 der Anteil von BEVs an den Neuzulassungen in Schleswig-Holstein und Niedersachsen (>9 %), gefolgt von Baden-Württemberg und Berlin (>7,5 %), am größten war. Vergleichsweise gering war der Anteil in den östlichen Bundesländern, insbesondere in Sachsen-Anhalt, Thüringen, Sachsen und Mecklenburg-Vorpommern, aber auch in Hamburg [32]. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei der Betrachtung des Anteils der BEVs am Gesamtbestand, wobei hier – anders als bei den Neuzulassungen – u.a. Hamburg und Bayern eine führende Rolle einnahmen [34]. Darüber hinaus scheinen BEVs und PHEVs häufig in Ballungsräumen bzw. Städten mit über 500.000 Einwohnern und Gemeinden mit 5.000 bis 20.000 Einwohnern verbreitet zu sein [37].

Diese regionalen bzw. kommunalen Unterschiede gilt es dringend im Zuge der Transformation des Verkehrssektors zu beachten, da dem Wohnumfeld inkl. dem Vorhandensein alternativer Mobilitätsformen eine wichtige Rolle beispielsweise bei der Bewertung der Notwendigkeit von Individualverkehr und damit der Elektrifizierung zukommt. Entsprechend sind auch die Potenziale und die Herausforderungen der Umsetzung unterschiedlich zu bewerten und bedürfen spezifischer Maßnahmen, die nachfolgend mit dem Fokus auf die Elektrifizierung des Individualverkehrs im ländlichen Raum herausgearbeitet werden.

2.1 Status Quo – Elektromobilität im ländlichen Raum

Räumliche Strukturen spielen bei der Analyse von Mobilitätsverhalten und -bedürfnissen eine wesentliche Rolle [14]. Häufig wird dabei zwischen städtischen und ländlichen Regionen unterschied-

² Verbrauch auf Basis des Basisszenarios in [16], CO₂-Emissionen des Strommix 2021 aus [6] und von Benzin- und Dieselfahrzeugen aus [31].

Problemstellung

den, wobei zur Differenzierung vor allem Kriterien der Siedlungs- und Bebauungsdichte, teilweise ergänzt um weitere Merkmale wie Erreichbarkeit, herangezogen werden [38].

Grundsätzlich nutzen Menschen in ländlichen Regionen häufiger motorisierten Individualverkehr. Aber auch hier gibt es Unterschiede abhängig von räumlichen Merkmalen, wie z.B. der Nähe zu größeren Städten. Entsprechend nimmt das Bundesministerium für Digitales und Verkehr eine hierarchische Gliederung vor (siehe Abbildung 2). Diese Gliederung soll als Grundlage für die Verkehrsplanung dienen [39]. Auf dieser Basis können wiederum feingranulare Aussagen zum Mobilitätsverhalten getroffen werden. Abbildung 1 stellt dabei die deutschlandweite Verteilung von Stadtregionen (rot eingefärbt) und ländlichen Regionen (grün eingefärbt) grafisch dar.

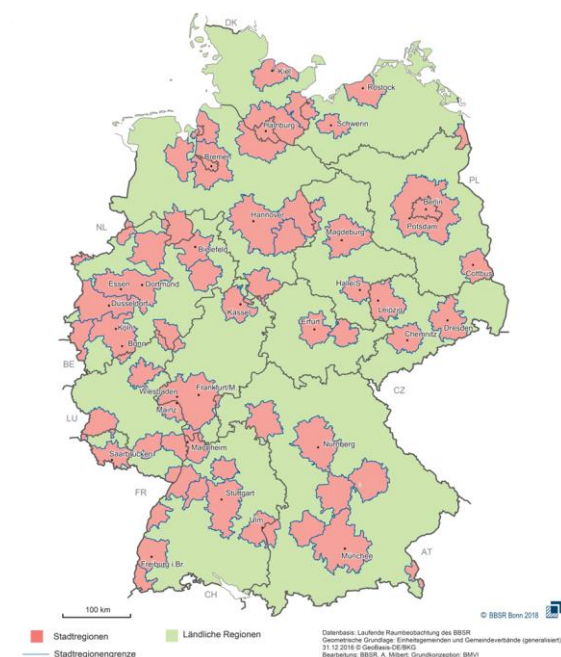


Abbildung 1: Deutschlandkarte unterteilt in Stadtregionen (rot) und ländliche Regionen (grün). Quelle: [40].

So nutzen beispielsweise auch Menschen in den äußeren Gebieten von Stadtregionen häufig motorisierten Individualverkehr und nur in sehr geringem Umfang den ÖPNV (siehe Abbildung 3). ÖPNV wird verstärkt in Metropolen, Regiopolen und Großstädten genutzt. Dies kann – zumindest zu einem Teil – auch auf die zur Verfügung stehende Infrastruktur zurückzuführen sein, bei der

mittel- bis langfristig auch Handlungsbedarf besteht, um eine zukunftsgerichtete, nachhaltige Mobilität zu gewährleisten.

Beim Fahrzeugbesitz ergibt sich ein ähnliches Bild. Auch hier gibt es Unterschiede zwischen Stadtregionen und ländlichen Regionen (siehe Abbildung 4). So besitzen Haushalte in Stadtregionen häufiger kein eigenes Auto. Der kleinstädtische, dörfliche Raum in Stadtregionen und ländlichen Regionen zeigt jedoch eine ähnliche Verteilung. Die Daten in Bezug auf die durchschnittliche Jahresfahrleistung mit dem eigenen Pkw bestätigen die oben genannte Tendenz. Abbildung 5 zeigt, dass bei Vorhandensein eines Pkw ebenfalls ein Unterschied zwischen ländlichen Regionen und Stadtregionen zu erkennen ist: Dies gilt insbesondere für den Vergleich der Jahresfahrleistung in Metropolen mit dem kleinstädtischen, dörflichen Raum der ländlichen Region. Es ist jedoch innerhalb der Stadtregion zu erkennen, dass sich die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen an die der ländlichen Region annähern, je weiter der Raumtyp von der Metropole entfernt liegt. Diesen Tendenzen folgend können auch drei Überkategorien (in Abbildung 2 dargestellt) gebildet werden: (1) Ländlicher Raum (kleinstädtischer, dörflicher Raum der Stadtregion und der ländlichen Region), (2) suburbaner Raum (Mittelstadt, städtischer Raum der Stadtregion und der ländlichen Region sowie zentrale Stadt der ländlichen Region) und (3) urbaner Raum (Metropole sowie Regiopole und Großstadt) [41]. Werden die Daten von „Pkw-Besitz nach Raumtyp“ (Abbildung 4) sowie „durchschnittliche Jahresfahrleistung pro Pkw nach Raumtyp“ (Abbildung 5) zusammen betrachtet, so ergibt sich in der Zusammenfassung sowohl ein höherer Prozentsatz an Personen mit Pkw-Besitz als auch eine höhere durchschnittliche Jahresfahrleistung jedes einzelnen Pkw für den ländlichen Raum.

Im Gegensatz zum urbanen Raum ist der ländliche Raum typischerweise dadurch gekennzeichnet, dass grundsätzlich ein hoher Bedarf an Individualverkehr besteht, beispielsweise aufgrund des Arbeitswegs sowie Schul- und Freizeitfahrten, die durch den nicht ausreichend ausgebauten ÖPNV nicht abgedeckt werden können. Die Wohnsituation ist dabei häufig durch ein hohes Platzangebot charakterisiert, beispielsweise in Form von Einfamilienhäusern mit Garagen bzw. Stellplätzen für private Fahrzeuge. Dadurch bietet sich oft auch die Möglichkeit, eigene Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) auf dem

Problemstellung

Dach zu installieren und durch eine hauseigene Ladeinfrastruktur das eigene Elektrofahrzeug mit dem lokal erzeugten Strom zu laden.

Diese Charakteristika gelten dabei nicht nur in ländlichen Regionen gemäß Abbildung 2, sondern insbesondere auch im kleinstädtischen, dörflichen Raum der Stadtregionen. Die Ausprägung der Charakteristika nimmt zu, je ländlicher der Raum in Bezug auf die sinkende Anbindung, z.B. durch ÖPNV, und das steigende Platzangebot wird. Diese Charakteristika passen auch zu aktuellen Analysen zu stereotypischen Elektroauto-fahrer*innen. Diese sind laut Analysen überwiegend männlich, im Alter von 35 bis 59 Jahren, verheiratet und haben Kinder. Darüber hinaus wohnen diese häufig in Ein- oder Zweifa-

milienhäusern mit großer Wohnfläche und Garten in guten Wohngegenden (auf dem Land oder in der Großstadt). Sie besitzen häufig mehr als ein Fahrzeug und haben ein hohes Qualitäts- und Selbstbewusstsein. Sie sind öko- und reiseaffin und treiben gerne Sport, vor allem in der Natur (z.B. Golf, Skifahren und Bergsteigen). Zuletzt haben sie eine hohe Affinität zur Nutzung alternativer Energien, d.h. ein Großteil besitzt eine PV-Anlage [42] oder bezieht laut einer Umfrage des Fraunhofer ISI Ökostrom [43].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Elektrifizierung des Individualverkehrs, insbesondere im ländlichen Raum, hohes Potenzial für die Erreichung der Klimaziele bietet, da der Bedarf an Individualverkehr groß ist und alternative Mobilitätsformen erst langfristig umzusetzen sind.

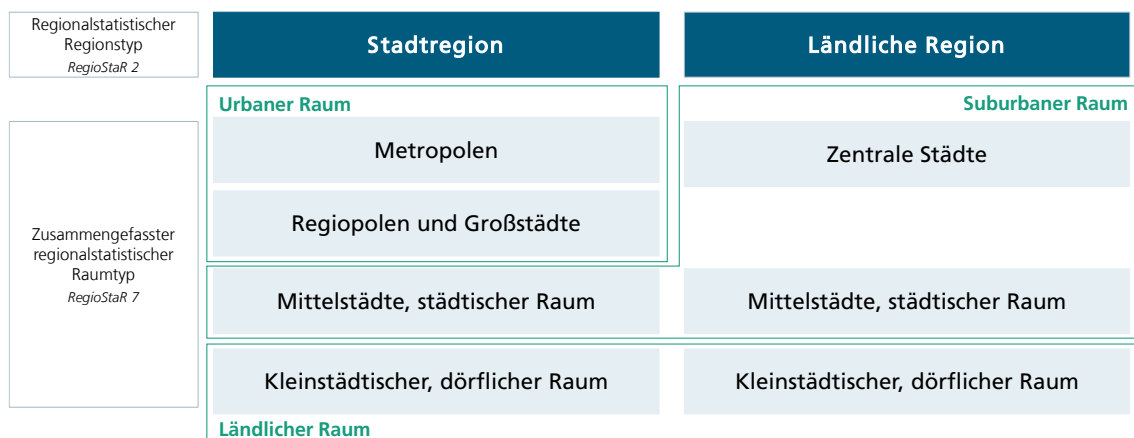


Abbildung 2. Topologie räumlicher Strukturen. Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [39, 41].

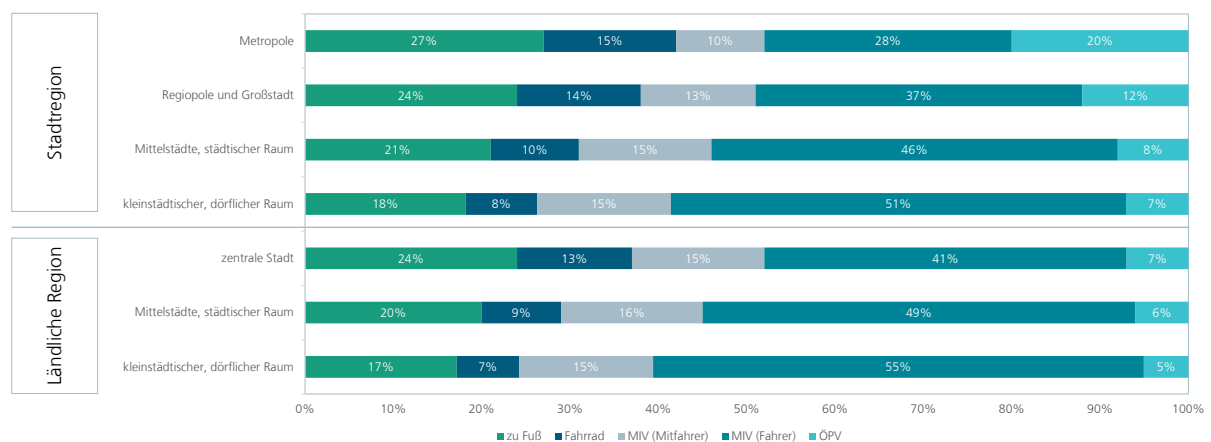


Abbildung 3: Anteil der Hauptverkehrsmittel (zusammengefasst) an den zurückgelegten Wegen nach Raumtyp. Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [14].

Problemstellung

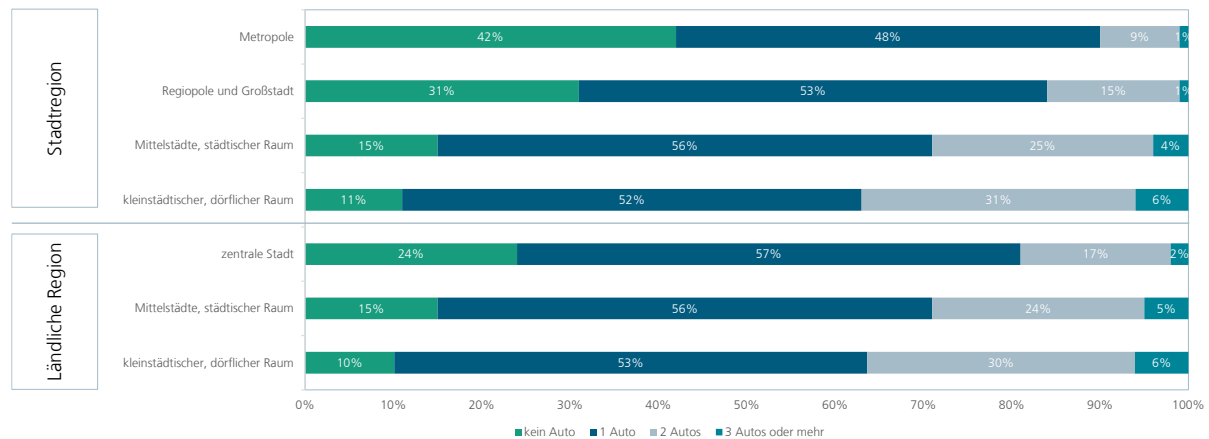


Abbildung 4: Pkw-Besitz nach Raumtyp. Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [14].

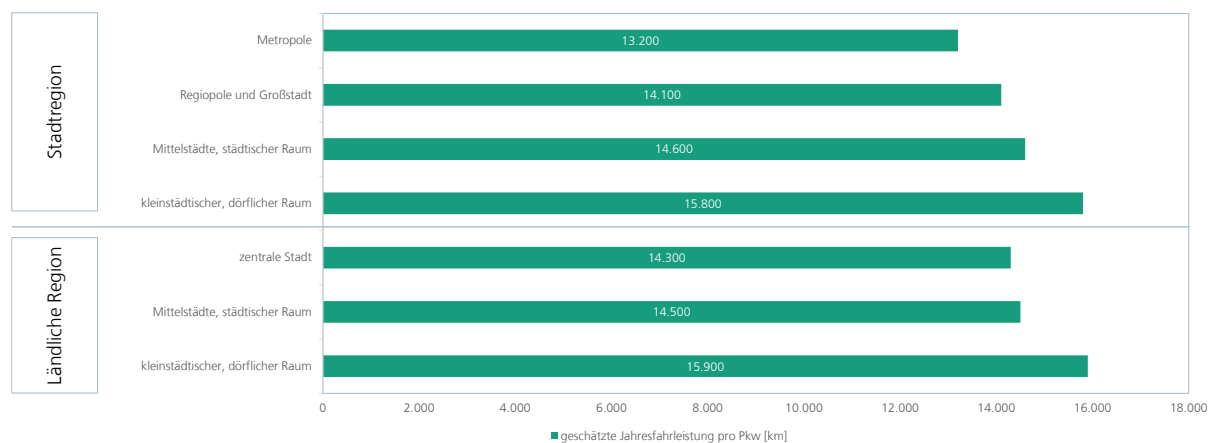


Abbildung 5: Durchschnittliche Jahresfahrleistung pro Pkw nach Raumtyp. Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [14].

2.2 Einfluss und Notwendigkeit unterschiedlicher Ladeszenarien

Neben der Reichweite und dem Preis-Leistungs-verhältnis ist die Ladeinfrastruktur ein essenzieller Faktor für die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen im Individualverkehr [42, 44]. Die Ladeinfrastruktur spielt jedoch nicht nur bei der Marktdurchdringung eine entscheidende Rolle, sondern auch bei der Klimawirkung von Elektrofahrzeugen, da das Ausmaß deren „Vorteilhaftigkeit“ maßgeblich vom Strommix und entsprechenden THG abhängt [16]. Einen sehr großen Hebel könnte hierbei die Nutzung von vor Ort installierten PV-Anlagen, z.B. auf Wohn-, aber auch auf Fabrik- und Bürogebäuden mit entsprechender Ladeinfrastruktur, bieten [45], da die

THG von PV-Anlagen deutlich geringer sind als bei anderen Energiequellen [46]. Daneben kann durch die Verbindung von BEVs und PV-Anlagen grundsätzlich auch ein Beitrag zur Netzstabilität geleistet werden [47]. Die entsprechenden Möglichkeiten für die Installation einer eigenen PV-Anlage vor Ort dürfte aufgrund des grundsätzlichen Platzangebots im ländlichen Raum auch in einigen Fällen gegeben sein.

