

Nutzung von elektromobilen Flotten zur Lastverschiebung

Katrin Seddig^{1,2*}, Patrick Jochem², Wolf Fichtner²

¹Energy Solution Center e.V. (EnSoC), Haid-und-Neu-Str. 7, D-76131 Karlsruhe.

² Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) und Karlsruher Service Research Institut (KSRI),
Kaiserstr. 12, D-76131 Karlsruhe.

*Korrespondierende Nachwuchsautorin, k.seddig@ensoc.de, +49 721 7540 3314

Kurzfassung:

Ausgehend von der zunehmenden Bedeutung von Elektromobilität wird in diesem Beitrag untersucht, inwieweit Flotten von Elektrofahrzeugen die Möglichkeit bieten, als gesteuerte Last im Energiesystem genutzt zu werden. Dabei soll sowohl eine zeitliche Verschiebung als auch die Leistung und Energiemenge des einzelnen Ladeprozesses als flexible Größe untersucht werden. Als erster Schritt wird der Einfluss von fünf Ladestrategien auf die Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen in Flotten betrachtet. Zur Analyse wird ein agentenbasiertes Modell genutzt, welches die Agenten (Fahrzeug, Nutzer, Ladestation, etc.) der betrachteten Flotten mit den technischen und zeitlichen Restriktionen abbildet. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass jede der fünf Strategien für einen gewissen Anwendungsbereich Vorteile gegenüber allen anderen Strategien verzeichnen kann. Darüber hinaus erscheint – gerade in den Nachtstunden – in Flotten mit einer großen Anzahl an Elektrofahrzeugen ein erhebliches Lastverschiebepotential vorzuliegen. Diese Ergebnisse sollen in tiefergehenden Analysen verfeinert werden.

Keywords: Elektromobilität, Ladestrategien, Lastverschiebung

1 Einführung

Die Energiewende in Deutschland gibt als eines ihrer Ziele, die Reduktion der CO₂-Emissionen durch vermehrte Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien vor. Hierbei soll dieses Ziel nicht nur durch Effizienzsteigerungen in der Industrie und dem Zubau von Wind- oder Photovoltaikanlagen in der Energiewirtschaft umgesetzt werden, sondern auch im Transportsektor durch einen höheren Anteil an Elektrofahrzeugen und alternativen Kraftstoffen.

1.1 Elektrofahrzeuge im künftigen Energiesystem

Elektrofahrzeuge überzeugen insbesondere hinsichtlich ihrer deutlich höheren Energieeffizienz gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, verminderten lokalen Emissionen sowie ihrer höheren Flexibilität hinsichtlich der verwendbaren Ressourcen.

Eine steigende Zahl von Elektrofahrzeugen bewirkt jedoch eine zusätzliche zu bewältigende Energienachfrage im Energiesystem und höhere Lastspitzen, insbesondere im Niederspannungsnetz (vgl. [1]). Beispielsweise verdoppelt sich durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen der Energieverbrauch annähernd bei einem durchschnittlichen privaten Haushalt, wo hingegen sich die nationale Energienachfrage nur geringfügig ändert (vgl. [2] und [3]). Zusätzlich steigt die Notwendigkeit, neben der verstärkten Dezentralisierung der Erzeugung, durch das erhöhte Elektrizitätsangebot aus erneuerbaren Energiequellen, die Elektrizitätsnachfrage stärker zu steuern und in den Markt zu integrieren.

Demand Side Management (DSM) des Ladeprozesses von Elektrofahrzeugen kann hierbei eine Maßnahme sein. Dieses Lastverschiebepotenzial kann genutzt werden, um die fluktuierende Einspeisung durch erneuerbare Energien erheblich zu verbessern und so deren Integration in das Stromnetz zu erleichtern (vgl. bspw. [4]). Dieses kann zu einer Sicherung und Stabilisierung des Netzes beitragen. Dabei kann die Lastverschiebung so genutzt werden, dass z. B. Lastspitzen oder Niedriglasten vermieden werden („peak shaving“ bzw. „valley filling“) [5]. Eine weitere Möglichkeit sind die Elektrofahrzeuge, neben ihrer Mobilitätsfunktion, als mobile Pufferspeicher zu nutzen und diese somit durch eine Rückspeisemöglichkeit in das Elektrizitätssystem einzubinden („vehicle-2-grid“).

1.2 Zielsetzung und Vorgehen

Die aufgezeigten Veränderungen im Verkehrs- und Energiesektor stellen Herausforderungen für das Elektrizitätssystem dar. Die vorliegende Arbeit untersucht daher, wie sich die verschiedenen Ladestrategien auf die Fahrzeugverfügbarkeit von elektromobilen Flotten auswirken. Es stellt sich die Frage, ob intelligenteres Laden dazu beitragen kann, dass eine Flotte von Elektrofahrzeugen besser ausgelastet ist und die Möglichkeit bietet, mit Lastmanagement das anliegende Netz zu entlasten. Die betrachtete Flotte sind dienstliche Elektrofahrzeuge, die von einem Flottenmanagementsystem zentral gesteuert werden.

Nach dieser kurzen Einführung und Motivation für diese Arbeit folgen im Kapitel zwei die Methodische Vorgehensweise, die Datengrundlage und das angewendete Simulationsmodell. Im Anschluss werden die daraus resultierenden Ergebnisse vorgestellt und erläutert. Das vierte Kapitel fasst den Beitrag nochmal kurz zusammen und gibt einen Ausblick für weitere Forschungsarbeiten.

