

SMART ELECTRIC MOBILITY – ENERGIETECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN UND CHANCEN DER ELEKTROMOBILITÄT IM INDIVIDUALVERKEHR

Markus Litzlbauer

TU Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe
Gußhausstraße 25 / E370 - 1, 1040 Wien, Österreich
Tel.: +43 | (0)1 | 58801 | 370 132, Fax: +43 | (0)1 | 58801 | 370 199
E-Mail: markus.litzlbauer@tuwien.ac.at; Web: www.ea.tuwien.ac.at

Kurzfassung: „Smart Electric Mobility“ (SEM) ist ein im Jahr 2011 abgeschlossenes Forschungsprojekt, in dem die energietechnischen Herausforderungen und Chancen der Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr erarbeitet und dafür Lösungskonzepte, entsprechend den Nutzerbedürfnissen, entwickelt wurden.

Zentral – im Projekt SEM¹ – ist das Zusammenspiel der drei inhaltlichen Themengebieten:

- Nutzer- und Mobilitätsverhalten
- Fahrzeugeigenschaften und -anforderungen
- Energiebereitstellung und Ladeinfrastruktur

Dieser Beitrag widmet sich deshalb einerseits der Bestimmung von Fahrlängen- und Standortverteilungen empirischer Quellen und ihrer Übertragbarkeit auf die Elektromobilität. Andererseits werden darauf aufbauend die ungesteuerte Lastprofilbildung sowie die Erfüllbarkeitsanalysen des Mobilitätsverhaltens von Elektrofahrzeugen dargelegt. Zusätzlich wird eine PV-orientierte Ladestrategie vorgestellt und die erreichbaren Werte des Deckungs- und Integrationsgrades präsentiert.

Die entwickelten Verfahren verbessern die Bestimmung der erforderlichen Ladeinfrastruktur, der zu erwartenden Netzbelastungen, sowie der notwendigen regenerativen Energieressourcen und können situativ auf lokale Rahmenbedingungen angepasst werden.

Keywords: Elektromobilität, Ladeinfrastruktur, Erfüllbarkeitsanalyse, Netzintegration, Ladestrategie

1. Einleitung

Der Weg zu einer nachhaltigen und umweltschonenden Mobilität im motorisierten Individualverkehr wird eine zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs mit sich bringen. In den vergangenen Jahren haben sich die Batterieeigenschaften deutlich verbessert. Dennoch ermöglichen die erzielbaren Energiedichten noch keine Reichweiten, wie von konventionellen Fahrzeugen gewohnt. Deshalb wird für reine Elektrofahrzeuge eine Ladeinfrastruktur erforderlich, die auf ein völlig anderes Prinzip setzt. Das Laden wird im Regelfall an den Standplätzen des Fahrzeugs im geparkten Zustand stattfinden, nicht wie bisher entlang einer

¹ Das Projekt SEM wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ durchgeführt.

Strecke durch einen zusätzlichen Zwischenhalt. Dieser wird nur in Ausnahmefällen für das Elektrofahrzeug die passende Lösung sein.

Für die richtige Dimensionierung der Ladeinfrastruktur tragen der Energiebedarf (proportional zu den zurückgelegten Distanzen) sowie die Standorte der Fahrzeuge (mit Lademöglichkeit) bei.

Diese Umstellung bedeutet ebenfalls, dass nicht mehr nur an neuralgischen Punkten im öffentlichen Raum, sondern zu einem großen Anteil dezentral in den Garagen und privaten Stellplätzen die Energieaufnahme erfolgen wird. Dadurch kommt es je nach Höhe der Anschlussleistung zu signifikanten Zusatzbelastungen der leitungsgebundenen Elektrizitätsversorgung.

Beim motorisierten Individualverkehr kann der Verkehrsteilnehmer im Wesentlichen über die Zeit und den Zweck der von ihm zurückgelegten Wege frei entscheiden. An dieser Definition ändert sich auch nichts, wenn der benutzte Pkw elektrisch angetrieben wird. Im Gegensatz zum planbaren öffentlichen Verkehr sind fundierte Aussagen zum Mobilitätsverhalten von Elektromobilitätsnutzern im motorisierten Individualverkehr deutlich schwieriger. Aus diesem Grund wurden im Forschungsprojekt „Smart Electric Mobility“, basierend auf einer GPS-Langzeiterhebung von privaten Pkw-Fahrten, die energietechnischen Herausforderungen und Chancen der Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr erarbeitet.

Die Ergebnisse des Projekts SEM wurden im Endbericht [1], einer Dissertation [2] und mehreren Artikeln² [3]-[6] bereits mit variiertem Umfang und Detaillierungsgrad veröffentlicht. In diesem Bericht sind die Analysen der TU Wien und ihre Ergebnisse in Hinblick auf Nutzungsverhalten, Infrastrukturerfordernisse und Energiebereitstellung für ungesteuertes und PV-orientiertes Laden zusammengestellt. Der Beitrag bildet somit einen Querschnitt über das Projekts SEM und der damit verbundenen Publikationen und gibt die Erkenntnisse sinngemäß wieder.

2. Fahrlängen- und Standortverteilungen

Als Grundlage für die energietechnischen Betrachtungen, sowie für die Analysen von Stehzeiten und Standorten wurde vom Institut für Verkehrswesen (BOKU) eine GPS-Langzeiterhebung von Pkw-Fahrten konzipiert und durchgeführt [1]. Dabei sind in konventionelle private Fahrzeuge von über 30 TestfahrerInnen in Ostösterreich GPS-Erfassungsgeräte installiert und die Trajektorien des motorisierten Individualverkehrs (MIV) über mindestens drei Wochen aufgezeichnet worden. In weiterer Folge wird dieser kurz mit „SEM“ bezeichnet. Wenn nicht ausdrücklich auf eine andere Erhebung verwiesen wird, basieren die Ergebnisse stets auf den SEM-Daten.

Es wurde für jedes Fahrzeug berechnet, wie weit die längste Fahrt und die max. Tagesfahrleistung in der gesamten Betrachtungszeit ist. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 dargestellt. 47 % der Fahrzeuge fahren zumindest an einem Tag mehr als 150 km und davon ca. die Hälfte besitzt sogar Einzelfahrten von über 150 km. Das Besondere daran ist, dass diese weiten Wege bzw. Wegketten nicht täglich auftreten, sondern die Ausnahme bilden³ und vor

² Zwei wurden im Jänner 2012 für ein e&i-Sonderheft zum Thema „Elektromobilität“ zur Einreichung gebracht.

³ Denn 95 % aller Einzelfahrten der SEM-Daten fallen kleiner als 50 km aus. Dies stimmt mit den Ergebnissen der landesweiten Mobilitätsbefragung in NÖ 2008 [7] gut überein. Dort wird die Summenhäufigkeit der werktäglichen Wegdistanzen von bis zu 50 km mit rund 94 % angegeben.

allem am Wochenende vorkommen. Könnte man diese langen Fahrten durch andere Verkehrsmittel abdecken, würde die gezeigte Verteilung deutlich geringere Werte aufweisen.

