

Langstreckenelektromobilität in Ballungsräumen

Philip Dost, Philipp Spichartz, Constantinos Sourkounis

Ruhr-Universität Bochum – Institut für Energiesystemtechnik und Leistungsmechanik,
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum, +49 (234) 32 - 25397, dost@enesys.rub.de,
<http://www.enesys.ruhr-uni-bochum.de>

Kurzfassung: In dieser Veröffentlichung werden Ergebnisse eines Feldtests in der Metropolregion Ruhrgebiet, an dem 500 Testfahrer teilnahmen, hinsichtlich der Fahr- und Ladegewohnheiten von Langstreckenpendlern präsentiert. Die Pendler haben Elektrofahrzeuge (EVs) für jeweils mindestens eine Woche in ihren Alltag integriert und dabei die Konzepte Schnellladung und Range-Extender in aufeinanderfolgenden Wochen genutzt und gegenübergestellt. Unterschiede im Nutzerverhalten im Hinblick auf Fahrstrecken, Energieverbrauch sowie Ladeverhalten werden präsentiert und diskutiert.

Keywords: Batteriefahrzeug, Elektromobilität, Energieeffizienz, Flottentest, Nutzerverhalten, Pendler, Range-Extender, Schnellladung

1 Einleitung

Der Individualverkehr mit PKWs stellt einen Mobilitätssektor mit sehr hohen Treibhausgasemissionen dar. Im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien gelten Elektrofahrzeuge als ein Schlüsselement zur Reduzierung der Emissionen, jedoch sind die Reichweite und der Preis oft genannte Argumente gegen den Kauf von Elektrofahrzeugen [1].

Bei der Erarbeitung von Lösungen zur Steigerung der Akzeptanz konzentrieren sich die meisten Studien zur Elektromobilität auf den Durchschnittsfahrer. Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung liegt in Deutschland für PKW bei 14200 km [2] und in Österreich für Privatanutzer bei 13100 km [3]. Für 80 % der PKW-Nutzer in Deutschland beträgt die durchschnittliche tägliche Strecke weniger als 50 km (Abbildung 1) [4] und in Österreich ist die mittlere Tagesfahrleistung 36 km [5], d.h. bei heute üblichen Elektrofahrzeugen würde eine zweite Aufladung innerhalb eines Tages in der Regel nicht benötigt. In den Projekten AMPERE [6] und CROME [7][8] wurden auf Basis von Feldtests das Nutzerverhalten und der Reichweitenbedarf von Privatpersonen bzw. Unternehmen analysiert, mit dem Ziel, die Batteriekapazität und damit den Verkaufspreis möglichst verkleinern zu können.

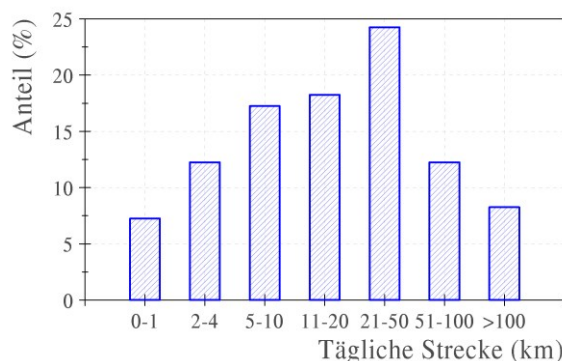


Abbildung 1 Klassierung der durchschnittlichen Tagesfahrleistung mit PKW in Deutschland 2002 [4]

Sowohl in ökologischer [9] als auch für Nutzer in finanzieller Hinsicht [10] sind Elektrofahrzeuge jedoch vor allem bei hohen Fahrleistungen sinnvoll. In dem vom deutschen Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur geförderten Projekt „Langstrecken-

Elektromobilität“ wurde die Alltagstauglichkeit der Elektromobilität für Langstreckenfahrer, die höhere Emissionseinsparpotentiale vorweisen, untersucht. Lang- und Mittelstreckenpendler, die täglich Strecken von circa 80 km bis 200 km [11] erreichen, waren die Hauptnutzergruppe. Ein Auszug der Ergebnisse wird nachfolgend vorgestellt.