2 Methodik

Zur Analyse der Ladestrategien und deren Einfluss auf das betrachtete System wird in diesem Abschnitt auf das Simulationsmodell und darin enthaltene Aspekte eingegangen. Weiterhin werden einzelne Analysen, die genutzte Datengrundlage sowie die Methodik dargelegt.

2.1 Ladestrategien

Heute werden die meisten Flotten von Elektrofahrzeugen entweder jeden Abend, bei jedem Parkvorgang auf dem Firmengelände oder bei Bedarf geladen und dabei wird der Ladeprozess umgehend gestartet. Aus energiewirtschaftlicher Sicht bleiben hiermit jedoch große Potentiale der Lastverschiebung ungenutzt, da die Standzeiten i. d. R. deutlich länger

sind, als die Ladedauer. Die betrachteten elektromobilen Flotten (siehe Abschnitt 2.3) werden bereits von einem Flottenmanagementsystem gesteuert und somit liegt ein zeitliches Priorisierungsproblem mit zwei Hauptentscheidungsvariablen (Ladeleistung und Ladestart) vor. Dabei treten Einschränkungen sowohl aufgrund einer begrenzten zeitlichen Restriktion seitens der Fahrzeugnutzung als auch einer technischen Leistungsbeschränkung seitens der Fahrzeuge, Ladestation und Netzanschluss auf. Ist beispielsweise eine heute übliche Ladestrategie implementiert („ungesteuertes Laden“), werden die Autos sofort an der Ladesäule laden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind: das Fahrzeug muss einerseits komplett, inklusive Autorisierungsprozess angemeldet und über ein Kabel verbunden sein. Andererseits muss die Leistungskapazität des Netzanschlusses ausreichen (unter Berücksichtigung der betrachteten Netzrestriktionen). Falls die benötigte Leistung nicht ausreicht ist ein Laden nicht möglich und der Ladeprozess muss verschoben werden [6].

Für diesen Fall wird im Folgenden der Einfluss von fünf verschiedenen Ladestrategien näher untersucht (vgl. Tabelle 1).






Nummer der Ladestrategie	Beschreibung
1 	ist ein gleichgewichtetes Mittel der vorhandenen elektrischen Energie zum Laden (d. h. alle eingesteckten Elektrofahrzeuge, laden mit der gleichen Leistung)
2 	ist indirekt proportional zu dem Batteriestand (d. h. die Fahrzeuge mit einem geringeren Batteriefüllstand (SoC) haben eine höhere Priorität und die vorhandene Anschlussleistung wird, abhängig vom SoC, zwischen allen Fahrzeugen aufgeteilt)
3 	ist ungesteuertes Laden, also ‚first come first serve‘ unter Berücksichtigung der Netzlast (erstes Fahrzeug, welches nicht mehr laden kann fängt erst an zu laden, wenn seine gewünschte Leistung durch Beendigung des Ladeprozesses eines oder mehrerer anderer Fahrzeuge wieder verfügbar ist)
4 	Elektrofahrzeuge werden nach dem Batteriefüllstand sortiert; Fahrzeuge mit hohem Batteriestand haben eine höhere Priorität; Elektrofahrzeuge laden entsprechend ihres Ranges, immer mit maximaler Ladeleistung, bis die Anschlussleistung ausgeschöpft ist
5 	Elektrofahrzeuge werden nach dem Batteriefüllstand sortiert; Fahrzeuge mit niedrigerem Batteriestand haben eine höhere Priorität; Elektrofahrzeuge laden entsprechend ihres Ranges, immer mit maximaler Ladeleistung, bis die Anschlussleistung ausgeschöpft ist

Tabelle 1: Übersicht der fünf Ladestrategien

Die vierte Ladestrategie erscheint a priori ein nachteiligeres Szenario für die Fahrzeugverfügbarkeit darzustellen. Die Strategien vier und fünf führen dazu, dass die Heterogenität der Batteriefüllstände in der betrachteten Flotte zunimmt. Darüber hinaus werden zwei unterschiedliche Lademodi betrachtet, zum einen Mode 2¹ (3,7 kW) und zum anderen Mode 3 (22 kW). Es wird zunächst angenommen, dass die Fahrzeuge diese Lastbeschränkung voll ausnutzen und jedes Fahrzeug einem Mode zugeordnet wird, aber innerhalb dieser mit variabler Ladeleistung laden kann.

¹ Diese sind gemäß der Norm für Lademodi von Elektrofahrzeugen, der IEC 61851-1.

2.2 Modellaufbau

Es wird ein multiagentenbasiertes Simulationsmodell (MAS) auf der Simulationsplattform Repast eingesetzt. Diese Plattform findet bereits in der Modellierung von Energie- und Verkehrssystemen Anwendung, u. a. bei PowerACE [7] und COMIT [8]. Mithilfe des MAS können verschiedene Forschungsfragen adressiert werden. Dabei lassen sich die Agenten und ihre Interaktion mit der Umgebung gut darstellen, in denen verschiedene modelltechnische Charakteristika integriert sind. Die Agenten sind noch homogen in dem gewählten Verhalten, somit lassen sich Änderungen schnell integrieren und Verhaltensregeln anpassen. Durch die vorhandenen Schnittstellen ist eine Kommunikation, also die Weitergabe und der Empfang von Daten, möglich. Dadurch lassen sich z. B. Statusänderungen übermitteln. Es werden Input-Daten implementiert und Entscheidungsregeln aufgestellt, um den Simulationszustand zu analysieren. Die verschiedenen abgebildeten Agenten sind dabei z. B. Elektrofahrzeuge, Fahrzeugnutzer mit verschiedenen Fahrtenprofilen, Flottenmanagementsystem, etc. Definierte Szenarien untersuchen mit statistischen Methoden die Auswirkungen auf die zugrunde gelegten Rahmenbedingungen (insb. Verteilnetz, E-Pkw-Verfügbarkeit, ...). Die Anfragen der Nutzer werden an ein Flottenmanagementsystem gestellt, welches einen kompletten Überblick über die vorhandenen Fahrzeuge und deren Status besitzt (inklusive SoC oder Ladevorgang). Dieses ist relevant für die zentrale Steuerung beim Laden der einzelnen Elektrofahrzeuge und die Zuordnung der Elektrofahrzeuge zu den Nutzeranfragen.