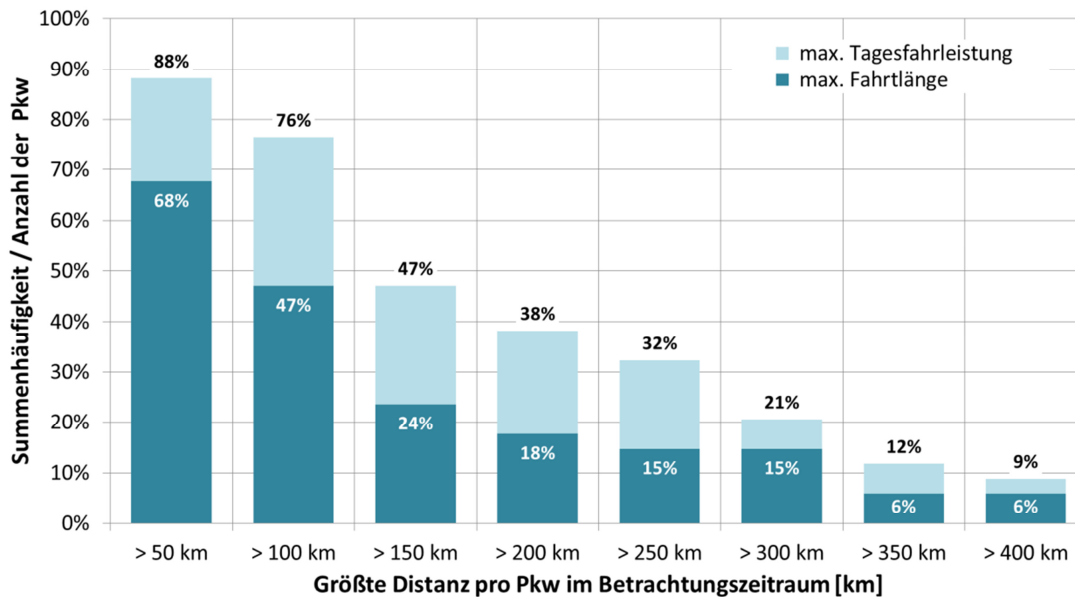


Abbildung 1: Summenhäufigkeit der größten Distanzen je Fahrzeug (alle Wochentage, Mo-So)

Zusätzlich zur Aufnahme der GPS-Fahrdaten wurden die häufigsten Standorte via Interview erhoben und deren Anteile im Tagesverlauf analysiert. Diese sind in Abbildung 2 unter dem Titel „SEM“ dargestellt und zeigen, dass mehr als 90 % aller Fahrzeuge in den Nachtstunden von 00:00 bis 04:00 Uhr und mindestens 35 % zu allen Tageszeiten Zuhause stehen. Weitere Analysen ergaben, dass der Anteil der am Arbeitsplatz abgestellten Fahrzeuge sein Maximum um 10 Uhr vormittags hat und ca. 46 % beträgt. Die nächsthäufigeren Standorte sind „Freizeit“ und „Besuche“. Sie erreichen jedoch einzeln zu keinem Zeitpunkt einen Anteil über 7 %.

Neben der Langzeit-GPS-Erhebung („SEM“) ist in Abbildung 2 zum Vergleich zusätzlich die Verteilungen einer schriftlich-postalischer Stichtagserhebungen aus Niederösterreich 2008 („NOE“, [7]) eingetragen. Diese bezieht sich auf den motorisierten Individualverkehr an Arbeitstagen (Mo bis Fr). Um den Anteil der „nicht mobilen Personen“ zu berücksichtigen, wurde ein Sechstel „Nicht-Außer-Haus-Anteil“⁴ angenommen.

Die Standortverteilungen der drei Erhebungen haben gemein, dass die betrachteten Pkw zeitlich am häufigsten Zuhause und am Arbeitsplatz parken. Dies lässt darauf schließen, dass vorrangig an diesen beiden Standorten eine Errichtung von Ladeinfrastruktur für den MIV notwendig ist. An dieser Stelle ist jedoch festzuhalten, dass diese Verteilungen vom privaten Individualverkehr stammen. Firmenfuhrparks sowie der öffentliche Verkehr zeigen mit Gewissheit andere Verläufe.

⁴ Anteil der befragten Personen, die am Stichtag ihre Wohnung bzw. ihr Haus nicht verlassen und somit ihren Pkw den gesamten Tag nicht benutzen. Das Parken wird dem Standort „Zuhause“ angerechnet. Der Betrag des „Nicht-Außer-Haus-Anteils“ wurde aus den SEM-Daten berechnet.

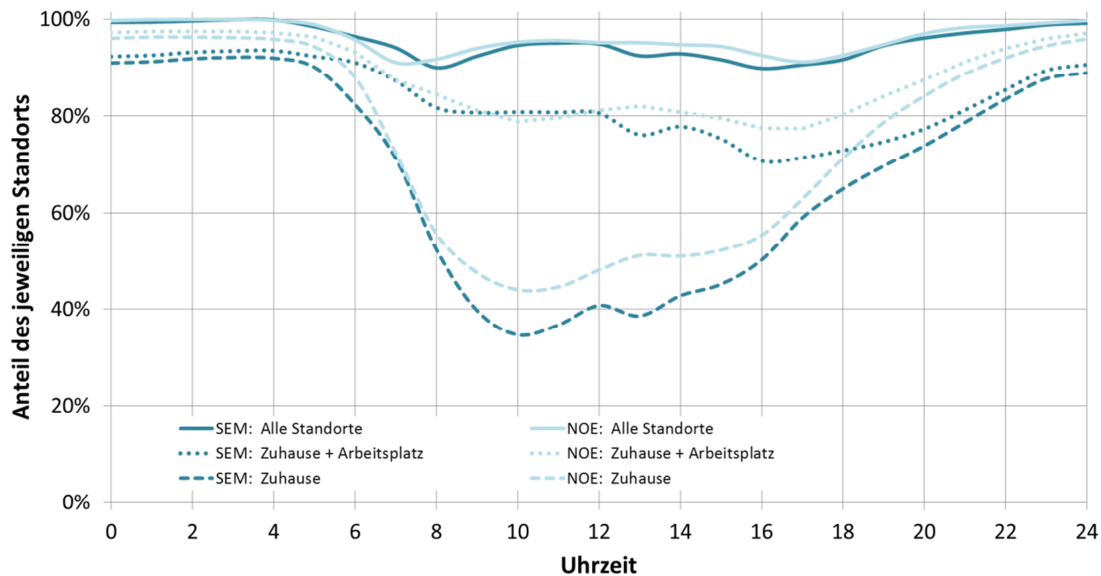


Abbildung 2: Vergleich der Standortverteilungen verschiedener Mobilitätserhebungen (SEM 2010 und NOE 2008)

3. Fahrzeugbezogene Modellierung und Simulation

Zur Bestimmung des Energiebedarfs der synthetisierten Elektrofahrzeuge wurde vom Department Mobility (EDT, AIT) eine physikalische bzw. numerische Simulation erstellt, welche in DYMOLA entwickelt wurde und auf den MODELICA Standard Bibliotheken basiert [1]. In Kombination mit den GPS-Trajektorien der konventionellen Fahrzeuge und der zugehörigen Fahrzeugklasse (Kleinwagen, Mittelklasse, SUV oder Transporter) konnte der spezifische Verbrauch jeder Fahrt eines adäquaten Elektrofahrzeuges ermittelt werden.