2 Projektüberblick „Langstrecken-Elektromobilität“

Das Projekt Langstrecken-Elektromobilität fußte auf drei Säulen der Reichweitenverlängerung: Energieeffizienz, Schnellladung und Range-Extender. Reine Batteriefahrzeuge mit Schnellademöglichkeit (BEVs, engl.: Battery Electric Vehicle) sowie Elektrofahrzeuge mit zusätzlichem Verbrennungsmotor, der bei niedrigem Ladezustand der Batterie einen Generator antreibt, (EREVs, engl.: extended range electric vehicle) wurden mit Unterstützung der Projektpartner DELPHI Deutschland GmbH und Adam Opel AG mit Messtechnik zur Erfassung von Fahrdaten und Energieflüssen mit bis zu 62,5 Hz ausgestattet und im Rahmen eines Feldtests miteinander verglichen (Abbildung 2). Dabei wurden insgesamt 785.000 km durch 500 Testfahrer, zum gleichen Teil Männer und Frauen, zurückgelegt. Die



Abbildung 2 Projektfahrzeugtypen: EREV Opel Ampera (links) und BEV Mitsubishi i-MiEV (rechts) [12]

Testfahrer wurden dabei unter Berücksichtigung eines weit gestreuten sozioökonomischen Hintergrunds ausgewählt. Deutlich wird, dass mit den EREVs weitere Entfernungen bis in Nachbarländer zurückgelegt wurden. Aufgrund des eingeschränkten Schnellladenetzes waren große Entfernungen mit den BEVs nur zwischen Hamburg und dem Ruhrgebiet möglich (Abbildung 3).

Die Fahrzeuge wurden zum einen von Unternehmen eingesetzt und zum anderen wochenweise Privatnutzern mit Schwerpunkt Pendler zur Verfügung gestellt. Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf die Privatnutzer. Diese konnten aufeinanderfolgend beide

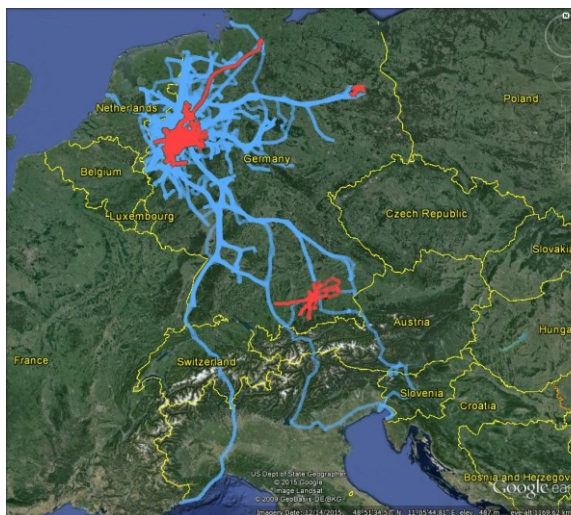


Abbildung 3 Mit EREVs (blau) und BEVs (rot) während der Versuchsphase zurückgelegte Fahrstrecken in Europa [13] (Karte: Google, Inc. „Google earth“)

Fahrzeugtypen für jeweils eine Woche nutzen, was zu einer ähnlichen Verteilung der gefahrenen Streckenlängen mit BEVs und EREVs führte (Abbildung 4).

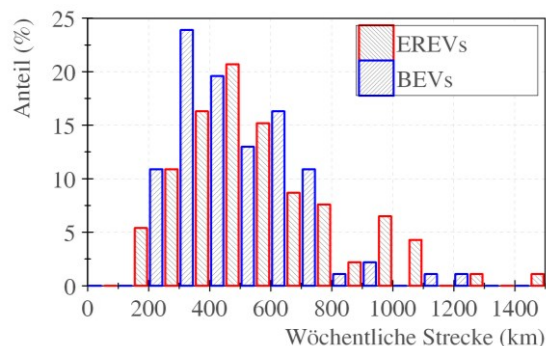


Abbildung 4 Gegenüberstellung der Verteilungen der wöchentlich gefahrenen Strecken mit EREVs und BEVs (Klassenbreite 100 km) [12]

3 Nutzung von Elektrofahrzeugen im Langstreckeneinsatz

Im Folgenden werden ermittelte Charakteristika der Elektrofahrzeugnutzung durch Mittel- und Langstreckenpendler hinsichtlich täglicher Fahrstrecken, Geschwindigkeitsprofile und Energieverbräuche präsentiert. Diese Daten können Herstellern zur Dimensionierung zukünftiger Fahrzeugentwicklungen dienen. Ein Beispiel ist die Traktionsbatterie, bei der ein Kompromiss zwischen den diametralen Faktoren Reichweite und Kosten, und damit zwei Hauptkritikpunkten seitens der Kunden, gefunden werden muss.