In der Simulation gibt es einzelne konstante Parameter. Dazu zählen u. a. die Batteriekapazität mit 24 kWh, der durchschnittliche Verbrauch der Elektrofahrzeuge von 0,2 kWh/km². Es wird zunächst davon ausgegangen, dass alle Elektrofahrzeuge auch einen Ladepunkt (mit 2 verschiedenen Lademodi) besitzen.

Die Berechnungen erfolgen in einer 1-minütigen Auflösung ($t \in \{1, \dots, T\}$). Dabei ist eine Begrenzung der Anschlussleistung vorgesehen (vgl. Abbildung 1). Ist die maximale Gebäudeanschlussleistung P_{GA} des gesamten Fuhrparks größer als die maximale Gesamtladeleistung $P_{Ges} = n * P_{EVSE}$ aller Fahrzeuge an den Ladesäulen $i \in \{1, \dots, I\}$, so sind Ladestrategien offensichtlich irrelevant, da im Extremfall alle Fahrzeuge des Fuhrparks gleichzeitig mit voller Ladeleistung P_{EVSE} laden können. Sobald P_{GA} jedoch kleiner ist als P_{Ges} , kann die Wahl einer Ladestrategie Auswirkung auf die Erfolgsquote der Buchungen haben (vgl. Gleichung 1).

$$P_{GA} > \sum_i P_{EVSE_{i,t}} \quad \forall t; \quad (1)$$

Daher wird im Folgenden die relative maximale Anschlussleistung P_{GA}/P_{Ges} als Modellparameter gewählt, d.h. mit einer steigenden Anzahl n an Fahrzeugen wächst die tatsächliche maximale Anschlussleistung P_{GA} linear mit n .

² Als Vergleichswert ist z. B. der Nissan Leaf mit einer Batteriekapazität von 24 kWh und einem durchschnittlichen Testverbrauch pro 100 km mit 20,39 kWh herangezogen worden [10].

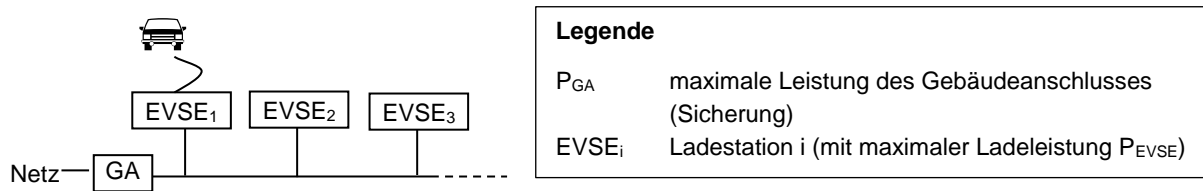


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Topologie des Netzanschlusses

2.3 Nutzerverhalten

Bei der Analyse, die mit Hilfe des Simulationsmodells durchgeführt wird, sind die gewählten Inputdaten für die einzelnen Agenten relevant für das Ergebnis. Um die Umwelt realitätsnah abzubilden, wird der Datensatz des „Kraftfahrzeugverkehrs in Deutschland (KiD) 2010“ genutzt [9].

Die Daten des KiD wurden statistisch ausgewertet, um synthetische Fahrten für das Modell abzuleiten. Der betrachtete Datensatz umfasst ca. 2.300 Fahrtenprofile, in dem alle für die Simulation relevanten Daten verfügbar sind. Hauptsächlich sind die in diesem Beitrag betrachteten Nutzeranfragen Dienstreisen. Basierend auf diesen Daten werden die Distanzen der Fahrtstrecken anhand einer Weibullverteilung approximiert, unter Berücksichtigung einer maximalen Reichweite von 120 km.

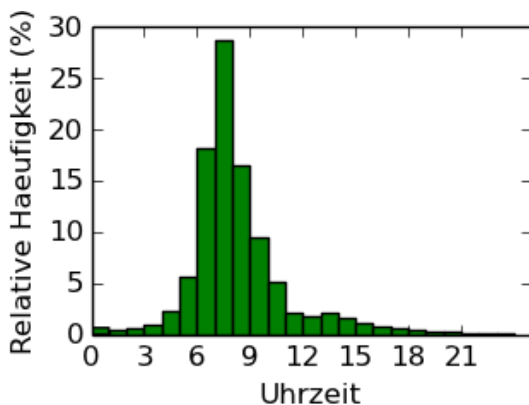


Abbildung 2: Verteilung der Abfahrtszeiten von Dienstreisen im Tagesverlauf; Datenquelle [9]