Basierend auf den Erkenntnissen in Bezug auf Standorte und Energiebedarf wurden mehrere modulare MATLAB-Programme entwickelt, die es gestatten, umfangreiche energietechnische Analysen durchzuführen. Schon bei der Datenaufbereitung wurde darauf geachtet, diese so flexibel wie möglich zu gestalten, damit verschiedene Mobilitätserhebungen – Langzeitmessungen und Stichtagsbefragungen – verarbeitet werden können. Weiters ist es unter anderem möglich auf Ebene der einzelnen Elektrofahrzeuge (BEV) die zeitlichen Verläufe der zurückgelegten Strecken, der Standorte, wie auch des Batterieladezustandes (SOC) und der benötigten Ladeleistung zu generieren. Dabei können die Batteriekapazität, die relevanten Parameter der Ladecharakteristik, die Ausbaustufe der Ladeinfrastruktur mit zugehöriger Anschlussleistung, der spezifische Energiebedarf, verschiedene Verluste und Wirkungsgrade, wie auch mehrere Varianten von verbraucher- und erzeugerorientierten Ladestrategien frei gewählt und simuliert werden. Nachstehend werden die modularen Programme übergeordnet als MATLAB-Tool bezeichnet.

In weiterer Folge sind jene Simulationen dargestellt, deren Erkenntnisse sich auf die notwendige Ladeinfrastruktur, den möglichen Leistungsbedarf von und die regenerative Energiebereitstellung für batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen des motorisierten Individualverkehrs beziehen.

4. Erfüllbarkeit der Mobilität

In diesem Zusammenhang wird von „Erfüllbarkeit der Mobilität“ gesprochen, wenn ein Elektrofahrzeug unter den vorgegebenen Ladeinfrastruktur- und Batterieeigenschaften alle seine Fahrten im Betrachtungszeitraum absolvieren kann, ohne die minimale SOC-Grenze zu unterschreiten. Dabei wird der SOC-Verlauf maßgeblich von der richtigen Wahl der Parameter beeinflusst.

Im ersten Schritt wurde mit Hilfe des beschriebenen MATLAB-Tools eine Sensitivitätsanalyse unter anderem für die Parameter „Batteriegröße“ und „Ladeleistung“ durchgeführt. Datenbasis waren die 31 GPS-basierenden Fahrprofile. Die Resultate der Sensitivitätsanalysen sind in Abbildung 3 ersichtlich. Die kleinen Markierungspunkte stellen die Ergebnisse der einzelnen Variationen dar, die großen die Mittelwerte. Der Einfluss eines Parameters ist einerseits durch den Verlauf der Mittelwerte gegeben und andererseits durch die Streuung der einzelnen Variationen.

Beim Parameter „Batteriegröße“ steigt die Anzahl der Elektrofahrzeuge, die ihre Fahrten bewältigen, ohne im Verlauf eines Weges nachladen zu müssen, mit Vergrößerung der Kapazität deutlich an. Die Batteriegröße hat eindeutig den stärksten Einfluss auf die Erfüllbarkeit, was durch die geringe Streuung der einzelnen Variationen ersichtlich ist.

Hingegen bleibt beim Parameter „Ladeleistung“ die Erfüllbarkeit bei allen drei Leistungen im Mittel konstant. Zusätzlich ist die Streuung der Punkte relativ groß; deshalb kann auf einen geringen Einfluss der Ladeleistung auf die Erfüllbarkeit der Mobilität geschlossen werden.

Als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse ist festzuhalten, dass eine maximale Anschlussleistung von 3,7 kW (~230 V, 16 A, einphasig) bei Laden ohne Wegunterbrechung ausreicht (in weiterer Folge als „Normalladung“ bezeichnet) und Leistungen bis 22 kW (~230 V, 32 A, dreiphasig) keinen weiteren Vorteil in Bezug auf die Erfüllbarkeit der Mobilität bringen.

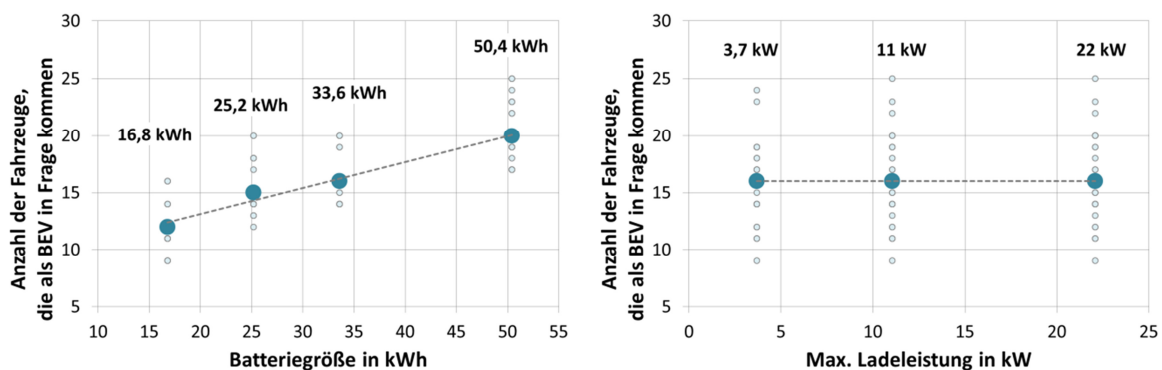


Abbildung 3: Sensitivitätsanalyse für die Parameter „Batteriegröße“ und „Ladeleistung“

Abbildung 4 stellt eine weitere Erfüllbarkeitsanalyse dar. Es ist ebenfalls der Einfluss der Batteriegröße, jedoch im Speziellen für die betrachteten Standorte getrennt, ersichtlich. Jeder Kurve liegt zu Grunde, dass nur genau an einem Standort Ladeinfrastruktur mit 3,7 kW Anschlussleistung zur Verfügung steht. Dabei ist der betrachtete Batteriebereich von 0 bis 100 kWh eher von modellhaftem Charakter und soll Tendenzen aufzeigen. Physikalisch liegen heutige Batteriekapazitäten je nach Fahrzeugtyp etwa im Bereich von 15 bis 35 kWh (durch zwei vertikale strichlierte Linien begrenzt). Wie schon bei der Betrachtung der Stand-

ortverteilung zeigt sich auch in Abbildung 4 deutlich die Relevanz der Standorte „Zuhause“ und Arbeitsplatz“.