Die Ladeinfrastruktur ist jedoch multimodal. Während für den „Ladevorgang“ bei Verbrennungsmotoren nur wenige Unterschiede existieren – das Fahrzeug wird typischerweise an einer Tankstelle mit dem jeweils benötigten Kraftstoff innerhalb von wenigen Minuten aufgetankt –, so existieren bei Elektrofahrzeugen unterschiedliche Ladeszenarien. Da Strom zum einen nicht beliebig

Problemstellung

gespeichert werden kann und der Ladeprozess zum anderen je nach Ladeleistung unterschiedlich lange dauert, wird je nach Anforderung unterschiedliche Ladeinfrastruktur benötigt. Mögliche Ladeszenarien können daher anhand verschiedener Kriterien und derer Ausprägungen unterschieden werden [48, 49]. Tabelle 1 zeigt einige mögliche Kriterien, wie beispielsweise die Ladeleistung oder den Zeitraum des Ladevorgangs. Diese Unterscheidung macht unter anderem die Herausforderungen in Bezug auf den Ausbau der notwendigen Ladeinfrastruktur deutlich. Tabelle 1 erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, je nach Ausprägung der dargestellten Kriterien ergeben sich unterschiedliche Ladeszenarien.

Übergeordnet orientiert sich die Auswahl einer geeigneten Ladeinfrastruktur im Wesentlichen an zwei Zielgrößen. Zum einen ist die Nutzung und Akzeptanz durch potenzielle Fahrer*innen von BEVs entscheidend, um den Markthochlauf der Elektromobilität zu fördern und für den Ladeinfrastrukturbetreiber einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Dabei hängt die Akzeptanz unter anderem stark von der Ladezeit bzw. der Möglichkeit ab, Standzeiten beispielsweise während der Arbeitszeit zu nutzen. Somit ist ein entscheidender Faktor, dass die Ladeinfrastruktur in Bezug auf zu erwartende Standzeiten geplant wird – je nach Ladeleistung und Ladeanforderung variiert die Dauer des Ladevorgang von wenigen Minuten für das Hochleistungsladen bis hin zu mehreren Stunden für das Normalladen. Zum anderen spielt der Strombezug, der für die entsprechende Ladeinfrastruktur genutzt werden kann, eine entscheidende Rolle. Die Elektrifizierung des Individualverkehrs liefert insbesondere dann einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende, wenn THG reduziert werden können. Auch hier sind der Ladezeitpunkt und die Standzeit ausschlaggebend, um insbesondere den Strom aus EE präferiert nutzen zu können.

Im ländlichen Raum kann typischerweise davon ausgegangen werden, dass zum einen das Laden zu Hause (Charge@Home) möglich ist, da ein ausreichendes Platzangebot vorliegt, welches ggf. auch zur Installation einer PV-Anlage für die lokale Stromerzeugung genutzt wurde. Zum anderen spielt die Nutzung des eigenen Pkws für die alltäglichen Wege eine größere Rolle je ländlicher die Region ist, da hier, wie bereits beschrieben, häufig Mobilitätsalternativen fehlen. Charge@Home ist gemäß verschiedener Studien

der aktuell häufigste Ladeort. Der Anteil von Charge@Home an der Anzahl an Ladevorgängen (BEV und PHEV zusammengefasst) dürfte laut verschiedener Umfragen zwischen 49 % und 59 % liegen [43]. Unter ähnlichen Voraussetzungen wie bei Charge@Home (z.B. ausreichendes Platzangebot und Nutzung einer PV-Anlage) stellt auch der Arbeitsplatz (Charge@Work) einen relevanten Ladeort dar. Der Anteil von Charge@Work dürfte aktuell gemäß der bereits genannten Studien zwischen 14 % und 26 % liegen [43]. In Stadtregionen und ausgewählten hochfrequentierten Orten im ländlichen Raum kommt darüber hinaus auch heute schon dem Laden an öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur, insbesondere im Hinblick auf das Platzangebot und das Besuchsaufkommen in Form von (Tages-)Tourismus, eine größere Rolle zu. Dabei wird das Laden an öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur teilweise noch in Normalladen und Schnellladen bzw. Hochleistungsladen unterschieden. Der Anteil der Ladevorgänge an öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur dürfte aktuell zwischen 18 % und 27 % liegen, kann sich allerdings je nach Gegebenheiten stark unterscheiden [43]. Da sich diese Studie vor allem auf ländliche Regionen fokussiert, in denen öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur aktuell nur vereinzelt ausgebaut ist, wird in der nachfolgenden Betrachtung insbesondere auf die Ladeszenarien Charge@Home und Charge@Work näher eingegangen. Mögliche Spannungsfelder und Chancen in Bezug auf verschiedene Ladeszenarien sowie eine erste Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszeitpunkte werden in den Kapiteln 3 und 4 näher betrachtet und analysiert.

Problemstellung

Tabelle 1: Übersicht verschiedener Kriterien inkl. Ausprägungen zur Unterscheidung verschiedener Ladeszenarien; Anmerkung: Die Tabelle ist mit Ausnahme der gestrichelten Linien lediglich zeilenweise zu lesen. Quelle: Angepasste und teilweise erweiterte Darstellung von [49].

Kriterium	Ausprägungen										Quelle(n)
Ladeleistung	Normalladen (≤ 22 kW Ladeleistung)			Schnellladen (> 22 kW und ≤ 50 kW Ladeleistung)			Hochleistungs-laden (> 50 kW Ladeleistung)			[50, 51]	
Art und Weise der Leistungsbereitstellung ³	Konduktiv (kabelgebunden)			Induktiv (kabellos)			Batteriewechsel			[48, 50, 52]	
Stromrichtung und Ladeleistung	Wechselstrom (AC – alternating current)					Gleichstrom (DC – direct current)					[48, 50, 53]
	3,7 kW	7,4 kW	11 kW	22 kW	44 kW	10 kW	20 kW	50 kW	150 kW	350/450 kW	
Eigentum an der Fläche und Zugangsmöglichkeit	Private Ladeinfrastruktur: Fläche Privateigentum, Zugang für eingeschränkten Nutzerkreis			Halböffentliche Ladeinfrastruktur: Fläche Privateigentum, öffentlich zugänglich			Öffentliche Ladeinfrastruktur: Fläche Eigentum der öffentlichen Hand, öffentlich zugänglich			[48, 54]	
Ort und Zeitpunkt des Ladens	Laden am Zielort					Laden unterwegs					[55]
	Zuhause (Charge@Home)			Am Arbeitsort (Charge@Work)			An öffentlich zugänglichen Orten			[56]	
Zeitraum des Ladevorgangs	Tagsüber			Nachts			Eventgetrieben			[49]	
Geladene Energiemenge	Vollladung					Teilladung					[57]
Zusammenhang Ladezeit und Standzeit	Ladezeit < Standzeit (zeitliche Verschiebung des Ladevorgangs bzw. Steuerung der Ladeleistung möglich)					Ladezeit = Standzeit (weder eine zeitliche Verschiebung des Ladevorgangs noch eine mögliche Reduzierung der Ladeleistung sind möglich)					[58]
Steuerung der Ladevorgänge	ja					nein					[59–61]
	Bidirektional		Unidirektional								
Stromanschluss	Hausanschluss					Anschluss an das Niederspannungs- bzw. Mittelspannungsnetz					[50]
Stromversorgung	Netzbezug					Lokale Stromerzeugung					[62]

³ D.h., mit welcher Ladetechnologie wird das Elektrofahrzeug geladen.

Zusammenfassung: Problemstellung

- Im ländlichen Raum ist davon auszugehen, dass aufgrund von längeren Wegstrecken und schlechterer Anbindung der Bedarf an Individualverkehr kurz- bis mittelfristig weiterhin groß sein wird.
- Die Elektrifizierung des Individualverkehrs bietet damit insbesondere im ländlichen Raum hohes Potenzial für eine Erreichung der Klimaziele, wenngleich alternative Mobilitätsformen mit geringeren Emissionen aus Klimagesichtspunkten zu präferieren sind.
- Der Ausbau und die intelligente Nutzung von Ladeinfrastruktur ist dabei ein essenzieller Faktor für die Marktdurchdringung sowie die positive Klimawirkung von Elektrofahrzeugen.

3

Spannungsfelder und Chancen

3 Spannungsfelder und Chancen

3.1 Nutzung und Ausbau von erneuerbaren Energien zum Laden von Elektrofahrzeugen

Der Anteil EE am Strommix ist ein entscheidender Faktor bei der Bewertung der Klimawirkung von BEVs. Bei den potenziell vielversprechenden Ladeorten für ländliche Regionen Charge@Home und Charge@Work besteht dabei grundsätzlich die Möglichkeit, Strom aus der privaten bzw. vom Arbeitgeber installierten PV-Anlage (emissionsfrei⁴) zu beziehen. Gleiches gilt allerdings auch für öffentlich zugängliche Ladepunkte mit einer passenden PV-Infrastruktur. Je nach Ladezeitpunkt hängt die Bewertung dennoch teilweise auch für diese Ladeorte vom jeweiligen Anteil der Energiequellen (emissionsbehaftet) an der allgemeinen Stromerzeugung ab. Grund ist, dass der Ladezeitpunkt und die Ladedauer darüber entscheiden, ob eventuell vor Ort erzeugter Strom auch direkt (und ausreichend) genutzt werden kann, oder ob auf Netzbezug zurückgegriffen werden muss. Dies ist insbesondere auch bei der Analyse von öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur relevant. Entsprechend hat der Ausbau von EE nicht nur einen entscheidenden Einfluss auf die Erreichung der Klimaziele im Energiesektor, sondern zukünftig auch auf die Erreichung der Klimaziele im Verkehrssektor.

Im Juni 2021 waren in Deutschland ca. 2,1 Mio. PV-Anlagen installiert, wobei die Anzahl an Anlagen sowie die installierte Leistung zuletzt stärker angestiegen sind. So konnte Ende 2020 ein Plus von ca. 10 % gegenüber dem Vorjahr bei der installierten Leistung von PV-Anlagen verzeichnet werden [63]. Während 2018 etwa 8 % der deutschen Haushalte eine PV-Anlage nutzten [64], so waren es 2020 bereits ca. 11 % der Potentialhaushalte (+38 %) [65]. Bei der Nutzung von PV-Anlagen besteht jedoch ein starker Unterschied zwischen Stadt und Land, wobei die Nutzung mit der Größe der Stadt abnimmt [64]. Die installierte Leistung aus PV-Anlagen soll gemäß Koalitionsvertrag bis 2030 auf 200 GW erhöht werden [66], was einer Steigerung von ca. 257 % gegenüber dem ersten Halbjahr 2021 bedarf [63]. Daran zeigt sich, dass noch substanzielles Potenzial für

einen weiteren Ausbau besteht. Dies betrifft sowohl den urbanen als auch den ländlichen Raum, wobei es gerade im urbanen Raum einige Herausforderungen zu beachten gilt (z.B. Verschattungsflächen, Denkmalschutz oder Eigentumsverhältnisse) [67]. Die Nutzung dieses Potenzials kann jedoch maßgeblich dazu beitragen, die durch Elektromobilität verursachten CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Gleichzeitig besteht ein Trade-off zwischen der Eigennutzung, bei der ggf. die EEG-Umlage gezahlt werden muss, und der Netzeinspeisung. Diese Netzeinspeisung erfolgt aktuell noch auf Basis einer jeweils auf 20 Jahre fixierten Vergütung, die jedoch über die letzten Jahre gesunken ist und aktuell noch bei 6,63 ct/kWh liegt. Zumindest wurde aber durch das EEG 2021 der Eigenverbrauch attraktiver gestaltet. So ist der Verbrauch nunmehr bei Anlagen mit einer Größe von bis zu 30 kWp – zuvor lediglich 10 kWp – bis 30.000 kWh pro Jahr von der EEG-Umlage befreit [68]. Darüber hinaus hat die Koalition aus SPD, Grünen und FDP zuletzt die Abschaffung der EEG-Umlage zum 1. Juli 2022 beschlossen [69], sodass hier zusammen mit der steigenden Bedeutung von CO₂-Preisen weitere Anreize für den Eigenverbrauch zu erwarten sind [70].

Die Stromerzeugung mit PV-Anlagen ist allerdings über den Tag und saisonal sehr variabel (siehe Abbildung 6) und damit (auch in der Eigenerzeugung) nicht durchgängig vollumfänglich nutzbar. Um die Nutzbarkeit des eigenen PV-Stroms zu erhöhen, spielt daher die Standzeit der Fahrzeuge und damit das Potenzial zur Verschiebung des Ladevorgangs hin zu Tageszeiten mit hoher PV-Erzeugung eine entscheidende Rolle.

Die Variabilität der Stromerzeugung mit PV-Anlagen hat dabei nicht nur Auswirkungen auf die Eigenerzeugung, sondern auch auf den Anteil von PV am allgemeinen Strommix. Entsprechend sollte grundsätzlich der Ausbau weiterer EE im Stromsystem vorangetrieben werden. Vor diesem Hintergrund sollte z.B. – korrespondierend zum Koalitionsvertrag [66] – gerade auch der ländliche Raum, aufgrund des grundsätzlichen Platzangebots, für Windenergie bestmöglich genutzt werden. Während PV-Anlagen jedoch sowohl zur Netzeinspeisung als auch zum direkten (Eigen-)

⁴ Zumindest die direkten Emissionen betreffend (siehe Kapitel 4).

Spannungsfelder und Chancen

Verbrauch genutzt werden, wird der aus Windenergie erzeugte Strom typischerweise ins Netz eingespeist. Wie Abbildung 6 zeigt, kann durch Windenergie insbesondere auch in den Wintermonaten Strom gewonnen werden, in denen die Erzeugung aus PV-Anlagen tendenziell geringer ausfällt. Hierbei sind jedoch auch regionale Unterschiede (z.B. hinsichtlich der Windstärken) sowie weitere saisonale Schwankungen (siehe Abbildung 6) zu beachten, die beispielsweise einen Netzausbau erforderlich machen, um Strom zwischen Regionen transportieren zu können.

Um das Laden unter Nutzung von EE bestmöglich umzusetzen, sind daher Speichertechnologien bzw. ein Netzausbau oder aber auch intelligente Lademanagementsysteme denkbar bzw. erforderlich, die jeweils mit Vor- und Nachteilen verbunden sind (siehe Kapitel 3.2).

Hierbei kommt letztlich der Ladeinfrastruktur, insbesondere in Bezug auf den Standort, eine zentrale Rolle zu, die im nächsten Kapitel genauer beleuchtet wird.

3.2 Einfluss der Ladeinfrastruktur und weiterer Faktoren

Während intelligente Lademanagementsysteme auf eine Flexibilisierung des Ladevorgangs und dadurch in Teilen auch auf Verhaltensänderungen der Nutzer*innen von BEVs abzielen, so unterstützen Maßnahmen wie der Netzausbau oder die Nutzung von Speichertechnologien das Laden nach akutem Bedarf [71]. Allerdings sind hiermit

auch einige Nachteile verbunden. So erfordert Netzausbau teilweise große Eingriffe in die Natur [72], ist mit Effizienzverlusten verbunden [73, 74] und kann nicht kurzfristig umgesetzt werden. Speichertechnologien spielen daher mit einem zunehmendem Anteil volatiler Energieerzeugung bei der Flexibilisierung und Netzstabilisierung eine zentrale Rolle [75]. Unter Volatilität wird die witterungs- sowie jahres- und tageszeitlich bedingte fluktuierende Stromeinspeisung bestimmter EE, wie PV- und Windkraftanlagen, verstanden (siehe Abbildung 6). Daher bedarf es verschiedener und teils neuer Technologien, die Flexibilität bieten, um Versorgungssicherheit gewährleisten zu können [76]. In diesem Kontext sollte jedoch hinterfragt werden, wo, in welcher Häufigkeit und mit welcher Kapazität Speichertechnologien eingesetzt werden. Eine örtliche Speicherung erfolgt heute hauptsächlich durch Batteriespeicher [77], die allerdings mit Ressourcenaufwand (insb. natürlicher Ressourcen) und Effizienzverlusten verbunden sind [78, 79]. Damit wird jenes Bauteil eines BEV, welches bei der Herstellung für den größten Anteil an CO₂-Emissionen verantwortlich ist und die meisten Ressourcen verbraucht [16], im schlechtesten Fall pro Nutzer*in zweimal hergestellt (d.h., eine Batterie für das BEV und eine Batterie als Haushaltsspeicher). Entsprechend würde sich die Klimabilanz für ein BEV, welches zu Hause mit einem Batteriespeicher geladen wird, deutlich verschlechtern.