3.1 Tägliche Fahrstrecken

Die typische elektrische Reichweite der Fahrzeuge im Projekt lag abhängig von verschiedenen Einflüssen, die im Folgenden näher betrachtet werden, zwischen 80 km und 130 km für die BEVs sowie zwischen 40 km und 80 km für die EREVs.

Neben den typischen Pendelstrecken der Zielgruppe zwischen 20 km und 70 km wurden BEVs häufig für kürzere Strecken eingesetzt. Über den Tag summierten sich diese Strecken häufig so, dass die einfache Reichweite des Fahrzeugs überschritten wurde (Abbildung 5 a). Fast 50 % der gefahrenen Gesamtaufleistung ging auf Tagesstrecken mit mehr als 80 km zurück (Abbildung 6 a). Dies zeigt den generellen Bedarf nach einer umfassenden Ladeinfrastruktur auf und verdeutlicht die Relevanz und Chancen der Schnellladung, insbesondere für Pendler ohne Lademöglichkeit zu Hause oder am Arbeitsplatz.

Bei den Verteilungen der EREVs werden neben der Gesamttagesstrecke, die auch Fahrten mit Range-Extender einbezieht, zusätzlich rein elektrisch zurückgelegte Tagesstrecken betrachtet. Durch die Gesamtreichweite der EREVs von mehr als 500 km kann davon ausgegangen werden, dass die Verteilung der Gesamttagesstrecken den Bedarf der Pendler hinsichtlich der Nutzung eines Erstfahrzeugs wiedergibt. Nur etwa 40 % der täglichen Fahrstrecken waren kürzer als 50 km (Abbildung 6 b). Mit einer Tagesreichweite von etwa 300 km könnte der Großteil der Strecken abgedeckt werden (Abbildung 5 b, Abbildung 6 b). Unter der Voraussetzung einer gut ausgebauten Ladeinfrastruktur bräuchte ein BEV mit Schnellladefunktion somit eine zuverlässige Reichweite von ungefähr 170 km, um für die genannte Zielgruppe eine Fahrzeugalternative darzustellen.

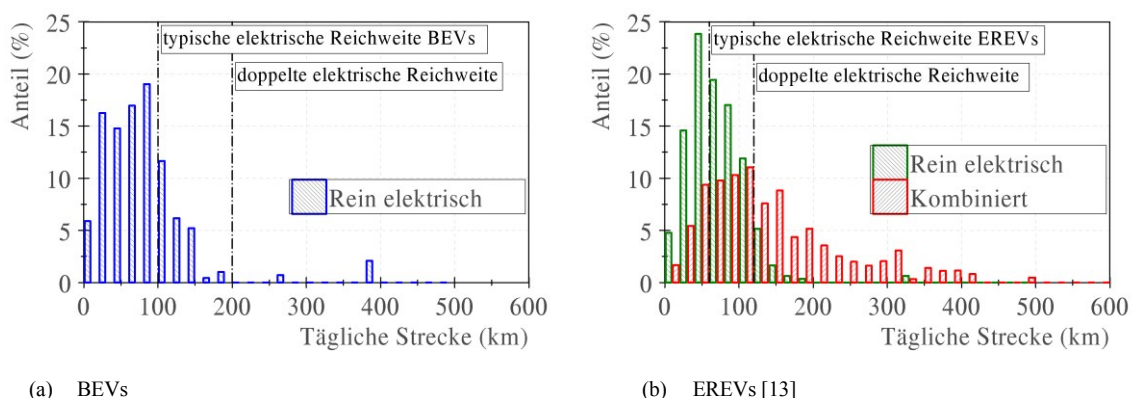


Abbildung 5 Verteilung der gefahrenen Tagesstrecken (Klassenbreite 20 km) normiert auf die Gesamtstreckenlänge

Die rein elektrischen Tagesstrecken von teilweise mehr als 100 km zeigen, dass auch bei den EREVs zum Teil zwei Ladungen pro Tag durchgeführt wurden. Für Privatanutzer steht

während der Arbeitszeit häufig eine lange Stand- und damit potenzielle Ladezeit zur Verfügung, eine entsprechende Infrastruktur vorausgesetzt.