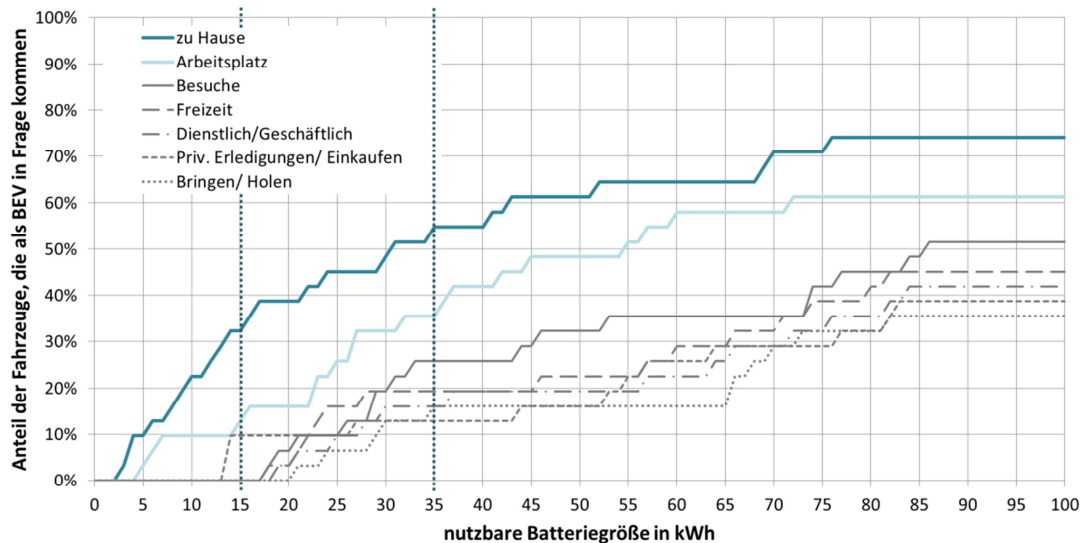


Abbildung 4: Erfüllbarkeitsanalyse für einzelne Standorte

Dennoch kann mit Normalladung nur ein Teil der Fahrzeuge bedient werden. Es kann vorkommen, dass Fahrprofile aufgrund der großen Distanzen oder häufigen Einsatzes des Fahrzeugs in der Wegekette mit diesem Ladeverfahren nicht erfüllt werden können. Für diese Fälle sind Alternativen zu erheben, die ergänzend zur Normalladung in den engpassbehafteten Phasen angewendet werden.

Mögliche Hilfsmaßnahmen zur Normalladung können sein:

Schnellladung: Entlang von Wegen wird die Fahrt max. einmal unterbrochen und in 15 Minuten eine Energiemenge von bis zu 20 kWh geladen. Dies bedarf eigener Ladestellen mit sehr hohen Ladeleistungen (>100 kW) und entsprechend verstärkter Netzanbindung. Auch das Fahrzeug muss mit einem solchen Schnellladezugang ausgestattet sein.

Wegsubstitution: Es treten im Fahrprofil nur wenige Wege auf, die eine Erfüllbarkeit mittels Normalladung übersteigen. Die NutzerInnen sind bereit, diese Wege mit anderen Verkehrsmitteln (Zweit- oder Mietfahrzeug, Car-Sharing, öffentlichen Verkehrsmitteln, etc.) zu absolvieren. Ein hohes Maß an Wechselbereitschaft und Flexibilität sind erforderlich.

Einsatz eines Range-Extenders: In diesem Fall ist das Fahrzeug generell mit einem Range-Extender ausgeführt. Große Distanzen werden dadurch bewältigt, dass ein Generator mittels mitgeführtem (z.B. fossilen) Treibstoff die benötigte Energie zur Verfügung stellt und die Batterie regelmäßig in einen höheren Ladezustand zurückgeführt wird.

Die Ergebnisse der Simulationen, mit Hilfe des MATLAB-Tools erzeugt, sind in Tabelle 1 für die verschiedenen Fahrzeugklassen mit ihren adäquaten Batteriekapazitäten aufgelistet. Sie zeigen in Bezug auf die Erfüllbarkeit der Mobilität ein klares Bild:

Kleinwagen- und Mittelklasse-Fahrzeuge können zu einem sehr hohen Anteil mit Normalladung ihre Fahrprofile erfüllen. Unter Zuhilfenahme von Schnellladung oder Wegsubstitution kann ein weiterer gewichtiger Anteil erfüllt werden. Diese beiden Fahrzeugklassen eignen sich sehr gut als Elektrofahrzeuge.

Große Fahrzeuge (SUV, Transporter) können im Regelfall die Fahrprofile nicht mit Normalladung, aber auch bei Unterstützung durch Schnellladung und Wegsubstitution nur in beschränktem Maße elektrisch erfüllen. Transporter und SUV führen alleine schon durch das höhere Gewicht zu mehr Problemen bei der Umstellung auf elektrischen Betrieb und in weiterer Folge zu einer geringeren Erfüllbarkeit der Mobilität. Ein vollelektrischer Betrieb dieser Klassen ist primär nicht zielführend.

Range-Extender in der zugrundgelegten Betriebsweise können bei dieser Stichprobe nur in der Mittelklasse und bei den Transportern Verbesserungen in der Erfüllbarkeit erzielen.

Tabelle 1: Anteil der Erfüllbarkeit der jeweiligen Fahrzeugklasse mit entsprechender Ladeinfrastruktur

		Normal-ladung	Normal- + Schnell-ladung	Normal-ladung + Wegsubstitution	Normal-ladung + Range Extender	nicht elektrisch
		Zuhause + Arbeitsplatz	max. einmal pro Weg	max. drei Wegketten	Laden an allen Standorten	Minimum
Kleinwagen	15,5 kWh	60 %	80 %	90 %	80 %	10 %
Mittelklasse	22,1 kWh	58 %	83 %	83 %	92 %	8 %
SUV	31,0 kWh	20 %	40 %	60 %	40 %	40 %
Transporter	31,0 kWh	0 %	25 %	25 %	50 %	50 %

Obwohl nur eine geringe Fahrzeugzahl für die Auswertung vorlag, sind die Ergebnisse von guter Qualität und zeichnen einen Trend der geeigneten Fahrzeuggruppen vor. Weitere Verbesserungen könnten durch eine höhere Fahrzeugzahl evaluiert werden.

5. Ungesteuertes Laden

Unter dem Begriff „ungesteuertes Laden“ wird in dieser Arbeit das Laden der Fahrzeugbatterie unmittelbar nach Erreichen eines definierten mit Ladeinfrastruktur ausgestatteten Standorts bezeichnet. Besteht nur Zuhause die Möglichkeit den BEV zu laden, so repräsentiert dies den „Worst Case“ und spielt somit in Hinblick auf die Belastung des elektrischen Energiesystems eine übergeordnete Rolle. Dieser Fall wird nachfolgend behandelt.