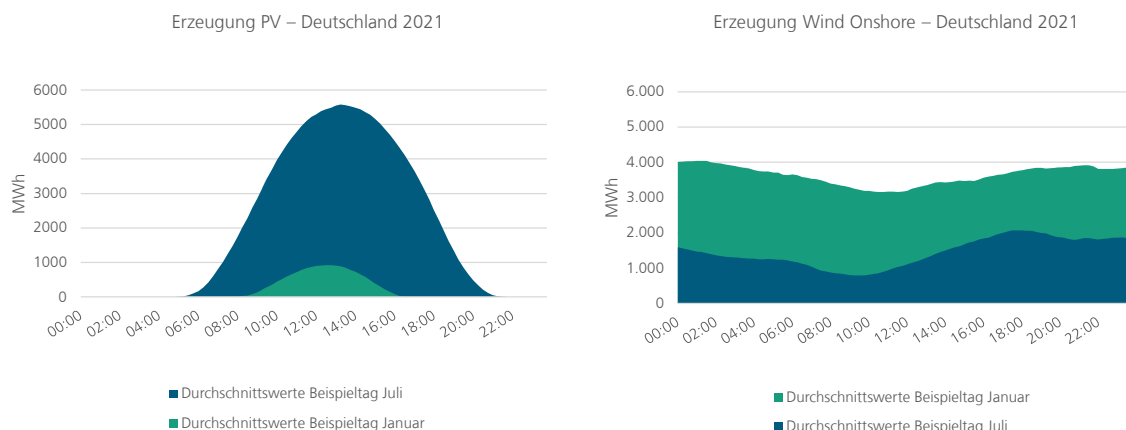


Abbildung 6: Durchschnittswerte für einen Beispieltag im Winter (Januar) und einen Beispieltag im Sommer (Juli) der Stromerzeugung in Deutschland 2021 aus PV (links) und Windkraft Onshore (rechts). Quelle: [80], eigene Darstellung

Spannungsfelder und Chancen

Daher könnte eine zentrale Planung für den zukünftigen Einsatz von Batteriespeichern – anstatt pauschal jedes Eigenheim mit einem eigenen Batteriespeicher auszustatten – in vielen Fällen dazu beitragen, weniger Ressourcen und THG zu verbrauchen. Darauf zahlen auch die Erkenntnisse aktueller Studien ein, die zeigen, dass der Anteil von PV-Strom beim Laden von Elektrofahrzeugen (Charge@Home) unter den „richtigen“ Rahmenbedingungen und durch eine intelligente Ladesteuerung auch ohne größere Einschränkungen des Nutzungsverhaltens und ohne Batteriespeicher substantiell erhöht werden kann [45].

Die konkreten CO₂-Einsparpotenziale sind insgesamt von verschiedenen Faktoren abhängig. Dabei gilt es auch zu berücksichtigen, dass lokale CO₂-Einsparungen nicht notwendigerweise positive Gesamteffekte („globale“ Einsparungen im Gesamtsystem) nach sich ziehen müssen. So besteht z.B. potenziell auch ein Spannungsfeld zwischen der Nutzung von PV-Anlagen zum Betrieb einer dezentralen Ladeinfrastruktur (siehe Kapitel 2.2) und der Nutzung zur Deckung des allgemeinen Strombedarfs von Haushalten und Unternehmen [62]. In diesem Zusammenhang spielt erneut das Stromnetz eine wesentliche Rolle: Die Energiewende führt insbesondere aufgrund des Ausbaus an EE und der wachsenden Anzahl an neuen Verbrauchsanlagen, wie den BEVs, zu einer Verlagerung und Veränderung von Stromflüssen. Das aktuelle Elektrizitätsversorgungsnetz ist auf diese Änderungen allerdings noch nicht vollumfänglich ausgelegt, was zu einer steigenden Anzahl an Netzengpässen führt [81]. In diesem Zusammenhang ist eine Kernfrage, ob bzw. wann der durch eine PV-Anlage erzeugte Strom lokal genutzt werden kann bzw. soll, insbesondere, wenn die oben bereits genannten Erzeugungsschwankungen berücksichtigt werden. Darüber hinaus kommt auch dem Ladezeitpunkt eine wichtige Rolle zu. Sollten Fahrzeuge überwiegend nachts geladen werden, so ist dies wiederum nicht direkt mit PV-Strom möglich. Vor diesem Hintergrund sind die Bewegungsprofile der Fahrzeuge wichtig, um eine intelligente Steuerung basierend auf verschiedenen Ladeszenarien (z.B. einer Kombination aus den Ladeorten Charge@Work und Charge@Home) zu ermöglichen.

Auch die Bewertung des Ladeortes hängt von verschiedenen Faktoren ab. Um Charge@Work zu ermöglichen, müssen beispielsweise entspre-

chende Stellplätze mit Ladeinfrastruktur zur Verfügung gestellt werden. Grundsätzlich ist Charge@Work aber insofern vielversprechend, als dass der Ladezeitraum typischerweise tagsüber liegt und damit eine hohe Kompatibilität zur PV-Erzeugung besteht. So kann unter anderem durch das Vermeiden von Effizienzverlusten, die beispielsweise aufgrund von Zwischenspeicherung entstehen, ein zentraler Beitrag zur Senkung der Emissionen im Verkehrssektor geleistet werden (siehe Kapitel 3.1). Zusätzlich steht die Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz einer Vielzahl von Fahrer*innen von BEVs zur Verfügung, was zu einer höheren Auslastung führt und damit dem Ressourcenaufwand für die Herstellung der Ladeinfrastruktur positiv gegenübersteht. Darüber hinaus entfallen an Werktagen zwei Drittel der Gesamtverkehrsleistung von Erwerbstätigen auf die berufsbedingte Mobilität. Diese setzt sich jeweils zur Hälfte aus dem Weg zwischen Arbeitsplatz und Zuhause sowie weiteren berufsbedingten Wegen und Reisen zusammen [14]. Der Ladebedarf hängt dabei maßgeblich von den Anfahrtswegen ab, die wiederum im kleinstädtischen und dörflichen Raum am größten sind [14]. Längere Anfahrtswegen können dazu führen, dass unterschiedliche Ladeinfrastruktur notwendig wird. Die berufsbedingte Mobilität wird sich zukünftig wahrscheinlich mit der Flexibilisierung des Arbeitsalltags (z.B. mehr Homeoffice) verändern, was es daher auch für die Ladeinfrastrukturplanung zu berücksichtigen gilt [82]. Zuletzt hängen die Einsparpotenziale davon ab, ob die Möglichkeit des Ladens am Arbeitsplatz z.B. zu einer höheren Nutzung von Individualverkehr führt und damit andere Mobilitätsformen mit geringeren THG (wie z.B. ÖPNV) verdrängt werden. Gerade in den Stadtregionen sollte (und wird) daher auch verstärkt auf alternative Mobilitätsformen mit geringen THG, wie ÖPNV und Fahrrad, gesetzt [83].

Als Alternative zur dezentralen Ladeinfrastruktur sollte auch in den ländlichen Regionen die Möglichkeit zur Nutzung von zentraler Ladeinfrastruktur (z.B. aufgrund von Platzmangel oder der fehlenden Möglichkeit am Arbeitsplatz zu laden) mitgedacht werden. Für die richtige Standortwahl sind dabei verschiedene Faktoren wie Wege und Standzeiten zu berücksichtigen. Während für längere Strecken vor allem Schnellladestationen Anwendung finden dürften, so kann für alltägliche Bedürfnisse öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur mit Ladegeschwindigkeiten ≤ 22 kW

Spannungsfelder und Chancen

(Normalladen) sinnvoll sein. Grundsätzlich kann hier die Klimawirkung des Ladevorgangs durch verschiedene Ansatzpunkte verbessert werden. Zum einen kann dies durch eine intelligente Ladesteuerung oder die richtige Anreizsetzung für Fahrer*innen von BEVs erfolgen, um zu einem aus CO₂-Sicht „günstigen“ Zeitpunkt das Fahrzeug anzuschließen bzw. noch länger stehen zu lassen. Zum anderen kann der Aufbau von PV-Anlagen oder die richtige Standortwahl dabei helfen, lokale EE für den Ladeprozess zu nutzen.

Zuletzt hat auch der Fahrzeugtyp einen großen Einfluss auf die Anforderungen hinsichtlich der Ladeinfrastruktur, sowie auf die Bewertung der Klimawirkung von BEVs. Über die letzten Jahre hinweg war ein zunehmender Trend hin zu größeren und schwereren Fahrzeugen, konkret zu sog. Sports Utility Vehicles (SUVs), zu verzeichnen. So sind heute weltweit ca. 40 % der Neuzulassungen dieser Kategorie zuzuordnen [84]. Dieser Trend gefährdet die Erreichung der Klimaziele und könnte die positive Klimawirkung der

Elektrifizierung des Individualverkehrs negativ beeinflussen. Nach dem Energiesektor trugen SUVs seit 2010 sogar am zweitstärksten zum Anstieg der weltweiten CO₂-Emissionen bei [84]. Der Trend zu SUVs überträgt sich auch auf den BEV-Markt. Neben der Nachfrage wird dieser Trend zu Elektro-SUVs auch durch den höheren Vertriebsbeitrag, den die Hersteller damit erzielen können, getrieben [85]. Zwar kann das Laden dieser Fahrzeuge auch unter den zuvor genannten Voraussetzungen emissionsfrei erfolgen, die schwereren Fahrzeuge verursachen aber durch den Reifenverschleiß beispielsweise auch mehr Feinstaubbelastung und benötigen mehr Material und Energie für die Herstellung (gleiches gilt auch für Benzin- bzw. Diesel-betriebene SUVs). Darüber hinaus ist der Energieverbrauch beim Betrieb höher [86]. Damit kann der Anstieg an SUVs – ohne, dass BEVs häufiger genutzt werden – zu höheren THG führen.

Zusammenfassung: Spannungsfelder und Chancen

- Der Anteil Erneuerbarer Energien am Strommix ist ein entscheidender Faktor bei der Bewertung der Klimawirkung von Elektrofahrzeugen. Die CO₂-Einsparpotenziale hängen jedoch von verschiedenen Faktoren wie der Ladeinfrastruktur (zentral vs. dezentral), dem Fahrzeugtyp oder auch der Nutzung alternativer Mobilitätsformen ab.
- Um den Anteil an Erneuerbaren Energien beim Laden der Elektrofahrzeuge zu verbessern, sind Speichertechnologien bzw. Netzausbau oder aber auch eine intelligente Ladesteuerung auf Basis verschiedener Ladeszenarien (z.B. dem Ausbau Erneuerbarer Energien und einer Kombination verschiedener Ladeorte wie Charge@Work und Charge@Home) erforderlich.
- Speichertechnologien spielen bei der Flexibilisierung und Netzstabilisierung eine zentrale Rolle, sind jedoch häufig mit teils hohem Ressourcenaufwand (insb. natürlicher Ressourcen) und Effizienzverlusten verbunden. Entsprechend besteht hier noch weiterer Forschungsbedarf.
- Netzausbau ermöglicht eine teilweise (räumliche) Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch, erfordert jedoch teilweise große Eingriffe in die Natur und ist ebenfalls mit Effizienzverlusten verbunden.

4

Fokusanalyse - Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszenarien



Fokusanalyse – Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszenarien

4 Fokusanalyse – Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszenarien

Da mit der Elektrifizierung des Individualverkehrs insbesondere CO₂-Einsparungen angestrebt werden, sollten diese auch ein entscheidendes Kriterium für beispielsweise die Bewertung des Auf- und Ausbaus von Ladeinfrastruktur darstellen. Daher werden im Folgenden mögliche CO₂-Einsparungen für unterschiedliche Charge@Home- und Charge@Work-Ladeszenarien anhand von ersten, indikativen Hochrechnungen einander gegenübergestellt. Diese Hochrechnungen stützen sich auf den Strommix für Gesamtdeutschland⁵, die Daten beziehen sich auf das Jahr 2021 (aufgeschlüsselt nach den verschiedenen Erzeugungstechnologien in 15 Minuten Intervallen) [87]. Als Werte für die Emissionsfaktoren der Erzeugungstechnologien werden dabei die Hochrechnungen des Umweltbundesamtes für die Gesamtemissionen herangezogen [88]. Das bedeutet, dass neben den Emissionen aus dem Anlagenbetrieb auch die indirekten Emissionen⁶ berücksichtigt werden. Die Werte werden als CO₂-Äquivalent (CO₂-Äq.) in g/kWh angegeben. Für eine Kilowattstunde erzeugte Energie aus einer PV-Anlage bedeutet das damit ein CO₂-Äq. von 66,73 g/kWh [88] anstatt von 0 g/kWh (für den Fall, dass die indirekten Emissionen nicht berücksichtigt werden).

Für die Hochrechnungen wurde eine Ladegeschwindigkeit von 11 kW angenommen, um das aktuelle Normalladen abzudecken [53]. In Bezug auf das Fahrzeug spielt insbesondere der Verbrauch eine wichtige Rolle. Im vorliegenden Fall wurden die technischen Angaben des Fahrzeugmodells VW ID.3, eines der Fahrzeugmodelle, das zuletzt unter den Top 3 der am häufigsten neuzugelassenen Modelle in Deutschland lag, verwendet. Der VW ID.3 verbraucht nach WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Proce-

dure) 15,4 kWh/100km [89]. Damit liegt der Verbrauch des VW ID.3 pro 100 km im unteren Mittelfeld verschiedener angebotener Fahrzeugmodelle – im Vergleich dazu weist ein VW e-Up beispielsweise nach WLTP einen Verbrauch von 14,4 kWh/100km auf [90] und ein Mercedes-Benz EQC einen WLTP von 21,3 kWh/100km [91]. Die Verbrauchswerte nach WLTP liegen häufig unter den Verbrauchswerten der Realweltnutzung – beim VW ID.3 hat z.B. der ADAC Ecotest einen Verbrauch von 19,3 kWh/100km anstatt der nach WLTP 15,4 kWh/100km gemessen. Daher ist anzumerken, dass die Emissionen pro Ladevorgang im Schnitt deutlich über den hier dargestellten Hochrechnungen liegen können, da durch den höheren Verbrauch die Lademenge zunimmt.

Im Folgenden werden zur Analyse möglicher Einsparungen von CO₂-Äq. verschiedene Typtage, d.h. Tage mit speziellen Ausprägungen, aus dem Jahr 2021 betrachtet. Die insgesamt sechs Typtage wurden über den Anteil der Erzeugung aus volatilen EE identifiziert. Dabei wurden jeweils drei Typtage mittels (1) der aggregierten Erzeugung aus Wind (On- und Offshore) und PV sowie (2) der reinen Erzeugung aus PV bestimmt. Die drei Typtage entsprechen in beiden Fällen jeweils (a) einem Tag mit Maximalwert der Erzeugungsart, (b) einem Tag, der den Median an anteilig erzeugter Energie aus der Erzeugungsart darstellt, und (c) einem Tag mit Minimalwert der Erzeugungsart. Die Typtage mit Maximal- und Minimalwerten werden herangezogen, um mögliche Extremwerte der Einsparung abbilden zu können. Mit dem Typtag, der den Median abbildet, wird ein „typischer“ Tag für die Analysen herangezogen (ohne die Schwankungen über den Tag hinweg zu mitteln). Die identifizierten Typtage für das Jahr 2021 liegen dabei über das Jahr verteilt und bis auf den Typtag „Minimalwert Anteil PV (2c)“ am 04.01.21 (Winter) alle in den Übergangsjahreszeiten Herbst und Frühling. Die verschiedenen Typtage in Bezug auf den Strommix ((1) und (2)) sind zur Übersicht – neben den anderen Ausprägungen – nummeriert in Tabelle A.1 (Anhang) nachzulesen.

⁵ Eine lokale Optimierung führt in der Regel nicht zum gesamtsystemischen Optimum und kann damit die Energiewende hemmen, deshalb ist eine integrierte Betrachtung für Gesamtdeutschland erforderlich.

⁶ Unter indirekten Emissionen werden alle Emissionen von der Gewinnung über die Aufbereitung, den Transport der Brennstoffe bis hin zur Herstellung der Anlagen und dem Einsatz von fremdbezogener Hilfsenergie im Anlagenbetrieb verstanden [88].

Fokusanalyse – Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszenarien

Durch die Auswahl der Typtage hinsichtlich der Unterscheidung nach der Erzeugung aus EE mit (1) und ohne Wind (2) kann der Einfluss möglicher zusätzlicher PV-Anlagen auf den Einfamilienhäusern (für Charge@Home) oder den Büro- und Industriegebäuden (für Charge@Work) im Hinblick auf den Ladezeitpunkt und potenzielle Einsparungen von CO₂-Emissionen genauer betrachtet werden.

Da sich Charge@Home und Charge@Work für eine durchschnittliche Woche, in welcher der Weg zur Arbeit mit dem BEV zurückgelegt wird, in der Regel insbesondere durch die Ladezeitpunkte unterscheiden, wurden für die Analyse verschiedene Startzeitpunkte des Ladevorgangs angenommen: Für Charge@Work wurde die Unterscheidung zwischen einem Start des Ladevorgangs am Morgen (Mo-Fr, 09.00 Uhr) und während der Mittagszeit (Mo-Fr, 12.00 Uhr), um die Sonnenstunden besser auszunutzen, vorgenommen. Für Charge@Home wird zwischen einem Laden am Abend (Mo-So, 18.00 Uhr) und am Nachmittag (Mo-So, 16.00 Uhr) unterschieden, um erneut den Einfluss der Sonnenstunden näher analysieren zu können. Da ein tägliches Aufladen von BEVs für die meisten durchschnittlichen Fahrtstrecken nicht notwendig ist – wenn gleich regelmäßiges Laden auf moderate Ladestände empfohlen wird [92] –, wurde zusätzlich zwischen dem täglichen Aufladen und einem einmaligen Aufladen pro Woche unterschieden. Für das Aufladen eines Fahrzeugs wird angenommen, dass bei jedem Ladevorgang mit einer linearen Ladekurve bis zur maximalen Batteriekapazität geladen wird.