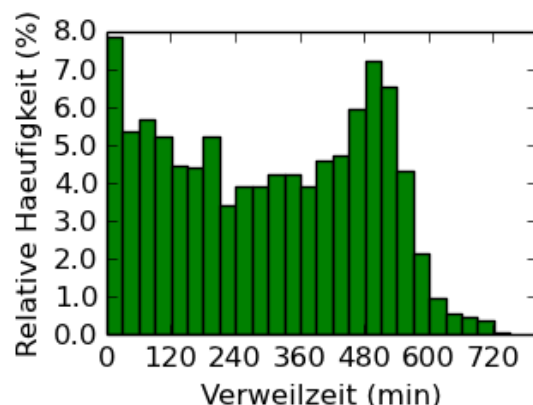


Abbildung 3: Verteilung der Verweildauern von Dienstreisen im Tagesverlauf; Datenquelle [9]

Die Abbildung 2 stellt die Abfahrtszeiten aller Dienstreisen dar. Für die Simulation wird ein Betrachtungszeitraum für die Abfahrtszeiten von 5 bis 18 Uhr in Form eines Poisson-Prozesses genutzt. Das gewählte Zeitfenster soll einen möglichen Werktag von Montag bis Freitag für Dienstreisen darstellen. Die Verweildauern, die während Dienstreisen vorkommen (vgl. Abbildung 3), folgen einer Weibullverteilung, die ins Simulationsmodell integriert wird. Für die Simulation wurden die Verweildauern und die Abfahrtszeiten miteinander verknüpft, um ein möglichst realistisches Nutzerverhalten zu erstellen.

2.4 Lastverschiebungspotenzial

Lastverschiebung ist bei Elektrofahrzeugen unter verschiedenen Bedingungen möglich. Insbesondere kann die zeitliche Komponente des Ladevorgangs betrachtet werden. Ist die Ansteckzeit der Elektrofahrzeuge größer als die Ladedauer der Batterie, kann sowohl der

Leistungs- als auch Energieverlauf variiert werden. Demnach könnten dann beispielsweise batterieschonende (bei möglichst geringer Leistung und nicht vollständiges Laden) Ladevorgänge durchgeführt werden. Somit bietet auch die aufgeladene Energiemenge ein Potenzial zur Optimierung. Hierbei könnte eine Überlegung sein, die Batterien der Elektrofahrzeuge nicht immer vollständig zu laden, sondern beispielsweise gezielt auf eine bevorstehende Fahrt zu laden. Ein verminderter Füllstand der Batterie limitiert jedoch auch gleichzeitig den Einsatzradius des Fahrzeugs und damit auch den Ausnutzungsgrad. Dies wäre insbesondere bei der Implementierung der Strategie in reale Flotten mit spontanen Buchungsvorgängen nachteilhaft. Daher wird in diesem Beitrag angenommen, eine möglichst hohe Flottenverfügbarkeit zu gewährleisten.

Für das Lastverschiebepotenzial sind neben Netzrestriktionen oder finanziellen Aspekten ebenfalls technische Restriktionen des Elektrofahrzeuges relevant. Dazu zählen u. a. die Batteriekapazität, die mögliche Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Ladesäule³, die Batterieladekurve oder auch Möglichkeiten zur Rückeinspeisung, also die vehicle-2-grid Fähigkeit [5], welche jedoch im Folgenden unberücksichtigt bleiben.

Andere Arbeiten, wie bspw. [11] betrachten Ladestrategien unter Berücksichtigung von finanziellen Aspekten. Generell werden Lastverschiebepotenziale auch für andere Flotten, z. B. für private Haushalte, untersucht [12]. Diese Gesichtspunkte werden in dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt.

2.5 Szenarien

Um die verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten von Flotten mit Elektrofahrzeugen und der Nutzeranfragen besser abzubilden, sowie die möglichen Grenzen der Anschlussleistung darzustellen, erfolgt die Analyse anhand von Szenarien in verschiedenen Parameterbereichen. Dabei soll zunächst ein Parameterbereich identifiziert werden, indem der Fuhrpark so dimensioniert ist, dass Ladestrategien möglicherweise Auswirkungen haben können. Anschließend kann darauf basierend ein möglicher Bereich für Lastverschiebung ermittelt werden.

Die Nutzeranzahl variiert dabei von 10 bis zu 350 Nutzern (mit sich proportional verändernden Anfragen) und die Elektrofahrzeuge bilden eine Spannbreite zwischen 5 und 50 Elektrofahrzeugen ab. Die relative maximale Anschlussleistung P_{GA}/P_{Ges} verändert sich ebenfalls, da mit einer steigenden Anzahl n an Fahrzeugen, die tatsächliche maximale Anschlussleistung P_{GA} linear mit n wächst.

Weiterhin unterscheiden sich die verschiedenen Simulationsszenarien anhand der fünf Ladestrategien und des gewählten Lademodus.

3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden Lastverschiebepotentiale der untersuchten Flotten in Abhängigkeit der Ladestrategien, Flottengröße, Anzahl der Elektrofahrzeuge sowie Fahrzeugverfügbarkeiten aufgezeigt.

³ Dabei spielt derzeit insbesondere das Kommunikationsprotokoll nach ISO15118 eine Rolle.

3.1 Einflüsse der Ladestrategien

Dieser Abschnitt betrachtet im Detail die unterschiedlichen Auswirkungen der fünf Ladestrategien auf die Fahrzeugverfügbarkeit.