Ladeprofile des motorisierten Individualverkehrs

Abbildung 5 zeigt den SOC-Verlauf, die Standortverteilung und das Ladeprofil eines exemplarischen BEV mit einer Tagesfahrleistung von 60 km. Die Kurven wurden mit dem erwähnten MATLAB-Tool ermittelt, und es wurde dabei vorausgesetzt, dass die zugrunde gelegte Li-Ionen-Batterie eine Kapazität von 25 kWh besitzt, die innerhalb der SOC-Grenzen von 10 - 90 % betrieben wird und eine U/a-Ladecharakteristik aufweist. Die Anschlussleitung beträgt

3,7 kW (~230 V, 16 A, einphasig) und Ladeinfrastruktur ist nur am Standort „Zuhause“ vorhanden.

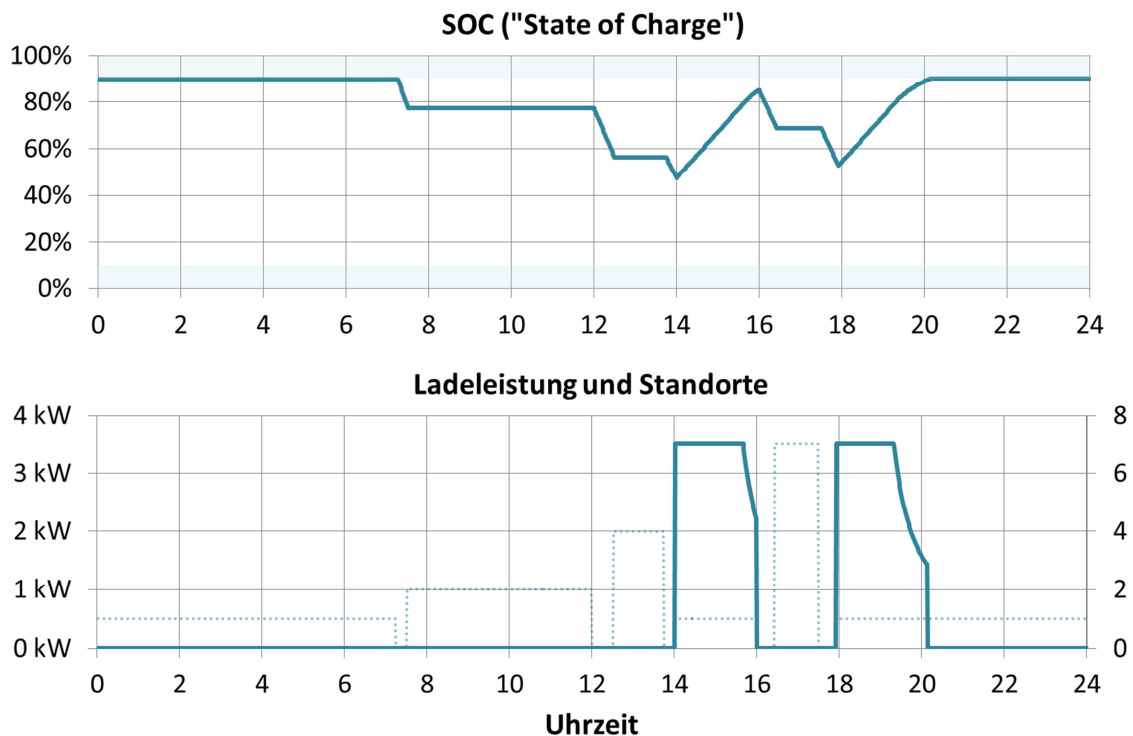


Abbildung 5: Zeitliche Verläufe des Ladezustandes, der Standorte und der Ladeleistung für ein exemplarisches Elektrofahrzeug (ungesteuertes Laden nur Zuhause)

Zur Abschätzung der Belastung des elektrischen Verteilnetzes ist vor allem das Summenladeprofil der BEV von Interesse. Dieses wurde auf einen BEV normiert und ist in Abbildung 6 für die GPS-basierenden Elektrofahrzeuge unter dem Titel „SEM“ dargestellt. Zusätzlich ist erneut das Profil der schriftlich-postalischen Stichtagserhebung aus Niederösterreich 2008 („NOE“) für dieselben Rahmenbedingungen eingetragen. Es wurden nur jene Fahrprofile berücksichtigt, die ihre Mobilität, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, erfüllen und somit als batteriebetriebene Elektrofahrzeuge in Frage kommen.

Der Vergleich der normierten Summenladeprofile zeigt eine hohe zeitliche Korrelation der Profile. Unterschiede sind vorwiegend in der Lastspitze ersichtlich und ergeben sich aufgrund lokaler Gegebenheiten. Bedeutend ist weiters der Vergleich mit dem normierten Haushaltslastprofil⁵. Wie in Abbildung 6 ebenfalls dargestellt, kann die ungesteuerte gemittelte Lastspitze des Ladens eines Fahrzeugs (bei 3,7 kW) etwa zwei Drittel der gemittelten Lastspitze des H0-Profiles – noch dazu zur gleichen Tageszeit – erreichen. Dieser Fall würde zu einer deutlichen Erhöhung der Abendlastspitze in Verteilnetz führen.

⁵ Angegeben für einen Haushalt mit Stromverbrauch von 4,417 MWh/a [8] an einem Winterwerktag.

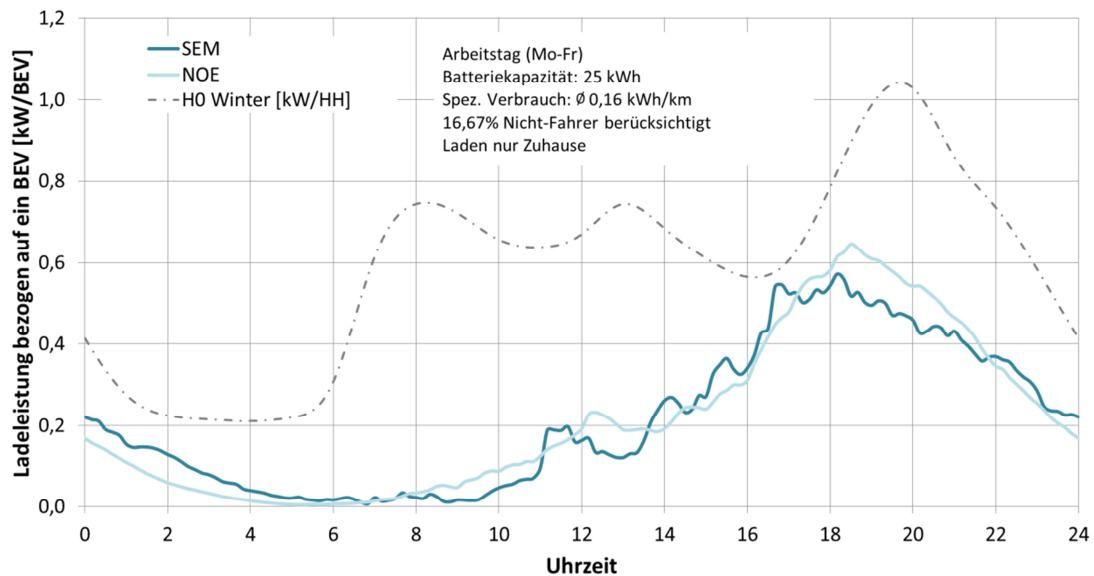


Abbildung 6: Summenladeprofile verschiedener Mobilitätserhebungen (SEM 2010 und NOE 2008)