Um die unterschiedliche Jahresfahrleistung im urbanen und ländlichen Raum einfließen zu lassen, wurde die in Kapitel 2.1 aufgezeigte Aufteilung in urbanen, suburbanen und ländlichen Raum (siehe Abbildung 2) herangezogen und die Werte für die Jahresfahrleistung im ländlichen Raum berechnet. In Abbildung 5 in Kapitel 2.1 sind die zur Berechnung herangezogenen Werte abzulesen. Auf Basis der durchschnittlichen Jahresfahrleistung wurde anschließend die durchschnittliche Fahrleistung pro Woche bestimmt und als Parameter in der Analyse berücksichtigt. Die zurückgelegten Kilometer haben dabei einen Einfluss auf die benötigte Energiemenge und damit auf die Ladedauer. In Tabelle A.1 (Anhang) sind alle Parameter inklusive Ausprägungen zusammengefasst dargestellt.

Da Charge@Home laut verschiedenen Studien aktuell den häufigsten Ladeort für ein privates BEV darstellt und der Fokus dieser Studie auf dem ländlichen Raum liegt (d.h. es wird davon ausgegangen, dass größtenteils ein entsprechendes Platzangebot für die Umsetzung von Charge@Home vorliegt), wird zuerst Charge@Home inkl. der Jahresfahrleistung für den ländlichen Raum analysiert. Dabei wird für die erste Analyse davon ausgegangen, dass das BEV nur einmal pro Woche geladen wird. Um hierfür den Einfluss der abweichenden Ladezeitpunkte für die verschiedenen Typtage näher aufzuzeigen, werden in Abbildung 7 die verschiedenen Startzeitpunkte des Ladevorgangs (18.00 Uhr und 16.00 Uhr) jeweils gegenübergestellt.

Die Ergebnisse zeigen für die Hochrechnungen, dass die Tageszeit für die Ladung des BEVs insbesondere bei einem hohen Anteil PV-Energie ggü. den anderen Energieträgern einen erheblichen Einfluss auf die Emissionen haben kann. Allein durch den früheren Startzeitpunkt des Ladevorgangs (16.00 Uhr vs. 18.00 Uhr) können bei entsprechender PV-Erzeugung erhebliche Einsparungen erzielt werden. Laut den vorliegenden indikativen Hochrechnungen können die Einsparungen für den Typtag, der den Median des Anteils aus EE (1b) darstellt, bei ca. 12 % und bei einem Typtag, der sich durch einen Maximalwert an PV-Erzeugung (2a) auszeichnet, sogar bei bis zu 24 % liegen, wenn der Ladevorgang zu Hause (Charge@Home) bereits um 16.00 Uhr anstelle von 18.00 Uhr gestartet wird.

Um die Effekte der unterschiedlichen Ladestartzeitpunkte etwas genauer zu beleuchten, wurden für die beiden in Abbildung 7 markierten Typtage mit dem höchsten Einsparpotenzial zusätzlich zu den Charge@Home-Werten die Charge@Work-Werte für zwei unterschiedliche Ladestartzeitpunkte, morgens (09.00 Uhr) und mittags (12.00 Uhr), für den Vergleich herangezogen. Abbildung 8 stellt diesen Vergleich dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der angedeutete Trend aus Abbildung 7 in dem weiteren Vergleich für den Ladevorgang bei Charge@Work bestätigt. Durch das Vorziehen des Ladevorgangs auf die Morgenstunden bzw. die Mittagszeit können die Sonnenstunden besser genutzt und damit die erzeugte Energie aus PV-Anlagen direkt geladen werden (siehe auch die Durchschnittswerte der

Fokusanalyse – Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszenarien

Stromerzeugung einer PV-Anlage für einen Beispieltag in Abbildung 6). Durch die Verschiebung des Ladevorgangs auf die Morgenstunden bzw. Mittagszeit können damit noch größere Einsparungen an Emissionen ermöglicht werden. Insbesondere der Vergleich der Emissionswerte zwischen dem Ladestartzeitpunkt um 18.00 Uhr (Charge@Home) mit dem Ladestartzeitpunkt um 12.00 Uhr (Charge@Work) ermöglicht im besten Fall eine Einsparung von bis zu 47 % bzw. 48 % (je nach Strommix). Wichtig ist für diesen Vergleich einzuordnen, dass bei den vorliegenden Hochrechnungen keine Netzrestriktionen berücksichtigt wurden, wobei die örtliche Verteilung von Stromerzeugung und -verbrauch in der Realwelt nicht vernachlässigt werden kann. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch die Installation von PV-Modulen direkt am Ladeort der erzeugte Strom bei angepasstem Ladezeitpunkt mit minimal möglichen Effizienzverlusten direkt geladen werden kann. Dies kann wiederum den Bedarf an Netzausbau reduzieren und einen entsprechenden Beitrag zur Umsetzung der Energiewende leisten. Diese ersten Vergleiche deuten bereits auf die Notwendigkeit hin, den Ausbau an EE direkt in Abhängigkeit der geplanten Nutzung zu betrachten und voranzutreiben, sowie die Nutzung der erzeugten Energie aus EE weiter zu verbessern.

Um auch die unterschiedliche Ladehäufigkeit und den Startzeitpunkt des Ladevorgangs in Bezug zueinander setzen zu können, wird in Abbildung 9 im Vergleich zu Abbildung 8 die Ladehäufigkeit von einmal wöchentlich auf täglich verändert. In Summe laden die BEVs dann über die Woche aggregiert die gleiche Energiemenge, allerdings wird im Fall des einmal wöchentlichen Ladens das Fahrzeug nur an einem Tag, beispielsweise freitags, an die Ladeinfrastruktur angeschlossen, wohingegen das BEV beim täglichen Laden jeden Arbeitstag (Mo–Fr) bei Charge@Work bzw. jeden Tag (Mo–So) bei Charge@Home angeschlossen wird.

Durch die Gegenüberstellung wird deutlich, dass sich die Emissionswerte annähern und insbesondere, dass Charge@Home mit Ladestartzeitpunkt 16.00 Uhr sogar bessere Emissionswerte aufweisen kann als Charge@Work mit Ladestartzeitpunkt 09.00 Uhr (siehe Abbildung 9). Diese Veränderung der Emissionswerte lässt sich dadurch erklären, dass beim täglichen Laden eine geringere Lademenge je Ladevorgang erforderlich ist und sich damit die tägliche Ladedauer verkürzt. Das führt wiederum dazu, dass mit dem Ladestartzeitpunkt um 16.00 Uhr täglich mehr „Sonnenminuten“, d.h. ein höherer Anteil PV-Strom im Strommix, für das Laden genutzt werden kann, als bei einem Ladestartzeitpunkt um 09.00 Uhr – siehe die Durchschnittswerte für einen Beispieltag aus PV in Abbildung 6. Dadurch lässt sich ableiten, dass das individuelle Verhalten, d.h. der Zeitpunkt, zu welchem das BEV geparkt ist und geladen werden kann, einen großen Einfluss auf die geeignete Ladeinfrastruktur je BEV-Fahrer und damit auf die Emissionseinsparungen hat.

Durch den Vergleich von täglichem und wöchentlichem Laden ist darüber hinaus abzuleiten, dass auch die zu ladende Energiemenge je Ladevorgang eine wesentliche Rolle bei den möglichen Einsparungen spielt, da beim täglichen Aufladen die Ladedauer je Ladevorgang reduziert und damit die Sonnenstunden ggf. besser ausgenutzt werden können. Zwar ist im Normalfall ein tägliches Laden nicht nötig, dennoch kann durch tägliches Anschließen der BEVs an die Ladeinfrastruktur in Verbindung mit einer intelligenten Steuerung der Ladevorgänge die Energie aus PV bzw. EE besser genutzt und je nach vor Ort Erzeugung und Strommix verbessert werden. Mögliche technologische Weiterentwicklungen, die zusätzlich dazu beitragen, dass BEVs einen positiven Hebel für die Nutzung von Flexibilität haben, werden in Kapitel 5.2 näher beschrieben.

Fokusanalyse – Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszenarien

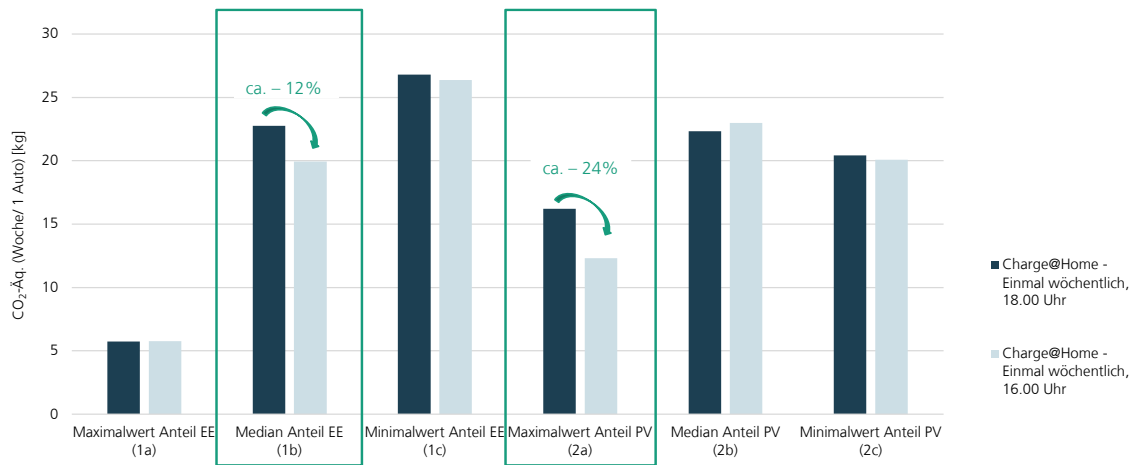


Abbildung 7: Unterschiedliche Startzeitpunkte des Ladevorgangs für einmal wöchentliches Laden Charge@Home (18.00 Uhr vs. 16.00 Uhr) – Vergleich der CO₂-Äq. für die unterschiedlichen Typtage. Hinweis: Die dargestellten Werte basieren auf den Hochrechnungen für ein BEV und dem Strommix aus dem Jahr 2021. Sie geben daher einen indikativen Richtwert für mögliche Emissionen bzw. Einsparungen an. Quelle: Eigene Darstellung.

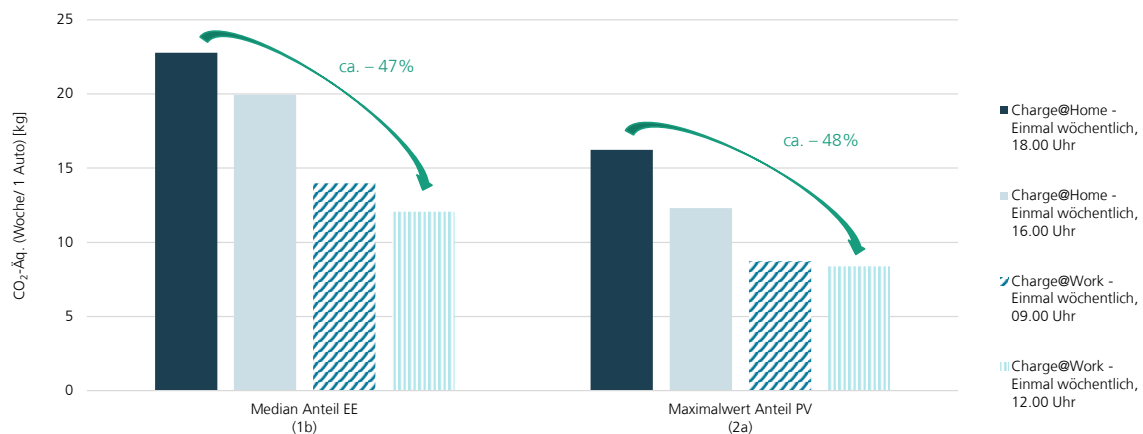


Abbildung 8: Unterschiedliche Startzeitpunkte des Ladevorgangs für einmal wöchentliches Laden Charge@Home (18.00 Uhr vs. 16.00 Uhr) und Charge@Work (09.00 Uhr vs. 12.00 Uhr) – Vergleich der CO₂-Äq. für die Typtage „Median Anteil EE“ und „Maximalwert Anteil PV“. Hinweis: Die dargestellten Werte basieren auf den Hochrechnungen für ein BEV und dem Strommix aus dem Jahr 2021. Sie geben daher einen indikativen Richtwert für mögliche Emissionen bzw. Einsparungen an. Quelle: Eigene Darstellung.

Fokusanalyse – Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszenarien

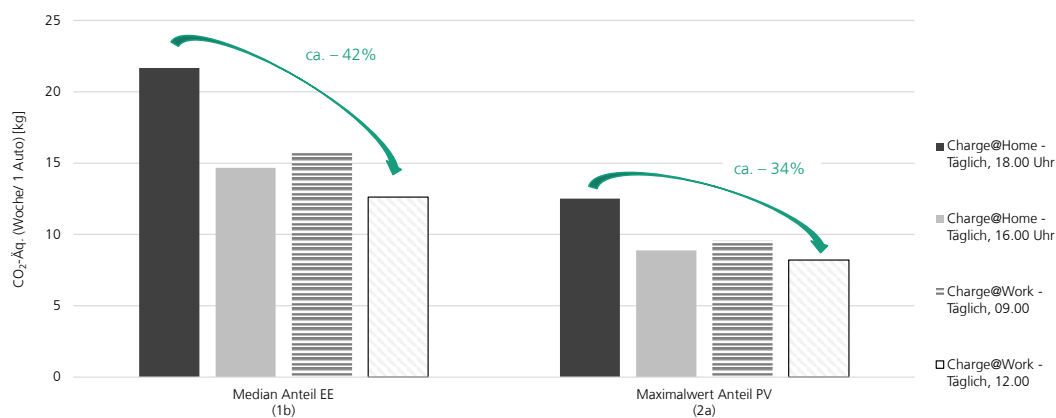


Abbildung 9: Unterschiedliche Startzeitpunkte des Ladevorgangs für tägliches Laden Charge@Home (18.00 Uhr vs. 16.00 Uhr) und Charge@Work (09.00 Uhr vs. 12.00 Uhr) – Vergleich der CO₂-Äq. für die Typtage „Median Anteil EE“ und „Maximalwert Anteil PV“. Hinweis: Die dargestellten Werte basieren auf den Hochrechnungen für ein BEV und dem Strommix aus dem Jahr 2021. Sie geben daher einen indikativen Richtwert für mögliche Emissionen bzw. Einsparungen an. Quelle: Eigene Darstellung.

Um indikativ abzuschätzen, wie groß der Hebel der Einsparungen für unterschiedliche Ladeszenarien insgesamt ist, wurden im nächsten Schritt die Emissionen von einem Fahrzeug simplifiziert auf einen vollständig elektrifizierten Bestand an Fahrzeugen in Deutschland hochgerechnet. Dafür wurde die regionale Verteilung des heutigen Fahrzeugbestands in Bezug auf den urbanen, suburbanen und ländlichen Raum berücksichtigt [41] und die Hochrechnung für den ländlichen Raum in Abbildung 10 dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass im ländlichen Raum ein signifikantes Potenzial vorliegt, um mithilfe eines Ausbaus und der entsprechend intelligenten Nutzung der Ladeinfrastruktur, beispielsweise durch die Anwendung geeigneter Lademanagementsysteme, weitere CO₂-Emissionen einzusparen. Nach den Abschätzungen könnten sich abhängig vom Strommix – das bedeutet unter Berücksichtigung des aktuellen Bestands an EE und insbesondere abhängig von den Wetterbedingungen – die Einsparungen pro Woche an CO₂-Äq. für den ländlichen Raum beim Verschieben des Ladevorgangs von Charge@Home auf Charge@Work auf ca. 215.000 Tonnen mit Typtagen „Median Anteil EE“ und auf ca. 157.000 Tonnen mit Typtagen „Maximalwert Anteil PV“ belaufen. Werden diese Werte beispielhaft mit einem vergleichbaren

Fahrzeug der Kompaktklasse mit Benzin- bzw. Dieselantrieb, dem VW Golf⁷, verglichen, so ergäbe sich in den entsprechenden Wochen bei gleicher Anzahl an Fahrzeugen ein Klimavorteil beim Betrieb der BEVs von ca. 69 % bzw. 66 % („Median Anteil EE“) und ca. 79 % bzw. 76 % („Maximalwert Anteil PV“) gegenüber Benzin- bzw. Dieselfahrzeugen.