Untersucht wird die Frage, inwieweit sich Ladestrategien auf die Fahrzeugverfügbarkeit auswirken. Vorausgesetzt die Energiemenge beim Laden ist begrenzt, stellt sich die Frage, ob sich Unterschiede bei der Fahrzeugverfügbarkeit der Flotten aufgrund der ausgewählten Ladestrategien ergeben. Zunächst wird analysiert, bei welcher Parameterkonstellation, welche Ladestrategie zu bevorzugen ist, um eine möglichst hohe Fahrzeugverfügbarkeit zu erreichen. Jede Ladestrategie (vgl. Tabelle 1) besitzt einen Bereich, in dem sie dominierend ist und damit eine höhere Verfügbarkeit der Fahrzeuge ermöglicht (siehe Abbildung 4). Es tritt ebenfalls die Situation auf, dass alle Ladestrategien gleich gut sind. Deswegen wurde in dem Diagramm zur besseren Darstellung neben den 5 Strategien ein 6. Bereich („0“, schwarze Farbskala) eingeführt. Eine Erkenntnis dabei ist, dass bei den Ladestrategien mit der geringeren Anschlussleistung (Abbildung 4) die beiden gegenläufigen Ladestrategien vier und fünf große Bereiche besitzen, in denen sie zu einer höheren Fahrzeugverfügbarkeit führen.

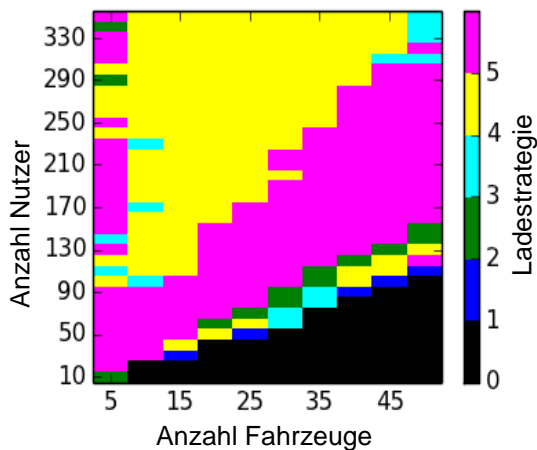


Abbildung 4: Dominierende Parameterbereiche der einzelnen Ladestrategien hinsichtlich Fahrzeugauslastung (Maximale Gebäudeanschlussleistung 18,5 kW)

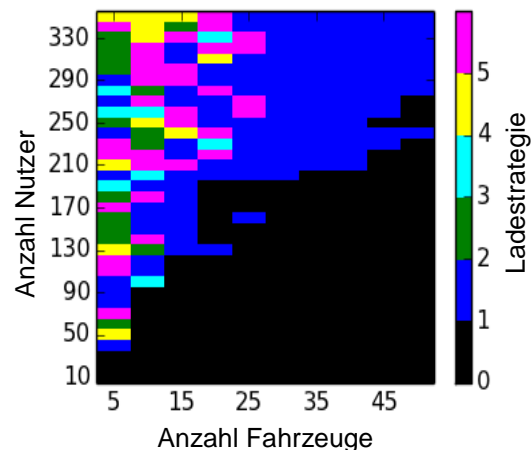


Abbildung 5: Dominierende Parameterbereiche der einzelnen Ladestrategien hinsichtlich Fahrzeugauslastung (Maximale Gebäudeanschlussleistung 55,5 kW)

Werden die fünf Ladestrategien miteinander verglichen, beträgt der prozentuale Unterschied von der besten und der schlechtesten Ladestrategie mit einer Ladeleistung von 3,7 kW (Mode 2) und einer maximalen Gebäudeanschlussleistung von 18,5 kW an einem Werktag lediglich 2,25% (siehe Abbildung 6). Somit würde beispielsweise die beste Ladestrategie zu einer Fahrzeugverfügbarkeit von 62% führen, hingegen die schlechteste Ladestrategie zu 59,75% bei der gleichen Parameterkonstellation. Bei einer dreifachen maximalen Gebäudeanschlussleistung (55,5 kW) unterscheiden sich die Ladestrategien nur noch um 0,24% bei der Fahrzeugverfügbarkeit (siehe Abbildung 7). Somit wird deutlich, dass bei diesen gewählten Parameterkonstellationen die Ladestrategien nur einen sehr geringen Prozentsatz zur erreichten Fahrzeugverfügbarkeit beitragen.

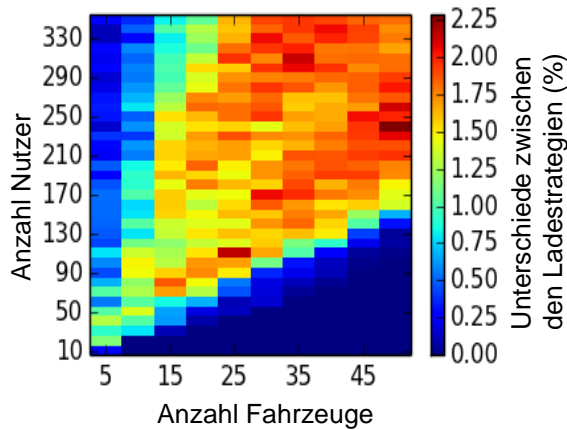


Abbildung 6: Auswirkungen der fünf Ladestrategien auf die Fahrzeugverfügbarkeit (Maximale Gebäudeanschlussleistung 18,5 kW)

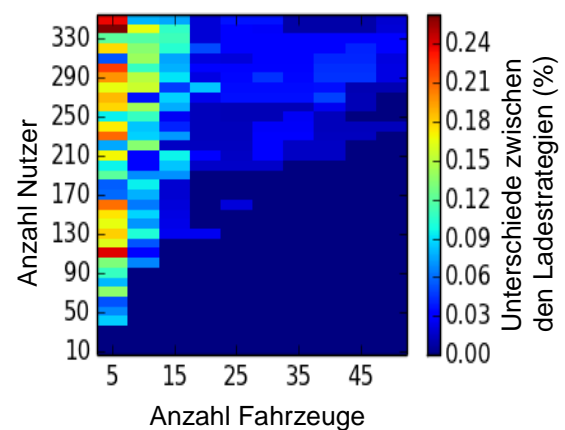


Abbildung 7: Auswirkungen der fünf Ladestrategien auf die Fahrzeugverfügbarkeit (Maximale Gebäudeanschlussleistung 55,5 kW)