6. Ladestrategie unter Photovoltaik-Nutzung

Im Kapitel 2 wurden die Verteilungen der Standorte erläutert. Es zeigte sich, dass die Standorte „Zuhause“ (primär) und „Arbeitsplatz“ (sekundär) aus zeitlicher Sicht die größte Bedeutung besitzen. Noch deutlicher kann die Relevanz der beiden Standorte vermittelt werden, wenn man die Ladeenergie der einzelnen Standorte betrachtet. Selbst wenn Ladeinfrastruktur bei allen Standorten verfügbar wäre, würden Zuhause und am Arbeitsplatz mindestens 65 % der Energie geladen werden. Die beiden Standorte haben zusätzlich die Besonderheit, dass ihnen im Regelfall eine konstante Position zugeordnet werden kann, während Freizeit, Einkaufen, etc. sich innerhalb der Kategorie auf viele verschiedene Orte aufteilen. Besonders in einer Startphase mit geringer Fahrzeugdurchdringung würden die kleinen Kategorien kaum hohe Auslastungen erzielen können, um eine Investition zu rechtfertigen.⁶ Deshalb werden bei den nachfolgenden Analysen diese beiden Standorte betrachtet.

Im Bereich der Elektromobilität spielt die Wahl der Energiequelle eine wesentliche Rolle. Denn, wenn E-Autos gesamt gerechnet weniger CO₂-Emissionen verursachen sollen als konventionelle fossil angetriebene Kraftfahrzeuge, müssen regenerative Ressourcen (wie z.B. Photovoltaik oder Wind) bevorzugt zum Einsatz kommen. Im konkreten Fall wird versucht die Deckung des Ladebedarfs mittels Photovoltaik zeitgleich und lokal – am Standort des Fahrzeugs – zur Verfügung zu stellen.

Dabei wurden die Messwerte einer realen PV-Anlage derart skaliert, dass sie in Summe dem Energiebedarf der Mobilität von 400 Elektrofahrzeugen entsprechen.

Die Realisierung des prognosefreien Modells erfolgte in MATLAB, und zielt darauf ab, so viel Energie wie möglich direkt aus Photovoltaik zu nutzen [1], [2]. Dafür muss das Laden bestmöglich von den Nachtstunden in den Tag – unter der Voraussetzung, dass am Morgen

⁶ Einzelne Freizeitstandorte, an denen das Fahrzeug regelmäßig und lange abgestellt wird, können ebenfalls zu den wichtigen Standorten hinzugezählt werden.

noch genügend Restenergie für die „ersten“ Fahrten vorhanden ist – verschoben werden. Es wurde ein Mindestladestand von 90 % als ausreichend eingestuft. Die Systemkonfigurationen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Systemkonfiguration für die Analyse von Ladestrategien (in Anlehnung an [2])

Kennwert / Themengebiet	Ausführung
<i>Energie-Erzeugungsdaten</i>	Reale PV-Messwerte, 10-Sek-Messwerte, Mittelung auf 15-Min., Aufteilung der Erzeugung auf Zuhause und Arbeitsplatz
<i>Verkehrsdaten</i>	Statistische Erhebung Niederösterreich 2008 [7]
<i>Anzahl Elektrofahrzeuge</i>	Lastprofil aus 400 Fahrzeugen
<i>Batteriekonfiguration</i>	25 kWh, keine Diversifizierung nach FZ-Gruppen
<i>Ladeinfrastruktur</i>	Zuhause und Arbeitsplatz
<i>Max. Ladeleistung</i>	3,7 kW
<i>Betrachtungszeitraum</i>	22. Juni bis 21. Dezember 2010 (PV-Daten)
<i>Skalierung bei Energiebilanz</i>	699 kW _p (1,75 kW _p /Elektrofahrzeug)
<i>Verschiebungsenergie</i>	10 % des Batteriespeicherinhalts (gesamt 1000 kWh)
<i>Bilanzierungsverhältnis</i>	1

Der Ladebedarf wird durch das reale Fahrverhalten konventioneller Fahrzeuge vorgegeben, deren Wege und Fahrtzwecke sich aufgrund eines Technologiewandels hin zur Elektromobilität nicht verändern sollten. Diese werden durch Simulation in Leistungsfahrprofile umgewandelt und in Kombination mit den Standorten zu Ladeprofilen verarbeitet.

Weiters wurde in diesen Analysen das Laden an den beiden Standorten „Zuhause“ und „Arbeitsplatz“ ermöglicht. Nicht nur die Ladeinfrastruktur, sondern auch die PV-Erzeugung, wird an diesen beiden Standorten angenommen. Durch die Aufteilung wird auch der örtlichen Kopplung von Erzeugung und Verbrauch Rechnung getragen.

Begriffsklärung der Kennwerte [9]

Das Bilanzierungsverhältnis (engl. Total Coverage) gibt das Verhältnis von Erzeugung und Verbrauch im gesamten Betrachtungszeitraum energetisch, ohne zeitliche Korrelation oder gleichzeitiges Auftreten, an.

$$\text{Bilanzierungsverhaeltnis (TC)} = \frac{\sum \text{PV Erzeugung}}{\sum \text{Elektrische Last}} \quad (1)$$

Der Deckungsgrad (engl. Self Coverage) ergibt sich durch die Division der zeitlich mit der Erzeugung übereinstimmenden Last und der gesamten elektrische Last im Beobachtungszeitraum von einem halben Jahr.

$$\text{Deckungsgrad (SC)} = \frac{\sum \text{uebereinstimmende Last}}{\sum \text{Elektrische Last}} \quad (2)$$

Der Integrationsgrad (engl. Direct Use) bezieht sich hingegen auf den Anteil der PV-Erzeugung, der direkt zur Lastdeckung verwendet werden kann.

$$\text{Integrationsgrad (DU)} = \frac{\sum \text{uebereinstimmende Last}}{\sum \text{PV Erzeugung}} \quad (3)$$

Bzgl. der örtlichen Übereinstimmung sei erwähnt, dass in diesen gewählten Rahmenbedingungen die Erzeugung und der Verbrauch am gleichen Ort vorliegen müssen, um als Deckung gewertet zu werden. Nachfolgend wird ein mögliches Steuerkonzept herausgegriffen. Für weitere Details und Informationen wird auf die Literatur [1], [2] verwiesen.