Insgesamt ist es wichtig, die bereits aufgezeigten sowie die folgenden Abschätzungen entsprechend einzuordnen, da die Einsparungen nicht einfach auf eine Woche bzw. das ganze Jahr hochgerechnet werden können. Aufgrund sich ändernder Wetterbedingungen treten die für die Berechnung herangezogenen Typtage nur vereinzelt auf. Bei der simplifizierten und künstlich angenommenen Verteilung der Typtage auf ein Jahr – mit 30 Typtagen „Maximalwert Anteil PV“, 216 Typtagen „Median Anteil PV“ und 119 Typtagen „Minimalwert Anteil PV“ – ergibt sich für eine Verschiebung des Startzeitpunktes des Ladevorgangs von Charge@Home 18.00 Uhr auf Charge@Work 12.00 Uhr unter den genannten Annahmen beispielsweise ein potenzielles Einsparpotenzial von ca. 3,27 Mio. t CO₂-Äq. Diese exemplarische Gegenüberstellung zeigt deutlich,

⁷ Golf Life 1,5 l TSI, 110 kW bzw. Golf Life 2,0 l TDI DSG, 110 kW

Fokusanalyse – Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszenarien

dass je nach Ladeszenario großes Potenzial für Einsparungen vorhanden ist.

Zuletzt werden aktuelle Daten für den Strommix in Deutschland (2021) mit Hochrechnungen für ein mögliches Zukunftsszenario (2037) verglichen. Es wurden die Daten aus dem Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 [93] herangezogen und das Szenario B 2037 gewählt, insbesondere, da die Werte für den Ausbau an EE im Szenariopfad B zwischen Szenariopfad A und C liegen. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 10 dargestellt. Da sich in der Betrachtung im Vergleich zum Ausgangsszenario (2021) lediglich der Strommix ändert, können bei einem Ausbau an EE die Emissionen für den Betrieb der BEVs weiter deutlich gesenkt und entsprechend ein entscheidender Beitrag zur Energiewende geleistet werden. Dabei ist auch zu erkennen, dass sich die Einsparungen an Emissionen für den Ladevorgang zu Hause (Charge@Home, Einmal wöchentlich 18.00 Uhr) und den Ladevorgang am

Arbeitsplatz (Charge@Work, Einmal wöchentlich 12.00 Uhr) für den Typtag „Median Anteil EE“ annähern. Daraus ist abzuleiten, dass ein Ausbau an Windenergie – Windenergie ist über den Tag nicht so volatil wie PV (siehe Abbildung 6) – dazu beitragen kann, dass der Startzeitpunkt des Ladevorgangs unter Berücksichtigung des Strommix nicht mehr ganz so entscheidend für zusätzliche Einsparungen je Ladevorgang ist. Allerdings wird es in Bezug auf den Netzausbau auch in einem Zukunftsszenario von großer Relevanz sein, Nachfrage und Erzeugung zusammen zu bringen. Da in unseren Hochrechnungen keine Netzrestriktionen berücksichtigt werden, ist auch hier entscheidend, den Nachfrageort und den Nachfragezeitpunkt für den Ausbau der EE sowie für die Planung geeigneter Ladeinfrastruktur zu berücksichtigen.

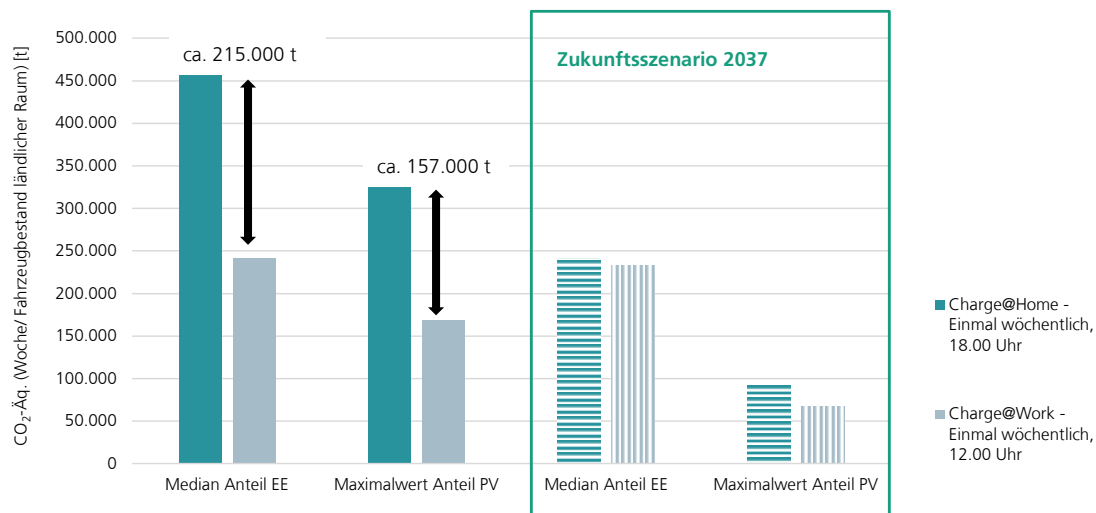


Abbildung 10. Hochrechnung der Emissionen auf die Elektrifizierung des Fahrzeugbestandes im ländlichen Raum inkl. Zukunftsszenario für 2037 [93]. Unterschiedliche Startzeitpunkte des Ladevorgangs für einmal wöchentliches Laden Charge@Home (18.00 Uhr) vs. Charge@Work (12.00 Uhr) – Vergleich der CO₂-Äq. für die Typtage „Median Anteil EE“ und „Maximalwert Anteil PV“. Hinweis: Die dargestellten Werte basieren auf den Hochrechnungen für ein BEV und dem Strommix aus dem Jahr 2021. Sie geben daher einen indikativen Richtwert für mögliche Emissionen bzw. Einsparungen an. Quelle: Eigene Darstellung.

Fokusanalyse – Abschätzung von CO₂-Einsparungen im Hinblick auf unterschiedliche Ladeszenarien

Zusammenfassung: Fokusanalyse

- Das Verschieben der Startzeitpunkte des Ladevorgangs bietet großes Potenzial, Emissionen einzusparen. Insbesondere das Laden am Arbeitsplatz (Charge@Work) ermöglicht relevante Einsparungen, da z.B. die Sonnenstunden für die PV-Erzeugung direkt ausgenutzt werden können.
- Durch tägliches Anschließen/Laden der Elektrofahrzeuge kann die vorhandene Flexibilität genutzt und durch technologische Weiterentwicklungen, wie beispielsweise intelligente Lademanagementsysteme, eine weiter verbesserte Steuerung sichergestellt werden, was perspektivisch zusätzliche Einsparungen ermöglicht.
- Durch die hohe Anzahl an Fahrzeugen und die gefahrenen Kilometer besteht im ländlichen Raum großer Handlungsbedarf, das Thema Elektrifizierung des Individualverkehrs anzugehen und eine zukunftsorientierte Ladeinfrastruktur aufzubauen.
- Der Strommix bestimmt die Emissionen pro Ladevorgang, wodurch insbesondere der Ausbau an Erneuerbaren Energien einen positiven Einfluss auf die Reduktion der Emissionen des Ladestroms hat. Hierbei ist es notwendig, die regionalen Gegebenheiten für den Ausbau sowie die Nutzung der EE mit der Entwicklung der Elektrifizierung des Individualverkehrs im ländlichen Raum zu synchronisieren. Dabei gilt es neben dem Ausbau von PV-Anlagen – im Optimalfall direkt am Ladeort – auch den Ausbau von Windanlagen zu berücksichtigen.

5

Ausblick



5 Ausblick

5.1 Ausblick Systemperspektive

Würden die vorhandenen 44 Millionen Pkws Einzu-eins durch BEVs ersetzt werden, so würde sich der Strombedarf in Deutschland schätzungsweise um rund 130 TWh im Jahr erhöhen [94]. Im Vergleich dazu: Der Gesamtenergieverbrauch in Deutschland liegt aktuell bei 550 TWh [94]. Zusätzlich zu einer Veränderung auf der Nachfragerseite verändert sich auch die Erzeugungsseite. Durch den Ausbau von EE wird diese, wie in Kapitel 3.2 erläutert, sehr volatil und kann weniger gezielt gesteuert werden. Darüber hinaus wird sich durch die Zunahme vieler neuer Verbrauchseinheiten, wie z.B. den BEVs, die durch zeitweise punktuelle Lastspitzen inkl. Ladeleistungen den Haushaltsverbrauch substanziell erhöhen, die Belastung des Stromnetzes deutlich verändern [95, 96]. Dabei muss hinsichtlich einer zuverlässigen Stromversorgung insbesondere berücksichtigt werden, dass das Stromnetz in Deutschland nicht einer „Kupferplatte“⁸ entspricht, sondern vermehrt Netzengpässe auftreten.

Auch kann ggf. weniger neue Ladeinfrastruktur installiert werden, da zugrundeliegende Netzan-schlüsse nicht ausreichen: Im Falle von Charge@Home besteht beispielsweise auf Haus-ebene für Mehrfamilienhäusern mit Tiefgaragen-stellplätzen oder für Straßenzüge, in denen jedes Grundstück Ladeinfrastruktur aufbauen möchte, eine begrenzte Netzanschlusskapazität [58]. So ist es möglich, dass bei einem Zubau von privater La-deinfrastruktur durch Wallboxen nicht jedem Haus gewährt werden kann, eine eigene Ladein-frastruktur aufzubauen. Um diese Einschränkungen zu umgehen, ist es notwendig, dass die Ladeinfrastruktur über mehrere Häuser hinweg gesteuert bzw. zumindest die Ladeleistung redu-ziert werden kann.

Über den aktuellen Stand des Fortschritts des Ausbaus der Ladeinfrastruktur im privaten Um-feld und die Ausprägung typischer Ladeprofile fehlen Informationen bzw. existieren teils unvoll-ständige Daten. Dieser Mangel an Informationen führt dazu, dass Voraussagen über zukünftig auf-tretende Lastspitzen und damit möglicherweise auftretende Netzengpässe schwerer getroffen werden können [97]. Die beschriebenen unter-

schiedlichen Rahmenbedingungen und Verände-rungen – regional unterschiedliche Verteilung der Erzeugung und begrenzte Netzanschlusskapazi-täten – führen auch dazu, dass bei einer steigen- den Anzahl an BEVs ein Netzausbau vermutlich unumgänglich ist. Dabei ist ein Netzausbau in Be-zug auf die Planungs- und Umsetzungszeit nur in der Mittel- bis Langfristspektive realisierbar. Zusätzlich hat ein Netzausbau teilweise große Ein-griffe in die Natur zur Folge [72]. Dabei haben diese Eingriffe insbesondere auch Einfluss auf den Lebensraum der beheimateten Tierwelt, teilweise eine Rodung von Bewuchs zur Folge und gehen mit einem hohen Verbrauch von Fläche einher. Sind neben Freileitungen auch Erdarbeiten not-wendig, so können die Tiefbauarbeiten ebenso Lebensraum zerstören sowie die natürliche Schichtung der Böden negativ beeinflussen [98, 99].

Allerdings bietet die Zunahme an BEVs, die als kleine flexible Verbrauchseinheiten angesehen werden können, neben einigen Herausforderun-gen auch vielfältige Chancen. Wenn durch den Einsatz von technologischen und digitalen Wei-terentwicklungen (siehe auch Kapitel 5.2) die Fle-xibilität von Ladeprozessen genutzt werden kann, so ist es möglich, die lokale Einspeisung von EE zu verbessern und Schwankungen der volatilen Er-zeugung besser auszugleichen. Um die Ladeleis-tung der BEVs noch flexibler steuern zu können, sind längere Stand- als Ladezeiten von Bedeu-tung. Charge@Home und Charge@Work bieten hierfür großes Potenzial, da die Fahrzeuge in der Regel über einen längeren Zeitraum hinweg ste-hen und die Standzeiten die Anforderungen, wie beispielsweise den Abfahrtszeitpunkt, der Fah- rer*innen nicht direkt beeinflussen [58].

Bei Charge@Work könnte zudem, abhängig da-von, ob es sich um eine energieintensive Industrie handelt und je nach Erzeugung aus EE vor Ort bzw. der Flexibilität des Energieverbrauchs, ein hohes Steuerungspotenzial bestehen [100]. Für die Umsetzung eines verbesserten Lademanage-mentsystems am Ladeort ist dabei sowohl der Ein-satz digitaler Technologien auf Seiten des de-zentralen Verbrauchers erforderlich als auch die Digitalisierung des Netzes, um den Netzzu-stand bestmöglich überwachen und bei Bedarf eingreifen zu können.

⁸ Annahme eines unbeschränkten Stromflusses.

Daher könnten für eine erfolgreiche Netzintegration die folgenden Aspekte geeignete Lösungsansätze darstellen: 1) Die intelligente Steuerung dezentraler und steuerbarer flexibler Verbrauchseinheiten. 2) Eine Anreizsetzung für Fahrer*innen von BEVs, damit BEVs zum „passenden“ Zeitpunkt angeschlossen sind und geladen werden können. Dies könnte beispielsweise durch Preismechanismen und sonstige marktliche Anreizmechanismen umgesetzt werden, um eine intelligente Integration dezentraler und steuerbarer Verbrauchseinheiten auf Verteilnetzebene zu unterstützen und Lastspitzen im Netz zu glätten bzw. in Zeiten eines hohen EE-Anteils zu verschieben [101]. Neben dynamischen Netzentgelten, die sowohl eine Steuerung nach der aktuellen Auslastung im Netz als auch nach weiteren Faktoren, wie z.B. dem CO₂-Gehalt des Stroms, ermöglichen, könnte im Bereich der marktlichen Anreizmechanismen auch auf Nodal Pricing zurückgegriffen werden. Nodal Pricing bezieht sich auf lokal unterschiedliche Preise für den Kauf und Verkauf von Strom [101–103]. Allerdings stehen diesen möglichen Lösungsansätzen aktuell noch falsche bzw. veraltete regulatorische Ansätze gegenüber. Für die Umsetzung ist beispielsweise ein hoher Digitalisierungsgrad erforderlich. Durch Investitionsverzinsungen ist der Netzausbau für Netzbetreiber aktuell deutlich lukrativer als der Ausbau von Sensorik und IT-gestützter Steuerungssysteme. Dabei wachsen die Anforderungen an intelligente Netze stetig [104].

Als Zielwelt sollte daher mit Blick auf die Systemperspektive ein integriertes und gekoppeltes Energiesystem mit Strom, Wärme und Verkehr angestrebt werden, in welchem BEVs ein wichtiges und aktives Element darstellen, um das Stromnetz zu stabilisieren und Energie kurzfristig zu speichern.

5.2 Ausblick technologischer Weiterentwicklungen mit Fokus auf bidirektionalem Laden

Da sich die Elektromobilität noch im Aufbau befindet und generell ein Wandel der Mobilität – im Sinne von neuen Mobilitätsformen – stattfindet, gibt es technologisch noch großes Potenzial an Weiterentwicklungen. Dabei ist die Digitalisierung grundsätzlich ein wesentlicher Treiber des Wandels. Durch Vernetzung, Sensorik und das Verarbeiten der erfassten Daten entstehen neue Geschäftsmodelle, welche die Mobilität, und auch die Elektromobilität, verändern können [94,

105]. Dabei ist es wichtig, die Veränderungen durch die Digitalisierung integriert zu betrachten, denn nur durch eine integrierte Stadt-, Mobilitäts- und Verkehrsplanung lassen sich neue Services für eine gute Mobilitätsversorgung der Bürger*innen erfolgreich und nachhaltig umsetzen [106].

Vernetzte Fahrzeuge könnten z.B. ein erster Schritt sein, um den Verkehrsfluss zu verbessern. Durch den Austausch von Echtzeitinformationen können Verkehrsströme verbessert und damit Staus reduziert bzw. vermieden werden. Der Energieverbrauch pro gefahrenem Kilometer lässt sich so reduzieren [105]. Eine zunehmende Vernetzung von Fahrzeugen kann auch als Einstiegspunkt für andere, insbesondere geteilte, Mobilitätsoptionen dienen. Durch eine intelligente Steuerung können so Mobilitätsbedürfnisse der Bürger*innen (flexibles Reisen von A nach B) adressiert und gleichzeitig die Notwendigkeit des individuellen Fahrzeugbesitzes reduziert werden. Die Idee dahinter ist Mobilität-on-Demand, was bedeutet, dass neben den unterschiedlichen Sharing-Angeboten Fahrzeuge und Shuttles nicht mehr nach einem festen Fahrplan fahren, sondern den Fahrplan je nach Bedarf anpassen. So lässt sich insbesondere auch der ländliche Raum durch individuelle Fahrten großflächig erschließen. Die Auslastung der Mobilitätsangebote kann gesteigert und unnötige Fahrten können reduziert werden [105]. Eine Erweiterung dieser Optionen stellt autonomes Fahren dar. Bei einem vollautomatisierten und autonomen Fahrzeug ist kein Fahrer mehr notwendig und autonomes Fahren kann damit einen wesentlichen Beitrag leisten, das Konzept der vernetzten und nach Bedarf gesteuerten Mobilität umzusetzen [94]. Bei dieser Form der Mobilität ist auch der Einsatz von künstlicher Intelligenz möglich, um die Ausgestaltung und Auslastung der Mobilitätsangebote zukünftig noch weiter verbessern zu können [106].