Bisher wurden alle vorgestellten Szenarien für eine maximale Ladeleistung von 3,7 kW (Mode 2) betrachtet. Für einen Lademodus mit 22 kW (Mode 3) wurde die Gebäudeanschlussleistung höher gewählt und daher ergeben sich keine nennenswerten Bereiche, in denen sich die Ladestrategien unterscheiden.

3.2 Fahrzeugverfügbarkeit

Im vorherigen Abschnitt 3.1 wurde ersichtlich, dass sich die einzelnen Ladestrategien im Hinblick auf die Fahrzeugverfügbarkeit nur geringfügig voneinander unterscheiden. Für ein mögliches Lastverschiebepotenzial, wie im Abschnitt 2.4 erläutert, ist es relevant zu wissen, in welchem Parameterbereich die Fahrzeugverfügbarkeit bei nahezu 100% liegt.

Es kann zwischen zwei Gründen für die Ablehnung der Nutzeranfragen unterschieden werden: (i) alle Elektrofahrzeuge sind ausgeliehen oder (ii) Fahrt nicht möglich, weil nicht ausreichend Energie verfügbar ist (d. h. es ist zwar ein Elektrofahrzeug vorhanden, jedoch kann kein Fahrzeug die geforderte Batteriekapazität für die angefragte Strecke bereitstellen).

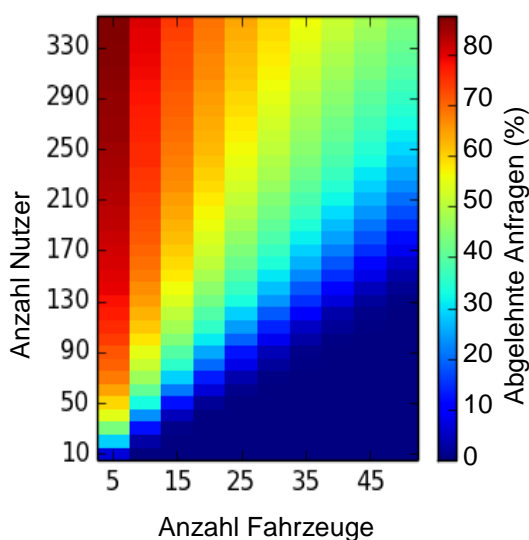


Abbildung 8: Fahrzeugverfügbarkeit nach (i)

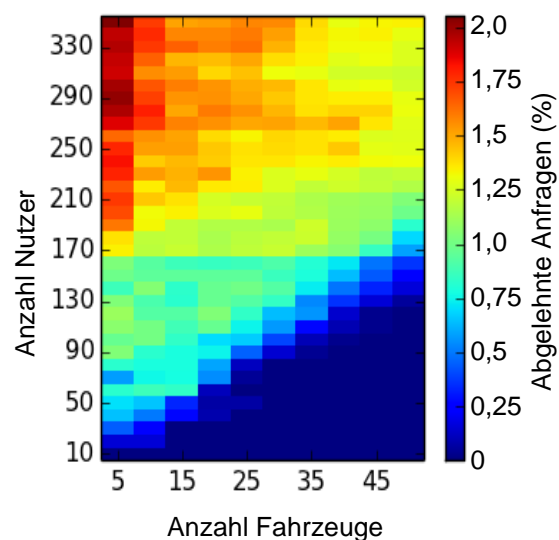


Abbildung 9: Fahrzeugverfügbarkeit nach (ii)

Für einen Flottenbetreiber ist es sinnvoll, eine hohe Verfügbarkeit seiner Flotte zu erreichen. Um diesen idealen Bereich zu identifizieren, wird ein Szenario angenommen, in dem die Elektrofahrzeuge immer laden können und es keine Begrenzung der maximalen Gebäudeanschlussleistung gibt (d. h. die relative maximale Anschlussleistung $P_{GA}/P_{Ges} = 1$). Bei entsprechenden Nutzeranfragen kann dadurch festgestellt werden, ab wann immer ein Fahrzeug verfügbar ist. Im dunkelblauen Bereich der Grafiken sind die Fahrzeuge immer verfügbar. Die Verfügbarkeit wird umso schlechter, je näher die rote Farbskala erreicht wird. In dieser Konstellation werden fast 90% der Anfragen abgelehnt. Aus den Grafiken lässt sich die Erkenntnis gewinnen, dass nahezu alle abgelehnten Nutzeranfragen aufgrund von nicht verfügbaren Fahrzeugen erfolgen (vgl. Abbildung 8). Eine Ablehnung von einer Anfrage wegen zu geringem Füllstand der Batterie, tritt lediglich in max. 2% der Fälle auf (vgl. Abbildung 9).