PV-Synchron-Laden

Bei diesem Steuerkonzept erfolgt das Laden der Elektrofahrzeuge synchron zur verfügbaren Photovoltaik-Einspeisung. Bei einem Anfangszustand von 90 % der Batteriekapazität wird eine Verschiebungsenergie von 10 % des Speicherinhalts tagsüber mittels PV-Erzeugung abgedeckt. Liegt kein derartiger Ladebedarf mehr vor, reduziert sich das resultierende Ladeprofil auf den sich aktuell einstellenden Ladebedarf aufgrund der an diesem Tag zurückgelegten Fahrten. Überschüssig erzeugte Sonnenenergie wird in das Netz gespeist und versorgt andere Verbraucher oder Zwischenspeicher.

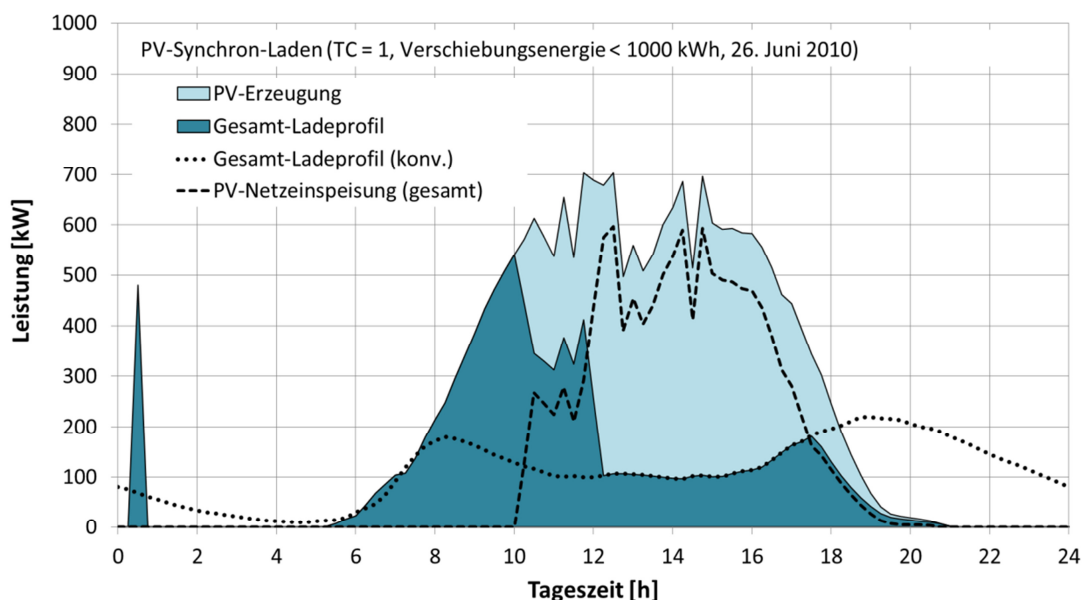


Abbildung 7: Exemplarische Darstellung des Steuerkonzepts „PV-Synchron-Laden“ (in Anlehnung an [2])

In Abbildung 7 sind die Darstellungen für 24 Stunden eines Sommertags gezeigt. Diese Situation tritt in der Form nicht im ganzen Jahr auf. Deshalb wird das saisonale Verhalten über den Betrachtungszeitraum eines halben Jahres und unter der Vereinfachung der Jahres-symmetrie ausgewertet. Die oberste Linie zeigt die generierte PV-Erzeugung in entsprechender Stundenzahl. Bei PV-Synchron-Laden können hohe Leistungseinspeisungen von etwa 85 % der installierten Leistung gegenüber der Netzanbindung auftreten.

Variation des Bilanzierungsverhältnisses

Die Variation des Bilanzierungsverhältnisses zeigt den Sachverhalt, wenn weniger oder mehr PV-Erzeugung in Relation zum gesamten Ladebedarf der Elektromobilität im Beobachtungs-

zeitraum zur Verbrauchsdeckung zur Verfügung steht. Beim PV-Synchron-Laden nimmt der Deckungsgrad mit steigender PV-Installation zu und erreicht bei knapp 80 % eine Sättigung.

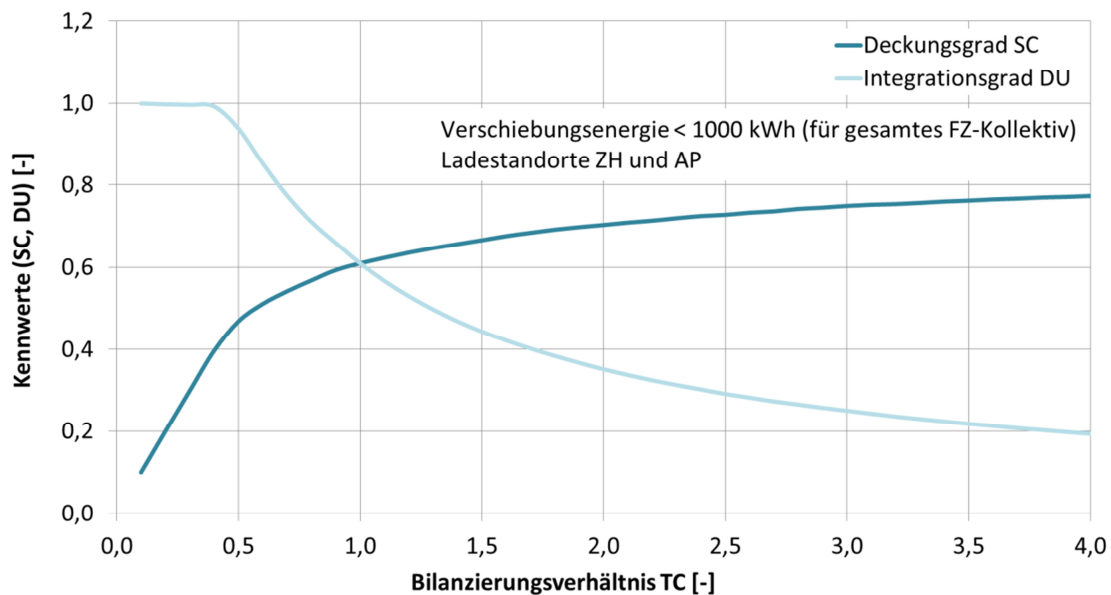


Abbildung 8: Deckungs- und Integrationsgrad bei Variation des Bilanzierungsverhältnisses (in Anlehnung an [2])

Der Integrationsgrad hingegen zeigt gegenläufiges Verhalten. Je mehr Photovoltaik installiert ist, desto geringer wird jener Anteil davon, der direkt für die Ladeprozesse der Fahrzeugbatterien verwendet werden kann.

Variation der Verschiebungsenergie

Aufgrund der inhaltlichen Zugehörigkeit zur Elektromobilität, ist das Augenmerk besonders auf den Deckungsgrad gerichtet. Wird die Verschiebungsenergie entsprechend der Grenzen variiert und mehr Energie von den Nachtstunden in den Tag verschoben, erhöht sich der Deckungsgrad. Bei Verdopplung der Verschiebungsenergie von 10 auf 20 % kann ein Deckungsgrad von etwa 70 % erzielt werden. Ab 20 % Verschiebungsenergie ist jedoch kaum noch eine Verbesserung möglich, zumal aus Mobilitätssicht immer mehr die garantierte Anfangsreichweite des Fahrzeugs am Morgen abnimmt.