Auch für eine optimale Ausnutzung der Ladeinfrastruktur kann die Digitalisierung einen großen Beitrag leisten. Die Zugangsmöglichkeit zu Ladeinfrastruktur wird aktuell meist in privat, halböffentlich und öffentlich unterschieden (siehe Tabelle 1). Allerdings könnte der Nutzerkreis von privater und halböffentlicher Ladeinfrastruktur beispielsweise über eine digitale Plattform sowie offene Standards zur Anbindung neuer Mobilitätsoptionen und optimierter Zahlungsoptionen geöffnet und umgesetzt werden [107]. So wäre es denkbar, dass die private Nutzung

Ausblick

(Charge@Home) oder die Nutzung durch Arbeitnehmer im Fall von Charge@Work weiterhin priorisiert erfolgt, darüber hinaus aber eine Buchung der Ladeinfrastruktur durch weitere Fahrer*innen von BEVs möglich ist. Dadurch lassen sich unter anderem bei der Herstellung von Ladeinfrastruktur THG einsparen, da weniger dezentrale Ladeinfrastruktur notwendig wäre, um den Bedarf an nachgefragter Ladeleistung für die BEVs zu decken.

Darüber hinaus ist insbesondere die Verbesserung von Batterien bzw. der Batterietechnik als elementarer Bestandteil der BEVs ein wesentlicher Hebel, um THG weiter zu reduzieren. Der Fokus der Forschung liegt hierbei u.a. auf der Verbesserung der Produktionsprozesse mit einer einhergehenden Reduktion des Einsatzes kritischer und aufwendig zu gewinnender Ressourcen sowie einer Verlängerung der Lebensfahrleistung. Studien zeigen, dass hier noch großes Potenzial besteht. Zum einen ist in der Entwicklung der Energiedichte der Batterietechnologie (Wh/kg) eine deutliche Verbesserung zu erwarten - bis 2030 wird eine um 30 % höhere Energiedichte erwartet, bis 2040 eine weitere Steigerung von über 40 % [10]. Zum anderen wird an alternativen Batterietechnologien, wie beispielsweise Feststoffbatterien, geforscht, die ebenfalls Verbesserungen in den o.g. Bereichen (z.B. Verbrauch natürlicher Ressourcen) bringen könnten [108, 109]. Neben der Herstellung bietet auch das Batterierecycling einen wichtigen Ansatzpunkt, Ressourcen, THG und auch Kosten für die Herstellung von Batterien einzusparen. Die Technologien für verschiedene Recyclingverfahren sind aktuell noch recht jung und das Optimierungspotenzial ist daher hoch. Auf der einen Seite können die Anlagen zum Recycling durch technische Korrekturen weiter verbessert werden, auf der anderen Seite kann durch die Umsetzung verschiedener Digitalisierungsbausteine der Recyclingprozess weiter automatisiert und damit wirtschaftlich attraktiver gestaltet werden [108].

Als ein weiterer Hebel zur Reduktion von THG gilt die Nutzung von EE für das Laden der BEVs. Wie in Kapitel 4 aufgezeigt wurde, haben der Ladezeitpunkt und die Ladedauer inkl. zugehöriger Flexibilität einen erheblichen Einfluss darauf, welche Energiequellen genutzt werden können und wie viel CO₂-Emissionen – als wesentlicher Bestandteil der THG – pro gefahrenem Kilometer entsprechend anfallen. Daher ist es allgemein von Bedeutung, BEVs mit Strom aus EE zu laden. Um

die Ladeprozesse dahingehend zu verbessern, bietet der Ansatz des gesteuerten Ladens großes Potenzial. Ladeinfrastruktur, die auf Basis von Erzeugungs- und Nachfragedaten aktiv gesteuert werden kann, ermöglicht es, dass BEVs vermehrt dann geladen werden, wenn Strom aus EE zur Verfügung steht [110]. Für eine aktive Steuerung ist allerdings Flexibilität notwendig, was bedeutet, dass der Zeitraum, in der ein BEV an die Ladeinfrastruktur angeschlossen ist, den Zeitraum für die Erfüllung der Ladeanforderung übersteigt. Nur so lassen sich Ladezeitpunkt und Ladeleistung verschieben. Liegen unter anderem Informationen über benötigte Lademenge und geplante Abfahrtszeit vor, so kann der Ladeprozess optimiert werden [58]. Die Umsetzung von gesteuertem Laden kann zusätzlich durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz verbessert werden [100]. Unter Zuhilfenahme von Vergangenheitswerten lässt sich beispielsweise voraussagen, zu welchen Zeitpunkten potenziell ausreichend Strom aus EE für die Ladung von BEVs zur Verfügung steht. Durch den gezielten Einsatz von Anreizmechanismen kann die Ladeflexibilität der Fahrer*innen von BEVs zusätzlich verbessert werden [111, 112]. Die Verknüpfung der Daten von Nachfrage und Erzeugung aus EE sowie die Umsetzung der technischen Infrastruktur zur Erfassung der Daten sowie zur Steuerung der Ladeinfrastruktur bedarf allerdings noch zusätzlicher Entwicklung. Da gesteuertes Laden teilweise mit der Nutzung des BEVs im Konflikt steht, wäre auch Battery Swapping ein ergänzender Ansatz, um den Konflikt zwischen Nutzungs- und Ladezeitraum aufzulösen. Battery Swapping bezeichnet das Austauschen von leeren gegen volle Batterien. So können die Batterien der BEVs immer dann geladen werden, wenn Strom aus EE vorhanden ist, ohne die Nutzungsdauer zu beeinflussen. Dafür bedarf es allerdings in der technologischen Weiterentwicklung standardisierter Batterien für die unterschiedlichen Fahrzeughersteller [110].

Aber auch ohne Battery Swapping bieten BEVs mit zunehmender Marktdurchdringung im ländlichen Raum großes Potenzial, als Energiespeicher zu fungieren. Dafür müssen Verkehrs- und Energienetze zusammen betrachtet und gekoppelt werden (Stichwort Sektorenkopplung von Energie und Verkehr) [105]. Dabei bietet die Technologie des bidirektionalen Ladens zusätzliches Potenzial Sektorenkopplung auszubauen und verstärkt umzusetzen. Bidirektionales Laden ermöglicht es, dass Fahrzeuge Strom zurück ins

Netz einspeisen können – Vehicle-to-Grid (V2G) und Grid-to-Vehicle (G2V) [113]. Darüber hinaus besteht gerade im ländlichen Raum (mit Blick auf das häufig ausreichende Platzangebot und Eigenheimbesitz) die Möglichkeit, dass BEVs über eine geeignete Ladeinfrastruktur Strom zu Hause einspeisen (Vehicle-to-Building, V2B) und somit zur Deckung des Strombedarfs eines (oder mehrerer) Haushalte beitragen [114, 115]. Insbesondere kann der jeweilige Haushalt tagsüber aufgeladenen PV-Strom in Nicht-Sonnenstunden, z.B. am späten Abend, nutzen. Neben der Privatnutzung kann V2B auch bei Büro- und Fabrikgebäuden zum Einsatz kommen. Zwar ist die Technologie des bidirektionalen Ladens aktuell noch keine Standardausstattung bei BEVs, verschiedene Automobilhersteller arbeiten jedoch bereits an der Umsetzung. Zum Beispiel hat VW zuletzt angekündigt, die eigenen BEVs für bidirektionales Laden vorzurüsten [116]. Zudem ist auch im aktuellen Koalitionsvertrag festgehalten, dass bidirektionales Laden ermöglicht werden soll [66].

Bidirektionales Laden bietet dabei vielfältige Potenziale. So kann die Technologie insbesondere auch dazu beitragen, die Anzahl zusätzlicher stationärer Batteriespeicher zu reduzieren, deren Herstellung wiederum mit einem hohen Verbrauch natürlicher Ressourcen und THG verbunden ist (siehe Kapitel 3.2). Darüber hinaus bietet bidirektionales Laden Flexibilität für das Lademanagement, indem unabhängig von der tatsächlichen Fahrzeugnutzung ge- und entladen werden kann, wodurch (zusätzliche) Effizienzverluste, die bei der Nutzung verschiedener Zwischenspeicher entstehen, reduziert werden können [117]. Gleichzeitig könnte durch bidirektionales Laden und intelligente Ladesteuerung auch der Anteil von EE am Stromverbrauch noch weiter erhöht werden, indem Fahrzeuge beispielsweise an verschiedenen Standorten ge- und entladen werden. Ein denkbare Szenario, um EE noch besser auszunutzen, wäre beispielsweise das Laden während der Sonnenstunden am Arbeitsplatz (Charge@Work) und das Entladen, wenn die Erzeugung aus EE niedrig ist, z.B. zu Hause, zur Deckung des eigenen Verbrauchs im Haushalt oder zur Netzeinspeisung [118]. Aus der Vernetzung der BEVs sowie der PV-Erzeugung innerhalb von Kommunen („prosumer-to-vehicle“ Struktur) könnten sich wiederum auch lokale Energie Communities im ländlichen Raum entwickeln. Dadurch kann auch die in Kapitel 3.2 erwähnte Diskrepanz zwischen Erzeugung und Verbrauch

verringert werden [119, 120]. Bidirektionales Laden kann damit allgemein zu einer Reduktion von THG und zur Erreichung der Klimaziele beitragen [117]. Zu berücksichtigen ist hierbei natürlich, dass bei der Herstellung von BEVs THG entstehen, die allerdings auch ohne die Nutzung der Fahrzeuge als Zwischenspeicher anfallen würden.

Neben dem Potenzial THG zu reduzieren, kann bidirektionales Laden bei zunehmendem Anteil EE auch einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilität leisten [113, 117, 121]. Letzteres hat insbesondere im ländlichen Raum hohe Relevanz, da in ländlichen Stromnetzen mit tendenziell langen Kabeln und weiten Entfernungen die Spannung sehr stark schwanken kann [122]. Durch diese Stabilisierungswirkung kann auch die Notwendigkeit des Einsatzes von Spitzenlastkraftwerken mit teils niedrigem Wirkungsgrad und hohen THG reduziert werden.

Zuletzt kann bidirektionales Laden dabei helfen, Preisspitzen auszugleichen [114, 115]. So kann die Technologie auch dazu beitragen, Strompreise und die Systemgesamtkosten zu senken [123]. In diesem Kontext ist auch darauf hinzuweisen, dass nicht nur Preisspitzen ausgeglichen, sondern auch Preisunterschiede bei Ladung und Einspeisung ausgenutzt werden können. Das Potenzial für diese Energiearbitrage ist jedoch stark debattiert, da die dafür notwendigen Preisspannen durch eine zunehmende Anzahl von teilnehmenden BEV-Besitzer*innen geglättet werden könnten [124]. Ein Phänomen, das bereits aus der Finanzmarkttheorie bekannt ist [125].

Neben diesen Chancen ist bidirektionales Laden aber auch mit einigen Herausforderungen verbunden. So zeigen Untersuchungen, dass durch das häufige Laden und Entladen der Batterien – insbesondere bei hohem Energiedurchsatz – deren Lebenszeit substanziell verkürzt wird [126, 127]. Der notwendige Batterieaustausch verursacht nicht nur Kosten, sondern, wie zuvor bereits beschrieben, auch THG sowie potenziell negative Umwelteffekte und ist mit einem hohen Verbrauch natürlicher Ressourcen verbunden. Das Ausmaß dieser negativen Effekte hängt maßgeblich auch von den zukünftigen Entwicklungen des Recyclingprozesses ab [128]. Die Weiterentwicklung von Batterien und Recyclingprozessen ist daher auch ein Kernthema für die weitere Forschung im Bereich des bidirektionalen Ladens und dessen Ausbaus.

Ausblick

Bidirektionales Laden kann allerdings nicht nur zur Netzstabilität beitragen, sondern im Falle der preislichen Optimierung von Laden und Entladen bei einer Vielzahl an Fahrzeugen und dynamischen Strompreisen auch zu Netzüberlastungen führen [129]. Entsprechend stellen sich Fragen hinsichtlich einer Anpassung des Marktdesigns für bidirektionales Laden [120]. Hierbei stehen z.B. Fragen im Vordergrund, wie Anreizmechanismen gestaltet werden können, um zum einen in die benötigten Technologien zu investieren, und zum anderen, um diese letztlich auch, trotz ggf. höherer Investitionen für Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur im Sinne der Netzstabilisierung zu nutzen [119, 130]. Hinzu kommen rechtliche bzw. regulatorische Fragestellungen, wie z.B. die Nutzung von im Rahmen von Charge@Work bezogenem Strom für den eigenen Haushaltsverbrauch oder sogar für die entgeltliche Netzeinspeisung. In diesem Kontext gilt es auch eventuelle Doppelentgelte bei Ladung und Rückeinspeisung zu berücksichtigen bzw. möglichst zu vermeiden. Vor diesem Hintergrund bedarf es einer konsistenten

Definition von stationären Stromspeichern im deutschen Ordnungsrahmen, die auch für bidirektionales Laden ausgestattete Elektrofahrzeuge berücksichtigt [130]. Analog hierzu muss die Technologie des bidirektionalen Ladens auch bei der Weiterentwicklung von Präqualifikationsbedingungen für Regelleistungen berücksichtigt werden [130]. Darüber hinaus bestehen Unsicherheiten beim Umgang mit bidirektionalem Laden in Mehrfamilienhäusern, für die entsprechende rechtliche Rahmenbedingungen erst aufgesetzt werden müssen.

Zusammenfassend bietet bidirektionales Laden bei entsprechender Gestaltung ein hohes Potenzial für verschiedene Akteure (z.B. Netzbetreiber, Fahrzeugbesitzer*innen und Hersteller) „wertstiftend“ zu sein [131, 132] und einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen der Energiewende zu leisten. Hierzu bedarf es jedoch klarer rechtlicher und regulatorischer Rahmenbedingungen sowie weiterer technologischer Entwicklungen mit Blick auf Batterietechnologie und Recyclingprozesse.

Zusammenfassung: Ausblick

- Durch den Anstieg der Anzahl dezentraler Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten steigt die Auslastung des Stromnetzes mit einer zunehmenden Anzahl an Netzeinsparungen.
- Für eine erfolgreiche Netzintegration bedarf es insbesondere einer intelligenten Steuerung dieser Verbrauchseinheiten sowie geeigneter Anreizmechanismen für eine Flexibilisierung des Ladevorgangs von Elektrofahrzeugen.
- Die Digitalisierung kann dabei helfen, den Wandel der Mobilität weiter voranzutreiben und die individuelle Mobilität von Morgen erfolgreich zu gestalten.
- Weiterentwicklungen im Bereich der Batterietechnologie können dazu beitragen, den positiven Klimabeitrag von Elektrofahrzeugen noch weiter zu steigern.
- Die Technologie des bidirektionalen Ladens bietet ein hohes Potenzial zur Reduktion von Emissionen des Ladestroms sowie zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität.
- Hierzu bedarf es zudem einer geeigneten - den regionalen Gegebenheiten angepassten - Ladeinfrastruktur, die eine intelligente Steuerung ermöglicht (z.B. eine Verbindung von Charge@Home und Charge@Work).
- Für die Umsetzung von bidirektionalem Laden sind darüber hinaus klare rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen sowie weitere technologische Entwicklungen mit Blick auf Batterietechnologie und Recyclingprozesse notwendig.

6

Abschließende Bewertung und politische Handlungsempfehlungen



Abschließende Bewertung und politische Handlungsempfehlungen

6 Abschließende Bewertung und politische Handlungsempfehlungen

Zur Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens besteht rascher Handlungsbedarf in allen Sektoren. Dies betrifft insbesondere auch den Verkehrssektor, für den eine umfassende Umgestaltung unumgänglich ist. Diese Studie zeigt, dass durch einen intelligenten Ausbau der Ladeinfrastruktur und intelligentes Lademanagement BEVs unter Betrachtung ihres gesamten Lebenszyklus einen wichtigen Klimabeitrag leisten können. So zeigen die Ergebnisse, dass in einer Woche mit „durchschnittlichen“ Tagen (bezogen auf den Anteil EE am Strommix) bereits durch die Verschiebung des Ladevorgangs eines Kompaktklassefahrzeugs auf die Mittagsstunden bei Charge@Work unter der Annahme wöchentlichen Ladens und der Vernachlässigung von Netzrestriktion CO₂-Einsparungen bis zu 48 % möglich sind. Verschiedene Forschungsarbeiten [25, 133, 134] zeigen jedoch auch, dass alternative Mobilitätsformen, die im Vergleich zum motorisierten Individualverkehr geringere THG (z.B. ÖPNV, Fahrrad und Car-Sharing) aufweisen, aus Klimagesichtspunkten dennoch die zu präferierende Option für die langfristige Ausrichtung des Verkehrssektors darstellen. Vor diesem Hintergrund greift ein einfaches Ersetzen des heutigen Fahrzeugbestands mit Verbrennungsmotoren durch BEVs zu kurz. Vielmehr müssen für eine umfangreiche Reduktion von THG im Bereich der individuellen Mobilität Wege aufgezeigt werden, wie das Verhältnis von hergestellten Fahrzeugen und ihrer tatsächlichen Nutzung verbessert werden kann. Daher muss – neben den in dieser Studie vorgestellten Maßnahmen zur Verbesserung der Klimawirkung von BEVs – durch weitere Studien und Analysen das Bewusstsein für die Relevanz alternativer Mobilitätsformen (z.B. Mobilität-on-Demand) verstärkt sowie entsprechende Maßnahmen zum Ausbau dieser getroffen werden.