3.3 Lastverschiebungspotenzial von elektromobilen Flotten

Wie bereits erläutert soll in diesem Beitrag auch das Lastverschiebepotenzial von elektromobilen Flotten untersucht werden. Dabei ist die Lastkurve an Werktagen unter der gewählten Parameterkonstellation von 25 Elektrofahrzeugen, 60 Nutzern, 27,5 kW Gebäudeanschlussleistung und einer maximalen Ladeleistung von 3,7 kW (Mode 2) in Abbildung 10 dargestellt. Ein Lastverschiebungspotenzial ist insbesondere dann möglich, wenn die Flotte eine möglichst hohe Verfügbarkeit (im Idealfall 100%) hat und dabei sich die untersuchten Ladestrategien nicht stark unterscheiden. Nach diesen Gesichtspunkt ist die Parameterwahl, basierend auf den vorherigen Erhebungen, getroffen worden. Ebenfalls ist der berechnete durchschnittliche Ladezustand der Batterie der betrachteten Fahrzeuge in der Grafik abgebildet (grüne Linie). Sie schwankt zwischen den Bereichen von ca. 70 und 100%. Die kumulierte Ladeleistung ist mit der blauen Linie ebenfalls in Prozent dargestellt (siehe Abbildung 10).

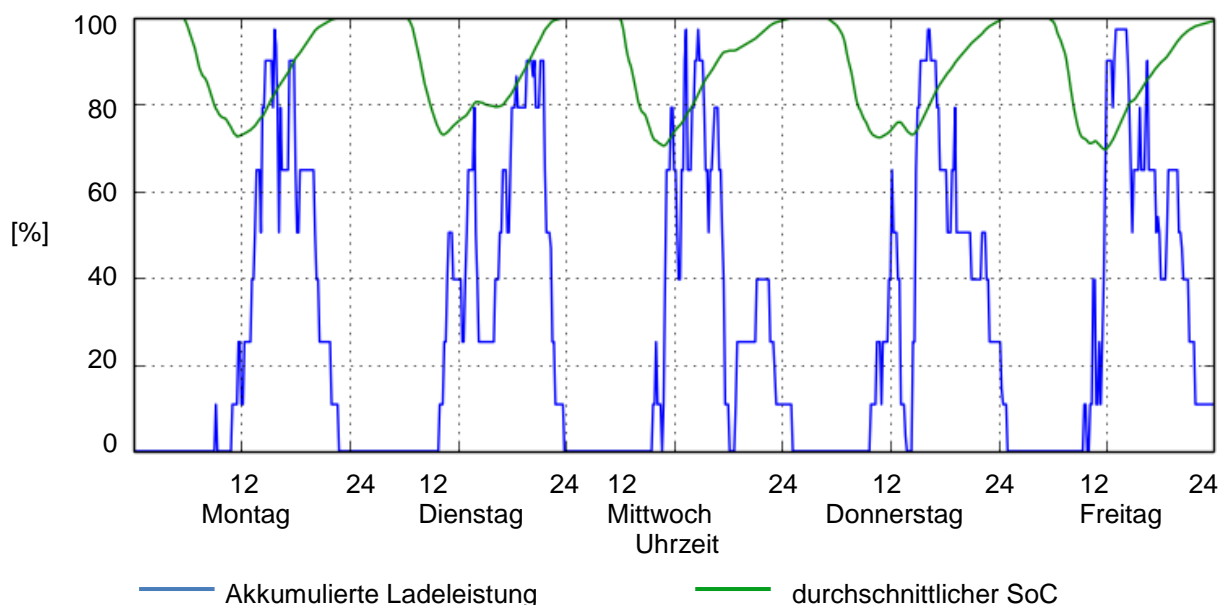


Abbildung 10: Zeitverlauf der kumulierten Ladeleistung und des SoC

Insbesondere sind Lastverschiebepotenziale möglich, wenn eine große Anzahl der Elektrofahrzeuge angeschlossen sind, der SoC entsprechend gering ist, genügend Gebäudeanschlussleistung und Zeit vorhanden ist. Diese Konstellation ist in den Nachtstunden anzutreffen. Wie der dargestellte durchschnittliche SoC der Flotte der Elektrofahrzeuge impliziert, findet nachts i. d. R. eine Vollladung der Batterien statt. Tagsüber hingegen werden Fahrzeuge bei Anfrage ausgeliehen, sobald der SoC ausreichend für die angeforderte Distanz ist. Dieses soll zu einer verbesserten Flottenauslastung führen. Lastverschiebepotenziale sind auch teilweise bis zu den Mittagsstunden (ca. 13 Uhr) möglich. Kurz nach der Mittagszeit wird die maximale Gebäudeanschlussleistung in diesem Szenario fast vollständig ausgelastet.

3.4 Kritische Würdigung

Das entwickelte Simulationsmodell stützt sich auf die Datenbasis des KiD und einer darin breit aufgestellten dienstlichen Flotte, welche jedoch nur einen begrenzten Datensatz zur Verweildauer aufweist. Demnach würden spezifischere Daten den Aussagegehalt der Ergebnisse verbessern und im Idealfall sogar eine Aussage zu Flotten unterschiedlicher Wirtschaftssektoren ermöglichen. Das Simulationsmodell enthält keine weiteren technischen Restriktionen, wie die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesäule. Ebenfalls sind keine spezifischen Ladekurven für die Elektrofahrzeuge integriert. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ladestrategien sind keine optimierten Strategien. Dafür könnte in einem nächsten Schritt analysiert werden, welche Auswirkungen optimierte Ladestrategien mit vollständiger Information über die zukünftigen Buchungen haben. In dieser Arbeit bleibt ebenfalls unberücksichtigt, dass die Akzeptanz zur Einführung von Ladestrategien insbesondere vom Betreiber des Flottenfuhrparks und weniger von den Nutzern abhängt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt mögliche Lastverschiebepotenziale von elektromobilen Flotten unter verschiedenen Szenarien auf. Hierbei wird ein multiagentenbasiertes Simulationsmodell angewendet, um die Fragestellungen zu analysieren, konkrete Parameterbereiche zu identifizieren, sowie deren Einfluss auf die Ergebnisse zu quantifizieren.