Falls beispielsweise Entfernungen des darauffolgenden Tages bekannt sind, könnte im praktischen Einsatz die Verschiebungsenergie auch von Tag zu Tag variabel, entsprechend den erwarteten Bedürfnissen des Folgetages, eingesetzt werden und somit die Ergebnisse optimieren.

Variation des Photovoltaik-Standorts

Während energetisch davon gesprochen werden kann, dass die PV-Erzeugung dem Ladebedarf in Summe entspricht, kann in der Leistungsbetrachtung die vollständige Deckung des Bedarfs nicht gleichzeitig zum PV-Dargebot erfolgen. Zusätzlich spielt die Standortverteilung der Photovoltaikerzeugung eine wichtige Rolle. Aufgrund der angewendeten Rahmenbedingung, dass eine örtliche Kopplung der Erzeugung und des Ladebedarfs vorliegen muss, zeigt sich bei Variation des Standort-Verhältnisses ein interessanter Zusammenhang. Ist entweder Zuhause oder der Arbeitsplatz mit der erneuerbaren Anlage ausgestattet, können nur deutlich geringere Werte für Deckungsgrad und Integrationsgrad erzielt werden, als wenn eine Kombination beider Standorte für PV-Erzeugung und Laden herangezogen wird.

Überraschend ist, dass ein PV-Ausbau rein am Arbeitsplatz nicht signifikant bessere Werte liefert als nur der Standort „Zuhause“. Beim Vergleich mit den Verkehrsdaten erkennt man, dass die teilweise frühe Rückkehrrate der Fahrzeuge nach Hause dafür verantwortlich ist, sodass auch am Standort „Zuhause“ Sonnenstunden ins Gewicht fallen. Ein Maximum stellt sich etwa bei einer energetischen Aufteilung von je 50 % ein.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Forschungsprojekts „Smart Electric Mobility“ (SEM) wurde mithilfe einer dreiwöchigen GPS-Langzeiterhebung von Pkw-Fahrten ein Mobilitätsdatensatz von über 30 Pkw verschiedener Fahrzeugklassen im Bereich des motorisierten Individualverkehrs generiert. Basierend auf diesem konnten einerseits wertvolle Aussagen zum Thema Mobilitätsverhalten und -erfüllung und andererseits, aus Sicht des Energiesystems, wichtige Erkenntnisse zum ungesteuerten und PV-orientierten Ladeverhalten der Elektrofahrzeuge gewonnen werden.

Die Sensitivitätsanalysen der Einflussgrößen (Batteriegröße, Ladeleistung und Ladeinfrastruktur, etc.) sowie die darauf aufbauenden Erfüllbarkeitsanalysen ergeben deutlich den Zielbereich reiner Elektroautos in den Fahrzeugklassen Kleinwagen und Mittelklasse. Es resultierten daraus die zukünftigen Ladeinfrastrukturerefordernisse, die zum überwiegenden Teil mit heute üblichen Anschlussleistungen von 3,7 kW (Normalladen) und an den zeitlich und energetisch relevanten Standorten „Zuhause“ und „Arbeitsplatz/Ausbildung“ technisch realisierbar sind. Wird Photovoltaik zum Laden von E-Fahrzeugen an den beiden Standorten installiert und direkt genutzt, können Deckungsraten von über 70 % erzielt werden, ohne die alltägliche Mobilität zu gefährden. Wichtigstes Kriterium bei der Erfüllbarkeit ist die Batteriegröße.

Die Untersuchung der Fahrtlängen zeigt, dass 95 % der gemessenen Fahrten kleiner als 50 km ausfallen, jedoch fast ein Viertel aller Fahrzeuge zumindest an einem Tag des Betrachtungszeitraums einen Weg von mehr als 150 km absolviert.

Diese langen Wege und Wegketten sind vor allem Freizeitfahrten, die zumeist am Wochenende auftreten und enorme Batteriegrößen oder Alternativen zum Normalladen erfordern. Hierfür wurden einige Konzepte wie Schnellladung (> 100 kW) und Wegsubstitution durch-exerziert. Schnellladung, durchgeführt während einer Fahrtunterbrechung, kann vorwiegend auf mittleren Distanzen bis derzeit 200 km eine komfortable Option darstellen und die Reichweite erhöhen. Sehr lange Distanzen werden auch mit Schnellladung keine Sinnhaftigkeit erfahren, da die Leistungsaufnahme wie auch die Batteriekapazität beschränkt sind und somit die erforderliche Stehdauer zum Schnellladen proportional ansteigt.

Zukünftig sollen diese Aussagen des motorisierten Individualverkehrs auch auf eine Sonderform der Elektromobilität und des öffentlichen Personen-Nahverkehrs, nämlich dem Elektro-Taxi erweitert werden. Diesbezüglich wird das Forschungsprojekt „ZENEM – Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität“ im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ durchgeführt und ebenfalls aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert.

8. Literatur

- [1] Leitinger, C., Litzlbauer, M., Schuster, A., et al.: Smart Electric Mobility – Speichereinsatz für regenerative elektrische Mobilität und Netzstabilität, FFG-Forschungsprojekt, NE2020, 2. AS, Projektnummer: 821886, Endbericht, Wien 2011.
- [2] Leitinger, C.: Netzintegration von solarer elektrischer Mobilität – Auswirkungen auf das elektrische Energiesystem, Dissertation, TU Wien 2011.
- [3] Leitinger, C.: Smart Electric Mobility – Speichereinsatz für regenerative Elektrische Mobilität und Netzstabilität, Symposium Energieinnovation, TU Graz 2010.
- [4] Leitinger, C.: Smart Electric Mobility - Algorithmen zur Netzintegration von Elektrofahrzeugen, ComForEn 2010 - Kommunikation für Energienetz der Zukunft, Wels 2010.
- [5] Leitinger, C., Litzlbauer, M.: Netzintegration und Ladestrategien der Elektromobilität, e&i 128, H. 1–2: 10–15, Wien 2011
- [6] Leitinger, C.: Optimierte Ladeprozesse der Elektromobilität für die Integration erneuerbaren Energieträger, IEWT Internationale Energiewirtschaftstagung, TU Wien 2011.
- [7] Herry, M., Steinacher, I., Tomschy, R.: Mobilität in NÖ – Ergebnisse der landesweiten Mobilitätsbefragung 2008, Ergebnisbericht, Amt der NÖ Landesregierung, Wien 2008.
- [8] Statistik Austria: Energiestatistik: Strom- und Gasverbrauch 2008, http://www.statistik.at/web_de/static/jahresstromverbrauch_2008_035456.pdf (21. Dez. 2011)
- [9] Kathan, J., Stifter, M.: Increasing BIPV self-consumption through electrical storage – feasible demand-coverage and dimensioning of the storage system, 5th International Renewable Energy Storage Conference IRES 2010, Berlin 2010