Dabei ist für die zeitliche Perspektive der Umsetzung essenziell, die Unterschiede zwischen ländlichem und urbanem Raum für entsprechende Maßnahmen zu berücksichtigen. So ist die Elektrifizierung des Individualverkehrs aus den in dieser Studie genannten Gründen (z.B. aktuell

schlechte Anbindung, längere Wege und grundsätzliches Platzangebot für lokale EE-Erzeugung) ein wichtiger Hebel, um den Mobilitätsbedürfnissen des ländlichen Raums gerecht zu werden und gleichzeitig einen wichtigen Beitrag zu Erreichung der Klimaziele zu leisten. Im urbanen Raum sind dagegen die Angebote alternativer Mobilitätsformen bereits in größerem Umfang vorhanden oder im aktiven Aufbau. Hier sollte entsprechend durch eine weitere Vernetzung und verbesserte Anreizsetzung direkt auf neue Mobilitätsformen gesetzt werden, anstatt weiter die Elektrifizierung des Individualverkehrs voranzutreiben [135].

Damit der Klimabeitrag der Elektrifizierung des Individualverkehrs im ländlichen Raum verstärkt wird, bedarf es einer geeigneten Ladeinfrastruktur. Diese sollte in die Gesamtenergielandschaft eingebettet sein und die Mobilitätsprofile der Fahrer*innen (insb. mit Blick auf die Frage, wann das Fahrzeug an welchem Ort steht) miteinbeziehen. Vor diesem Hintergrund sollten folgende Optionen berücksichtigt werden, um den Klimabeitrag zu verbessern:

- Maximierung des Anteils von EE am Ladevorgang, insbesondere durch eine gezielte Förderung und Umsetzung von Charge@Work (z.B. durch entsprechende Förderinstrumente oder direkte Investitionen in öffentliche Einrichtungen wie Schulen, Ämter usw.) als Grundlage für die Reduktion der Emissionen des Ladestroms.
- Nutzung von BEVs als Speichertechnologie (bidirektionales Laden) und damit Reduktion der Notwendigkeit zusätzlicher dezentraler, stationärer Speicher (z.B. durch gezielte Förderung von Forschung in die zugrundeliegende Batterietechnologie).
- Aufbau und Planung zentraler Ladeinfrastruktur mit zentralen Speichermöglichkeiten und – wenn möglich – direkter lokaler Stromerzeugung durch EE.

Langfristig sollten aber auch im ländlichen Raum alternative Mobilitätsformen ausgebaut werden. Hierzu existieren bereits vielfältige Ideen (z.B. Linien-Taxis, Bedarfslinienverkehr oder auch verschiedene Sharing-Angebote) [136]. Angebote wie Carsharing sind bisweilen aber nicht flächendeckend verfügbar und fokussieren sich nahezu

Abschließende Bewertung und politische Handlungsempfehlungen

ausschließlich auf Städte mit mehr als 50.000 Einwohnern [14]. Der ländliche Raum mit, je nach Klassifizierung, zwischen 26 und 47 Millionen Einwohner*innen spielt hier nur eine untergeordnete Rolle [26]. Daraus leitet sich auch die Anforderlichkeit ab, diese Gebiete im Hinblick auf nicht-ausschließlich privat genutzte Mobilitätsangebote verstärkt in den Blick zu nehmen. Vor diesem Hintergrund bedarf es bereits heute einer entsprechenden Priorisierung und konkreten Maßnahmen zur Investition in die notwendige Infrastruktur, damit alternative Mobilitätsformen im ländlichen Raum eine wichtige Rolle für die nachhaltige Mobilität der Zukunft spielen können.

Zusammenfassung: Abschließende Bewertung und politische Handlungsempfehlungen

- Die Elektrifizierung des Individualverkehrs ist ein wichtiger Hebel, um den Mobilitätsbedürfnissen des ländlichen Raums kurz- bis mittelfristig gerecht zu werden und gleichzeitig einen Beitrag zu Erreichung der Klimaziele zu leisten.
- Um den Klimabeitrag der Elektrifizierung des Individualverkehrs im ländlichen Raum zu verbessern, sollten regionale Gegebenheiten berücksichtigt, der Anteil von Erneuerbaren Energien am Ladevorgang maximiert, Elektrofahrzeuge bestmöglich anstelle von zusätzlichen dezentralen Speichern als Speichertechnologie genutzt sowie öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur koordiniert geplant und aufgebaut werden.
- Charge@Work bietet großes Potenzial zur Steigerung des Anteils von Erneuerbaren Energien am Ladevorgang. Laden am Arbeitsplatz sollte daher in Bezug auf zukünftige Förderinstrumente oder Investitionen (z.B. bei öffentlichen Gebäuden) berücksichtigt werden.
- Die Elektrifizierung des Individualverkehrs (Fokus dieser Studie) ist ein wichtiger Baustein zur Bewältigung der Klimakrise. Daneben gilt es allerdings auch das Bewusstsein für die Relevanz alternativer Mobilitätsformen (z.B. ÖPNV, Car-Sharing und Fahrrad) zu schärfen sowie konkrete Maßnahmen zum Ausbau dieser Mobilitätsformen im ländlichen Raum zu treffen.

Referenzen

Referenzen

1. Übereinkommen von Paris. ABl. L 282 vom 19.10.2016:4–8
2. BVerfG (2021) Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021 - 1 BvR 2656/18 -, Rn. 1-270. http://www.bverfg.de/e/rs20210324_1bvr265618.html
3. Europäischer Rat (2021) Ein europäischer Grüner Deal. <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/>. Zugriffen: 01. Dezember 2021
4. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022) Bundesminister und Vizekanzler Robert Habeck zur aktuellen Lage in der Ukraine. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Videos/2022/20220224_pressestatement_Habeck_Ukraine/20220224_Pressekonzferenz_Habeck_Ukraine.html. Zugriffen: 08. März 2022
5. Europäische Umweltagentur (2021) Treibhausgasemissionen nach Quellsektor. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/view/ENV_AIR_GGE?lang=de. Zugriffen: 01. Dezember 2021
6. Agora Energiewende (2022) Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2021. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2022.
7. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Umweltbundesamt (2022) Treibhausgasemissionen stiegen 2021 um 4,5 Prozent. Bundesklimaschutzministerium kündigt umfangreiches Sofortprogramm an. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/03/20220315-treibhausgasemissionen-stiegen-2021-um-45-prozent.html>. Zugriffen: 23. März 2022
8. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022) Eröffnungsbilanz Klimaschutz
9. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2021) Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, 2021. Aufl
10. Petri R, Jaeger MB, Lahdo N, Kesic M, Heusser D (2021) Antriebsportfolio der Zukunft. Ein Meinungsführer/-innen-Report aus Politik und Wirtschaft
11. Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus) vom 21.10.2020 BAnz AT 05.11.2020 B1
12. Bundesregierung (2019) Masterplan Ladeinfrastruktur. Mehr Ladestationen für Elektroautos. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/ladeinfrastruktur-1692644>. Zugriffen: 01. Dezember 2021
13. Groneweg M, Bittner C, Neussl V, Paasch A, Reckordt M, Schilder K, Tempelmann M (2018) Weniger Autos, mehr globale Gerechtigkeit
14. Nobis C, Kuhnimhof T (2019) Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15), Bonn, Berlin
15. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2021) Wie umweltfreundlich sind Elektroautos? Eine ganzheitliche Bilanz
16. Agora Verkehrswende (2019) Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial
17. Bieker G (2021) A Global Comparison Of The Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions Of Combustion Engine And Electric Passenger Cars
18. Transport & Environment (2020) How clean are electric cars? T&E's analysis of electric car lifecycle CO₂ emissions
19. Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021) Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Ziele schon vor 2050 erreichen kann. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende
20. Thielmann A, Wietschel M, Funke S, Grimm A, Hettesheimer T, Langkau S, Loibl A, Moll C, Neef C, Plötz P, Sievers L, Espinoza LT, Edler J (2020) Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Fraunhofer-Institut für Systemund Innovationsforschung ISI
21. Bernecker T, Heinzelmann J (2021) Elektrokleinstfahrzeuge als Hoffnungsträger einer nachhaltig-alltagstauglichen Mikromobilität. In: Wellbrock W, Ludin D (Hrsg) Nachhaltiger Konsum. Best Practices aus Wissenschaft, Unternehmenspraxis, Gesellschaft, Verwaltung und Politik. Springer Gabler, Wiesbaden, S 615–628

Referenzen

22. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021) Nationaler Radverkehrsplan 3.0. Fahrradland Deutschland 2030
23. Bitkom e.V. (2021) Klimateffekte der Digitalisierung. Studie zur Abschätzung des Beitrags digitaler Technologien zum Klimaschutz
24. Krebs T (2021) Moderne Klimapolitik und nachhaltiges Wachstum. Perspektiven der Wirtschaftspolitik 22(3):203–210. doi:10.1515/pwp-2021-0042
25. Wolf I, Schröder T, Neumann J, Haan G de (2015) Changing minds about electric cars: An empirically grounded agent-based modeling approach. Technological Forecasting and Social Change 94:269–285. doi:10.1016/j.techfore.2014.10.010
26. Küpper P (2020) Was sind eigentlich ländliche Räume? Ländliche Räume, Informationen zur politischen Bildung/IzPB 343(2):4–7
27. Helm S, Hauer I, Wolter M, Wenge C, Balis-chewski S, Komarnicki P (2020) Impact of unbalanced electric vehicle charging on low-voltage grids 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe). IEEE, New York, NY, S 665–669
28. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesministerium für Bildung und Forschung (2011) Regierungsprogramm Elektromobilität
29. Helm S, Hauer I, Wolter M (2020) Modellierung von Elektrofahrzeugen zur Potentialabschätzung für Netzservices. In: Hofmann L (Hrsg) 20. Dresdener Kreis Elektroenergieversorgung vom 27. bis 28. März 2019 in Hannover. Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover, Hannover, S 35–40
30. Leitinger C, Litzlbauer M (2011) Netzeintegration und Lade Strategien der Elektromobilität. Elektrotech. Inftech. 128(1-2):10–15. doi:10.1007/s00502-011-0800-3
31. Deutscher Bundestag (2019) CO₂-Emissionen im Verkehrsbereich. WD 8 - 3000 - 056/19
32. Kraftfahrt-Bundesamt (2021) Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2020. FZ 14
33. Kraftfahrt-Bundesamt Neuzulassungsbarometer im Dezember 2021. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2021/202112_Glmonatlich/202112_nzbarometer/202112_n_barometer.html?nn=3504038&fromStatistic=3504038&yearFilter=2021&monthFilter=12_Dezember&fromStatistic=3536106&yearFilter=2021&monthFilter=12_Dezember. Zugegriffen: 14. Februar 2022
34. Kraftfahrt-Bundesamt (2022) Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 1. Januar 2022. FZ 13
35. Plötz P, Funke SÁ, Jochem P (2018) The impact of daily and annual driving on fuel economy and CO₂ emissions of plug-in hybrid electric vehicles. Transportation Research Part A: Policy and Practice 118:331–340. doi:10.1016/j.tra.2018.09.018
36. Jöhrens J, Räder D, Kräck J, Mathieu L, Blanck R, Kasten P (2020) Plug-in hybrid electric cars: Market development, technical analysis and CO₂ emission scenarios for Germany. Study on behalf of the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Heidelberg, Brussels, Berlin
37. Acxiom (2020) Elektroauto oder Hybrid: Wer fährt was und warum? <https://www.acxiom.de/elektroauto-oder-hybrid-wer-fahrt-was-und-warum/>. Zugegriffen: 18. Januar 2022
38. Küpper P (2016) Abgrenzung und Typisierung ländlicher Räume. Thünen Working Paper, No. 68. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig
39. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018) RegioStaR. Regionalstatistische Raumtypologie für die Mobilitäts- und Verkehrsforschung
40. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018) RegioStaR Regionalstatistische Raumtypologie - Karten
41. Windt A, Arnhold O (2020) Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf. Studie im Auftrag des BMVI, Berlin
42. Appel H (2021) Star schicker Vorstädte. Frankfurter Allgemeine Zeitung
43. Wietschel M, Preuß S, Kunze R, Keller M (2022) Laden von Elektrofahrzeugen in Deutschland mit Ökostromverträgen, 02. Aufl, Karlsruhe

Referenzen

44. Baumgarte F, Kaiser M, Keller R (2021) Policy support measures for widespread expansion of fast charging infrastructure for electric vehicles. *Energy Policy* 156:112372. doi:10.1016/j.enpol.2021.112372
45. Martin H, Buffat R, Bucher D, Hamper J, Raubal M (2022) Using rooftop photovoltaic generation to cover individual electric vehicle demand—A detailed case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157:111969. doi:10.1016/j.rser.2021.111969
46. Fthenakis VM, Kim HC, Alsema E (2008) Emissions from photovoltaic life cycles. *Environ Sci Technol* 42(6):2168–2174. doi:10.1021/es071763q
47. Mwasilu F, Justo JJ, Kim E-K, Do TD, Jung J-W (2014) Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34:501–516. doi:10.1016/j.rser.2014.03.031
48. Madina C, Zamora I, Zabala E (2016) Methodology for assessing electric vehicle charging infrastructure business models. *Energy Policy* 89:284–293. doi:10.1016/j.enpol.2015.12.007
49. Baumgarte F, Keller R, Roth L, Strüker J, Wolf L (2022) Elektromobilität im Tourismus - Herausforderungen und potenzielle Lösungsansätze. In: Gardini MA, Sommer G (Hrsg) *Digital Leadership im Tourismus*
50. DKE, VDE FNN, BDEW, VDA, ZVEH, ZVEI (2022) Technischer Leitfaden. Ladeinfrastruktur Elektromobilität Version 4. <https://www.dke.de/resource/blob/988408/87ed1f99814536d66c99797a4545ad5d/technischer-leitfaden-ladeinfrastruktur-elektromobilitaet---version-4-data.pdf>
51. Europäisches Parlament und Europäischer Rat (2014) Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe
52. solid GmbH (2022) Ladetechnik. <https://www.ladeverbundplus.de/elektromobilitaet/ladetechnik/>
53. E.ON Energie Deutschland GmbH (2022) Elektromobilität- Alles rund um das Laden von E-Autos. <https://www.eon.de/de/eonerleben/laden-von-elektroautos.html>
54. Reinke J (2014) Bereitstellung öffentlicher Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Eine institutionenökonomische Analyse. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. Fakultät VII - Wirtschaft und Management
55. Zhang H, Hu Z, Xu Z, Song Y (2017) Optimal Planning of PEV Charging Station With Single Output Multiple Cables Charging Spots. *IEEE Trans. Smart Grid* 8(5):2119–2128. doi:10.1109/TSG.2016.2517026
56. Pless S, Allen A, Myers L, Goldwasser D, Meintz A, Polly B, Frank S (2020) Integrating Electric Vehicle Charging Infrastructure into Commercial Buildings and Mixed-Use Communities: Design, Modeling, and Control Optimization Opportunities; Preprint. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory
57. Lee H, Clark A (2018) Charging the Future: Challenges and Opportunities for Electric Vehicle Adoption. HKS Working Paper No. RWP18-026. doi:10.2139/ssrn.3251551
58. Fridgen G, Thimmel M, Weibelzahl M, Wolf L (2021) Smarter charging: Power allocation accounting for travel time of electric vehicle drivers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 97:102916. doi:10.1016/j.trd.2021.102916
59. Lee ZJ, Pang JZ, Low SH (2020) Pricing EV charging service with demand charge. *Electric Power Systems Research* 189:106694. doi:10.1016/j.epsr.2020.106694
60. Litzlbauer M (2012) Grid integration of electric vehicles considering the mobility needs. *WEVJ* 5(3):629–634. doi:10.3390/wevj5030629
61. Johnsen D, Strommenger D, Schuster H, Lehmann M, Laschet P, Weber A, Runge S, Zierul T, Stute J, Kühnbach M, Preuß S, Scherrer A, Ostermann J, Stetter D, Kern T, Dreisbusch M, Kellerer F (2020) Gesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen über Preisanreize. Anwendungsbeispiele und Handlungsbedarf. Kurzstudie. https://www.iit-berlin.de/wp-content/uploads/2021/03/Elektro-Mobil_Kurzstudie_Gesteuertes_Laden.pdf. Zugegriffen: 15. Januar 2022
62. Samweber F, Nobis P, Gallet M (2014) Den eigenen PV-Strom tanken: Ladesteuerung zur Erhöhung des Photovoltaik-Eigenverbrauchs (Teil 2). *BWK* 66:46–49
63. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bundeskartellamt (2021) Monitoringbericht