Ersichtlich wird bei der Fahrzeugverfügbarkeit, dass die fünf untersuchten Ladestrategien jeweils bestimmte Bereiche besitzen, in denen sie den anderen Strategien überlegen sind. Die Vorteile sind jedoch für die betrachteten Flotten gering. Weiterhin wurde ersichtlich, dass nicht der Ladeprozess, sondern insbesondere die fehlenden Elektrofahrzeuge die Pkw-Verfügbarkeit der betrachteten dienstlichen Flotte beschränken.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass eine Lastverschiebung in andere Tageszeitbereiche möglich ist und insbesondere nachts hohe Potenziale vorhanden sind. Die Ergebnisse zeigen, dass eine netzorientierte Lastverschiebung insbesondere bei einer hohen Flottenverfügbarkeit sinnvoll erscheint.

Auf den in diesem Beitrag erzielten Ergebnissen wird in weiteren Forschungsarbeiten aufgebaut. Dabei können nachfolgende Untersuchungen die aufgezeigten Lastverschiebepotenziale näher spezifizieren.

Aus wirtschaftlichem Gesichtspunkt wird in einem weiteren Schritt eine Monetarisierung Berücksichtigung finden, um darauf basierend die Ladestrategien anzupassen und somit Fragestellungen aus energiewirtschaftlicher Sicht besser darzustellen (z. B. Netzausbau oder Kraftwerkseinsatzplanung). Dabei kann dann untersucht werden, wie sich die einzelnen Ladestrategien auf die Lebensdauer der Batterien auswirken (Batterieabnutzung). Somit könnten verschiedene Sichtweisen und damit unterschiedliche Fragestellungen implementiert werden.

Des Weiteren könnten Themen, wie die verschiedenen Fragestellungen und Geschäftsmodelle aus der Sicht eines Parkhaus-, Flottenbetreibers oder Energieversorgers aussehen, interessant sein. In Bezug auf Flotten könnte es in einem nächsten Schritt interessant sein, synergetisches Laden zu betrachten, d. h. Ladesäulen, die frei zugänglich sind und sowohl von privaten Nutzern als auch von dienstlichen Elektrofahrzeugen genutzt werden können. Durch die verschiedenen Aufenthaltsdauern der einzelnen Flotten, welche sich über den Tag verteilen, könnten Synergien entstehen, die zu einer verbesserten Auslastung von Ladesäulen führt.

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projektes „Integriertes Flottenladen“ im Schaufenster Elektromobilität Baden-Württemberg und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen der Schaufensterinitiative der Bundesregierung gefördert.

Referenzen

- [1] Waraich, R.A., M.D. Galus, C. Dobler, M. Balmer, G. Andersson und K.W. Axhausen (2013): Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Smart Grid: Investigations Based on a Micro-Simulation, *Transportation Research Part C*, 28, S. 74-86.
- [2] Jochem, P.; Kaschub, T.; Paetz, A.-G. und Fichtner, W. (2012): Integrating Electric Vehicles into the German Electricity Grid – an interdisciplinary Analysis, in proceedings of the Electric Vehicle Symposium 26 (EVS26), Los Angeles, CA.
- [3] Jochem, P.; Babrowski, S. und Fichtner, W. (2013): Electric Vehicle Market Penetration and Corresponding CO₂ Emissions: A German Case Study For 2030, IAAE-Konferenz-Proceedings, Düsseldorf.
- [4] Kaschub, T.; Jochem, P. und Fichtner, W. (2013): Steigerung des Elektrizitätseigenverbrauchs von Heim-Fotovoltaikanlagen durch Elektrofahrzeuge, in *uwf UmweltWirtschaftsForum*, Vol. 21, Heft 3 (2013), S. 243-250,
- [5] Jochem, P.; Kaschub, T. und Fichtner, W. (2013): How to integrate electric vehicles in the future energy system? in: Hülsmann, M and Fornahl, D. (Eds.): *Evolutionary Paths Towards the Mobility Patterns of the Future*, Springer, Heidelberg, Germany.
- [6] Hahn, T.; Schönfelder, M.; Jochem, P.; Heuveline, V. und Fichtner, W. (2013): Model-based Quantification of Load Shift Potentials and Optimized Charging of Electric Vehicles, *Smart Grid and Renewable Energy*, 4 (5), S. 398-408.
- [7] Genoese, M. (2010): *Energiewirtschaftliche Analysen des deutschen Strommarkts mit agentenbasierter Simulation*. NomosVerlag, Baden-Baden.
- [8] Jochem, P. (2009): *A CO₂-Emission Trading Scheme for German Road Transport – assessing the impacts using a meso economic model with multi-agent attributes*, NomosVerlag, Baden-Baden.

- [9] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2012): Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010, Braunschweig.
- [10] ADACautotest (2012): Nissan Leaf, <http://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT4719_Nissan_Leaf/Nissan_Leaf.pdf>, abgerufen am 22.01.2014.
- [11] Flath, C.; Ilg, J.; Gottwalt, S.; Schmeck, H. und Weinhardt, C. (2013): Improving Electric Vehicle Charging Coordination Through Area Pricing, Transportation Science.
- [12] Metz, M. und Doetsch, C. (2012): Electric vehicles as flexible loads - A simulation approach using empirical mobility data, Energy, 48, S. 369-374.