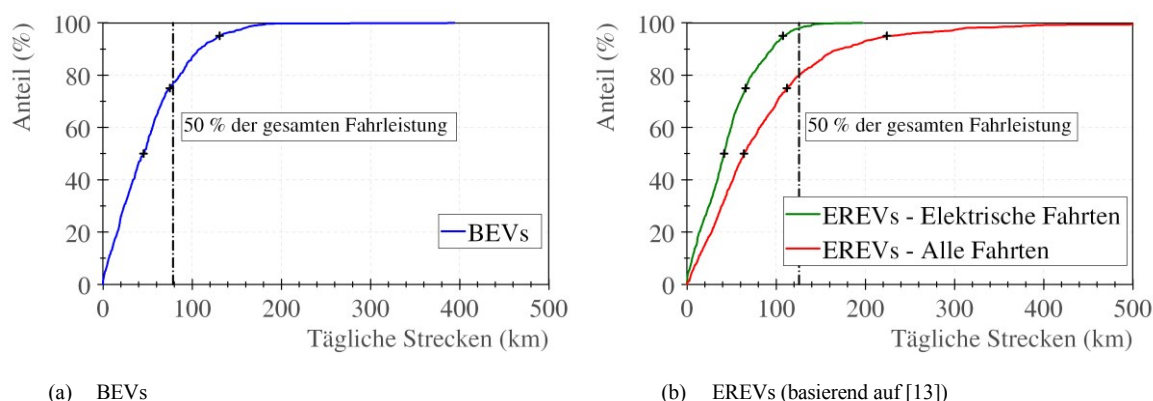


Abbildung 6 Kumulierte Anzahl täglicher Fahrstrecken

Der überdurchschnittlich hohe Reichweitenbedarf wird auch an den jährlich erreichten Fahrleistungen der eingesetzten BEVs und EREVs von etwa 19.600 km bzw. 28.000 km deutlich (Tabelle 1). Trotz der teilweisen zweiten Ladung mit den EREVs im Tagesverlauf, waren die rein elektrische Nutzung und diejenige mit Range-Extender in Bezug auf die Kilometerleistung nahezu ausgeglichen, wodurch ein relativ hoher Benzinverbrauch in Bezug auf die Gesamtfahrstrecke resultierte. Im Gegensatz dazu wurde in einer anderen Studie [6] mit anderer Zielgruppe ein rein elektrischer Anteil von 86 % erreicht.

Tabelle 1. Durchschnittliche jährlich gefahrene Strecken und Energie- sowie Benzinverbräuche (basierend auf [14])

| | BEVs | EREVs |
|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Gesamtstrecke | 19.586 km | 28.018 km |
| - davon elektrisch gefahren | 19.586 km | 14.861 km (53 %) |
| Elektrischer Energieverbrauch vor dem Ladegerät | 2.903 kWh (14,8 kWh/100 km) | 3.210 kWh (21,6 kWh/100 km) |
| Benzinverbrauch (im Range-Extender-Betrieb) | - | 937 l (7,1 l/100 km) |

3.2 Fahrzeuggeschwindigkeiten

Der bei EREVs gegenüber BEVs höhere elektrische Energieverbrauch ist zum einen auf die höhere Fahrzeugmasse zurückzuführen, zum anderen auf die höheren Leistungsdaten der EREVs, wie z.B. die Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h gegenüber 130 km/h bei den BEVs. Wie in Abbildung 7 dargestellt, führte dies zu mehr Fahrten mit hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten. Dieser Unterschied wurde zusätzlich durch den Range-Extender verstärkt. Während bei den EREVs die Durchschnittsgeschwindigkeit mit steigender Streckenlänge im Mittel kontinuierlich anstieg, sank bei BEVs die Geschwindigkeit nach einem Maximum bei ungefähr 70 km wieder ab (Abbildung 8). Bei längeren Strecken neigten die BEV-Nutzer dazu bzw. waren sie gezwungen, langsamer zu fahren, um den Energieverbrauch zu reduzieren und somit das Ziel sicher zu erreichen. Darüber hinaus spielte die „Reichweitenangst“ bei der Nutzung von komfortbetreffenden Nebenverbrauchern auch eine Rolle, wie im folgenden Kapitel 4 dargelegt wird.