Referenzen

- 2021
64. Höfling H, Römer D (2018) KfW-Energie-wendebarmeter 2018. Energiewende kommt in der Breite an – Dynamik im Bereich Elektromobilität
65. EUPD Research (2021) 89 Prozent des Solarpotenzials noch ungenutzt - EUPD Research. https://www.eupd-research.com/89-prozent-des-solarpotenzials-noch-ungenutzt/#_ftn1. Zugriffen: 26. Januar 2022
66. Sozialdemokratischen Partei Deutschlands, Bündnis 90/Die Grünen, Freie Demokraten (2021) Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP
67. Bergner J, Siegel B, Quaschnig V (2019) Das Berliner Solarpotenzial. Kurzstudie zur Verteilung des solaren Dachflächenpotenzials im Berliner Gebäudebestand
68. Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 3026) geändert worden ist. EEG 2021
69. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022) Kabinett bringt Abschaffung der EEG-Umlage auf den Weg. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/03/20220309-kabinett-bringt-abschaffung-der-eeg-umlage-auf-den-weg.html>. Zugriffen: 15. März 2022
70. Lenck T, Graichen P (2021) CO₂-Preis und EEG-Umlage. <https://www.agora-energie-wende.de/blog/co2-preis-und-eeg-umlage/>. Zugriffen: 27. Januar 2022
71. Stäglich J, Fritz T, Manteuffel D, Friedl G, Walcher F (2018) Blackout. E-Mobilität setzt Netzbetreiber unter Druck
72. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen EEG-Registerdaten und -Fördersätze. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Elektrizitaetund-Gas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/start.html. Zugriffen: 27. Januar 2022
73. Costa-Campi MT, Daví-Arderius D, Trujillo-Baute E (2018) The economic impact of electricity losses. *Energy Economics* 75:309–322. doi:10.1016/j.eneco.2018.08.006
74. Antmann P (2009) Reducing Technical and Non-Technical Losses in the Power Sector. Background Paper for the World Bank Group Energy Sector Strategy, Washington, DC
75. Argyrou MC, Christodoulides P, Kalogirou SA (2018) Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94:804–821. doi:10.1016/j.rser.2018.06.044
76. Buhl HU, Schöpf M, Schott P, Weibelzahl M, Weissflog J (2021) Bewertung von Flexibilitätsoptionen im deutschen Stromsystem 2021 bis 2035 unter Berücksichtigung der Holzverfeuerung. Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik FIT, Augsburg, Bayreuth
77. Figgner J, Stenzel P, Kairies K-P, Linßen J, Haberschus D, Wessels O, Angenendt G, Robinius M, Stolten D, Sauer DU (2020) The development of stationary battery storage systems in Germany – A market review. *Journal of Energy Storage* 29:101153. doi:10.1016/j.est.2019.101153
78. Mathiesen BV, Lund H, Connolly D, Wenzel H, Østergaard PA, Möller B, Nielsen S, Ridjan I, Karnøe P, Sperling K, Hvelplund FK (2015) Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. *Applied Energy* 145:139–154. doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.075
79. Krebs L, Frischknecht R, Stolz P, Sinha P (2020) Environmental Life Cycle Assessment of Residential PV and Battery Storage Systems. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-17:2020
80. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen SMARD | Marktdaten. <https://www.smard.de/home>. Zugriffen: 26. Januar 2022
81. Weyer H, Müsgens F (2020) Netzengpässe als Herausforderung für das Stromversorgungssystem. Regelungsfelder, Status quo und Handlungsoptionen (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München
82. Demmelhuber K, Englmaier F, Leiss F, Möhrle S, Peichl A, Schröter T (2020) Home-office vor und nach Corona: Auswirkungen und Geschlechterbetroffenheit
83. Agora Verkehrswende (2020) Ein anderer Stadtverkehr ist möglich. Neue Chancen für

Referenzen

- eine krisenfeste und klimagerechte Mobilität, Berlin
84. IEA (2019) World Energy Outlook 2019, Paris
 85. Schwarzer CM (2022) Elektromobilität: SUV statt Kleinwagen. Die Zeit
 86. Shaffer B, Auffhammer M, Samaras C (2021) Make electric vehicles lighter to maximize climate and safety benefits. *Nature* 598(7880):254–256. doi:10.1038/d41586-021-02760-8
 87. ENTSO-E (2022) Transparency Platform. <https://transparency.entsoe.eu/>
 88. Lauf T, Memmler M, Schneider S (2019) Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018
 89. Kraftfahrt-Bundesamt (2022) Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Marken und Modellreihen - Monatsergebnisse. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/monatl_neuzulassungen_node.htm. Zugegriffen: 28. Januar 2022
 90. ADAC (2022) Er ist wieder zu haben: Der VW e-Up im ADAC Test
 91. ADAC (2022) Mercedes-Benz EQC 400 4MATIC (ab 02/21). Technische Daten
 92. Hoke A, Brissette A, Maksimovic D, Kelly D, Pratt A, Boundy D (2013) Maximizing lithium ion vehicle battery life through optimized partial charging Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference. IEEE, S 1–5
 93. 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH (2022) Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023. Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber
 94. Lierzer S, Schumann D (2020) Digitalisierung und autonomes Fahren: Treiber eines neuen Mobilitätssystems. Eine Analyse der Einflussfaktoren auf die Marktdurchdringung eines Megatrends im Automobilbereich.
 95. Vennegeerts H, Tran J, Rudolph F, Pfeifer P (2018) Metastudie Forschungsüberblick Netzingegration Elektromobilität
 96. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2017) Positionspapier. Elektromobilität braucht Netzinfrastruktur. Netzanschluss und -integration von Elektromobilität
 97. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2019) Fakten und Argumente - Netzingegration privater Ladeinfrastruktur. Ergebnisse einer BDEW-Umfrage zur Meldung von privater Ladeinfrastruktur an Netzbetreiber
 98. Naturschutzbund Deutschland e.V. (2013) Stromfluss unter der Erde. Einsatz von Erdkabeln beim Übertragungsnetzausbau
 99. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (2017) Abschlussbericht Einsatzreihenfolgen. Projekt MONA 2030: Ganzheitliche Bewertung Netzoptimierender Maßnahmen gemäß technischer, ökonomischer, ökologischer, gesellschaftlicher und rechtlicher Kriterien
 100. Baumgarte F, Dombetzki L, Kecht C, Wolf L, Keller R (2021) AI-based Decision Support for Sustainable Operation of Electric Vehicle Charging Parks Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii International Conference on System Sciences
 101. Ashour Novirdoust A, Bhuiyan R, Bichler M, Buhl HU, Fridgen G, Fugger C, Gretscho V, Hanny L, Knörr J, Neuhoﬀ K, Neumann C, Ott M, Richstein JC, Rinck M, Röhrich F, Schöpf M, Sitzmann A, Wagner J, Weibelzahl M (2021) Electricity Market Design 2030-2050: Moving Towards Implementation. Fraunhofer-Gesellschaft
 102. Ashour Novirdoust A, Bichler M, Bojung C, Buhl HU, Fridgen G, Gretscho V, Hanny L, Knörr J, Maldonado F, Neuhoﬀ K, Neumann C, Ott M, Richstein JC, Rinck M, Schöpf M, Schott P, Sitzmann A, Wagner J, Wagner J, Weibelzahl M (2021) Electricity Spot Market Design 2030-2050. Fraunhofer-Gesellschaft
 103. Ahunbay MS, Ashour Novirdoust A, Bhuiyan R et al (2021) Electricity Market Design 2030-2050: Shaping future electricity markets for a climate-neutral Europe. Fraunhofer-Gesellschaft
 104. PwC, Fraunhofer IOSB, Trend One (2019) Studie zum Zukunftsbild Stromverteilnetze. Im Auftrag des Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V.
 105. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2021) Transformation der Mobilität (acatech HORIZONTE), München
 106. Lemmer K (2019) Neue autoMobilität II. Kooperativer Straßenverkehr und intelligente Verkehrssteuerung für die Mobilität der Zukunft. (acatech Studie), München
 107. Transport & Environment (2018) Roll-out of

Referenzen

- public EV charging infrastructure in the EU. Is the chicken and egg dilemma resolved?
108. Neef C, Schmaltz T, Thielmann A (2021) Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau
 109. Michaelis S, Rahimzei E, Kampker A, Heimes H, Offermanns C, Locke M, Löbbberding H, Wennemar S, Thielmann A, Hettesheimer T, Neef C, Kwade A, Haselrieder W, Blömeke S, Doose S, von Drachenfels N, Drees R, Fröhlich A, Gottschalk L, Hoffmann L, Kouli M, Leithoff R, Rahlfs S, Rickert J, Schmidt LO, Schoo A, Thomitzek M, Turetskyy A, Vysoudil F (2020) Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2020
 110. IRENA (2019) Innovation outlook: Smart charging for electric vehicles
 111. Huber J, Jung D, Schaule E, Weinhardt C (2019) Goal Framing in Smart Charging. Increasing BEV Users' Charging Flexibility with Digital Nudges Proceedings of the 27th European Conference on Information Systems (ECIS)
 112. Huber J, Schaule E, Jung D (2018) How to Increase Charging Flexibility? Developing and Testing Framing Nudges for BEV Drivers Proceedings of the 31st Conference on Environmental Informatics (EnvirolInfo 2018)
 113. Kramer B, Chakraborty S, Kroposki B (2008) A review of plug-in vehicles and vehicle-to-grid capability Proceedings of 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. IEEE, S 2278–2283
 114. Ghanbarzadeh T, Baboli PT, Rostami M, Moghaddam MP, Sheikh-El-Eslami MK (2011) Wind farm power management by high penetration of PHEV Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, S 1–5
 115. Millner A, Judson N, Ren B, Johnson E, Ross W (2010) Enhanced plug-in hybrid electric vehicles Proceedings of the IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply. IEEE, S 333–340
 116. Menzel S (2021) „Bidirektionales Laden“: So will Volkswagen am Speichern von Strom verdienen
 117. Sioshansi R, Denholm P (2009) Emissions impacts and benefits of plug-in hybrid electric vehicles and vehicle-to-grid services. Environ Sci Technol 43(4):1199–1204. doi:10.1021/es802324j
 118. Surmann A, Walia R, Kohrs R (2020) Agent-based bidirectional charging algorithms for battery electric vehicles in renewable energy communities. Energy Inform 3(S1). doi:10.1186/s42162-020-00122-8
 119. Habib S, Khan MM, Abbas F, Tang H (2018) Assessment of electric vehicles concerning impacts, charging infrastructure with unidirectional and bidirectional chargers, and power flow comparisons. Int J Energy Res 42(11):3416–3441. doi:10.1002/er.4033
 120. Kotilainen K, Makinen SJ, Valta J (2017) Sustainable electric vehicle - prosumer framework and policy mix Proceedings of the IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia). IEEE, S 1–6
 121. Tomić J, Kempton W (2007) Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. Journal of Power Sources 168(2):459–468. doi:10.1016/j.jpowsour.2007.03.010
 122. Netze BW GmbH (2021) Stromnetze für die e-mobile Zukunft. <https://www.netze-bw.de/News/Stromnetze-fuer-die-e-mobile-Zukunft>. Zugegriffen: 22. Februar 2022
 123. Kern T (2022) Rückwirkungen von bidirektionalen Elektrofahrzeugen auf das zukünftige, europäische Energiesystem, Virtuell
 124. Peterson SB, Whitacre JF, Apt J (2010) The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage. Journal of Power Sources 195(8):2377–2384. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.09.070
 125. Shleifer A, Vishny RW (1997) The Limits of Arbitrage. The Journal of Finance 52(1):35–55. doi:10.1111/j.1540-6261.1997.tb03807.x
 126. Bishop JD, Axon CJ, Bonilla D, Tran M, Banister D, McCulloch MD (2013) Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV. Applied Energy 111:206–218. doi:10.1016/j.apenergy.2013.04.094
 127. Dubarry M, Devie A, McKenzie K (2017) Durability and reliability of electric vehicle batteries under electric utility grid operations: Bidirectional charging impact analysis. Journal of Power Sources 358:39–49. doi:10.1016/j.jpowsour.2017.05.015
 128. Huang B, Pan Z, Su X, An L (2018) Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. Journal of Power Sources 399:274–286. doi:10.1016/j.jpowsour.2018.07.116
 129. Mueller M, Schulze Y (2021) Future grid

Referenzen

- load with bidirectional electric vehicles at home ETG Congress 2021. VDE, Berlin, Offenbach, S 1–6
130. Forschungsprojekt „Bidirektionales Lademanagement – BDL“ (2022) Bereitstellung von Systemdienstleistungen aus Elektrofahrzeugen mit bidirektionalem Lademanagement. BDL-Positionspapier zu Vehicle-to-Grid-Anwendungen
131. Freitas Gomes IS, Perez Y, Suomalainen E (2020) Coupling small batteries and PV generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 126:109835. doi:10.1016/j.rser.2020.109835
132. Sovacool BK, Kester J, Noel L, Zarazua de Rubens G (2020) Actors, business models, and innovation activity systems for vehicle-to-grid (V2G) technology: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 131:109963. doi:10.1016/j.rser.2020.109963
133. Graham-Rowe E, Skippon S, Gardner B, Abraham C (2011) Can we reduce car use and, if so, how? A review of available evidence. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45(5):401–418. doi:10.1016/j.tra.2011.02.001
134. Köhler J, Whitmarsh L, Nykvist B, Schilperoord M, Bergman N, Haxeltine A (2009) A transitions model for sustainable mobility. *Ecological Economics* 68(12):2985–2995. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.06.027
135. Baumgarte F, Brandt T, Keller R, Röhrich F, Schmidt L (2021) You'll never share alone: Analyzing carsharing user group behavior. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 93:102754. doi:10.1016/j.trd.2021.102754
136. Sommer C, Schäfer F, Löcker G, Hattop T, Saighani A (2016) Mobilitäts- und Angebotsstrategien in ländlichen Räumen. Planungsleitfaden für Handlungsmöglichkeiten von ÖPNV-Aufgabenträgern und Verkehrsunternehmen unter besonderer Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte flexibler Bedienungsformen
137. Wieler J, Geiger T (2021) VW ID.3: Das Volks-Elektroauto im ADAC Test

Anhang

Anhang

Tabelle A. 1: Übersicht verschiedener Ladeszenarien zur Berechnung der CO₂-Einsparungen; Anmerkung: Die Tabelle ist mit Ausnahme der gestrichelten Linien lediglich zeilenweise zu lesen. Quelle: Eigene Darstellung.

Parameter	Ausprägungen			Quelle(n)
Ladegeschwindigkeit	11 kW (Normalladen)			[53]
Fahrzeugtyp	VW ID.3 (Batteriekapazität 58kWh, Reichweite 426 km, Verbrauch (WLTP) 15,4 kWh/100km)			[137]
Typtage, identifiziert durch den Strommix	(1) Auswahl verschiedener Tage unter Berücksichtigung der erzeugten Energie aus volatilen EE (Wind Onshore + Wind Offshore + PV) im Jahr 2021			[87]
	(1a) Maximalwert Anteil EE (13.03.21)	(1b) Median Anteil EE (16.11.21)	(1c) Minimalwert Anteil EE (05.09.21)	
	(2) Auswahl verschiedener Tage unter Berücksichtigung der erzeugten Energie aus PV-Anlagen im Jahr 2021			
	(2a) Maximalwert Anteil PV (30.05.21)	(2b) Median Anteil PV (08.10.21)	(2c) Minimalwert Anteil PV (04.01.21)	
Ladezeitpunkte	Charge@Work			[56]
	Zu Arbeitsbeginn laden (Mo-Fr, 09.00 Uhr)		Zu Arbeitszeit mit sehr hohem Anteil an Energie aus PV-Anlagen laden (Mo-Fr, 12.00 Uhr)	
	Charge@Home			[56]
	Nach der Arbeit laden – „Später Feierabend“ (Mo-So, 18.00 Uhr)		Nach der Arbeit – „Früher Feierabend“ (Mo-So, 16.00 Uhr)	
Ladezyklen	Täglich Laden		Einmal wöchentlich Laden	[92]
Urban vs. Suburban vs. Ländlich	Urban (Durchschnittliche Jahresfahrleistung: 13.650 km, durchschnittliche Fahrleistung pro Woche: ca. 262 km (pro Tag: 37,4 km))	Suburban (Durchschnittliche Jahresfahrleistung: 14.467 km, durchschnittliche Fahrleistung pro Woche: ca. 277 km (pro Tag: 39,6 km))	Ländlich (Durchschnittliche Jahresfahrleistung: 15.850 km, durchschnittliche Fahrleistung pro Woche: ca. 304 km (pro Tag: 43,4 km))	[14, 41]
Strommix Deutschland	Aktuell (Realweltdaten für das Jahr 2021)		Zukunft (Hochrechnung für das Jahr 2037)	[87]

Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT

Der Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT vereint die Forschungsbereiche Digital Disruption, Digital Business und Digital Transformation in Augsburg und Bayreuth. Die interdisziplinäre Expertise in fachlichen und technischen Themen der Wirtschaftsinformatik, des Informations- und Energiemanagements sowie die Fähigkeit, methodisches Know-how auf höchstem wissenschaftlichem Niveau mit einer kunden-, ziel- und lösungsorientierten Arbeitsweise zu verbinden, sind ihre besonderen Merkmale. Aktuell besteht unser Team aus rund 90 wissenschaftlichen Mitarbeitenden und über 150 studentischen Mitarbeitenden.

Dabei sind unsere Forschungsaktivitäten in verschiedenen Forschungsbereichen thematisch gebündelt, wodurch wir über umfangreiche Kompetenzen in unterschiedlichen Bereichen der Wirtschaftsinformatik verfügen. Dadurch ist es uns möglich, in angewandten Forschungsprojekten mit zahlreichen Unternehmen aus verschiedenen Branchen aktuelle Forschungsergebnisse in praxistaugliche Lösungen zu transferieren und so langfristige „Win-Win-Situationen“ zu schaffen. Darüber hinaus können wir das gewonnene Wissen in unsere zahlreichen Lehrveranstaltungen einfließen lassen, sodass wir unseren Studierenden theoretisch fundierte sowie praktisch relevante und aktuelle Inhalte näherbringen können. Unser Ziel ist es, auch zukünftig unser Themenspektrum um passende Forschungsbereiche synergetisch zu ergänzen.