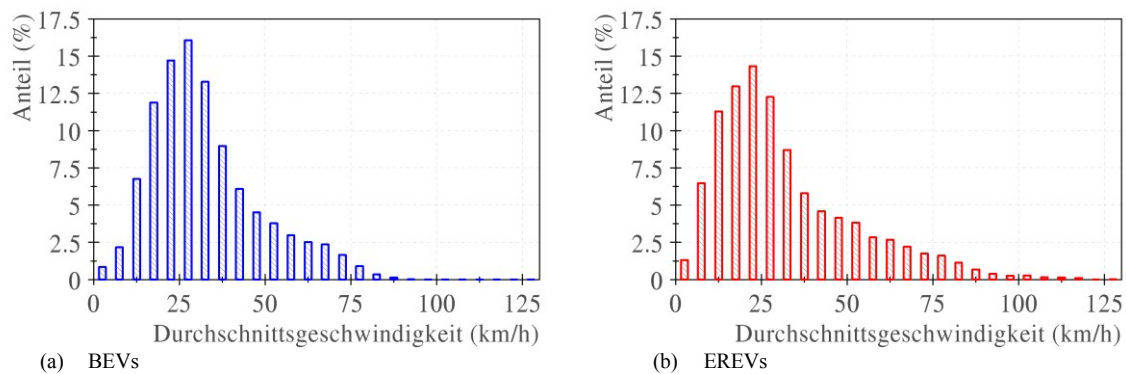


Abbildung 7 Verteilung der Durchschnittsgeschwindigkeiten von Einzelfahrten (Klassenbreite: 5 km/h) [14]

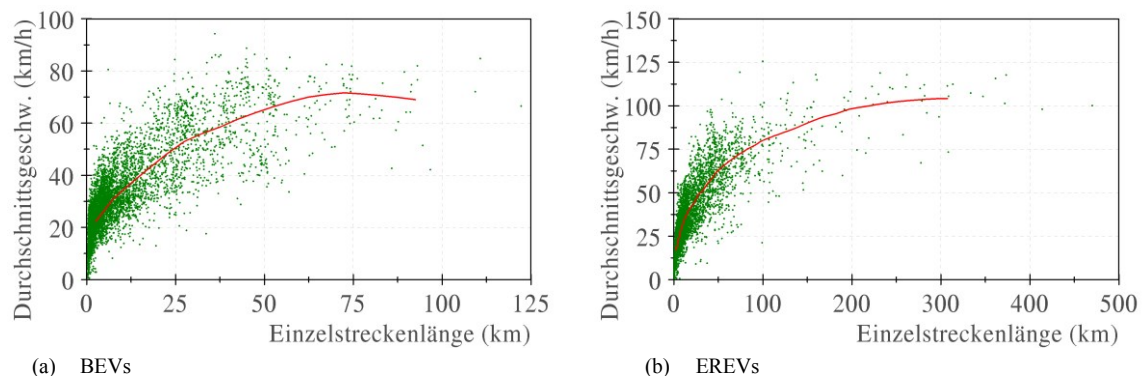


Abbildung 8 Durchschnittsgeschwindigkeit der Einzelfahrten aufgetragen über die zugehörige Streckenlänge (Punkte: Einzelfahrten, Linien: Trendlinie der Durchschnittswerte) [14]

4 Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch

4.1 Einfluss der Streckenlänge

Für die folgenden Ergebnisse wurden nur rein elektrisch zurückgelegte Fahrstrecken berücksichtigt, die im Bereich von 0 km bis 90 km für die EREVs und von 0 km bis 125 km für die BEVs lagen. In den folgenden Graphiken repräsentieren Punkte Ergebnisse einzelner Fahrten und durchgezogene Linien den zugehörigen Durchschnittswert.

In Abbildung 9 ist der spezifische Gesamtenergieverbrauch für beide Fahrzeugtypen über die gefahrenen Streckenlängen aufgetragen. Es können drei Abschnitte unterschieden werden. Im Bereich von 10 km bis 80 km langen Strecken bei BEVs bzw. 60 km bei EREVs war der mittlere Verbrauch gleichbleibend bei ca. 130 Wh/km bzw. 200 Wh/km. Bei längeren Strecken war der spezifische Energieverbrauch tendenziell kleiner. Dieser Verbrauchsabfall ist durch die generell notwendige sparsame Fahrweise zu erklären, die notwendig war um diese Streckenlängen mit einer Batterieladung erreichen zu können. Bei Strecken unter 10 km ist dagegen einerseits ein Anstieg des gemittelten Verbrauchs mit sinkender Streckenlänge zu erkennen und zum anderen eine starke Streuung des Verbrauchs bei den Einzelfahrten. Die Streuung lässt sich in erster Linie durch monotone Streckenprofile hinsichtlich der Steigung erklären, also reine Bergauf- oder Bergabfahrten. Dieser Effekt gleicht sich auf längeren Strecken tendenziell aus. Der durchschnittlich höhere Verbrauch ist vor allem auf die Nebenaggregate zurückzuführen.

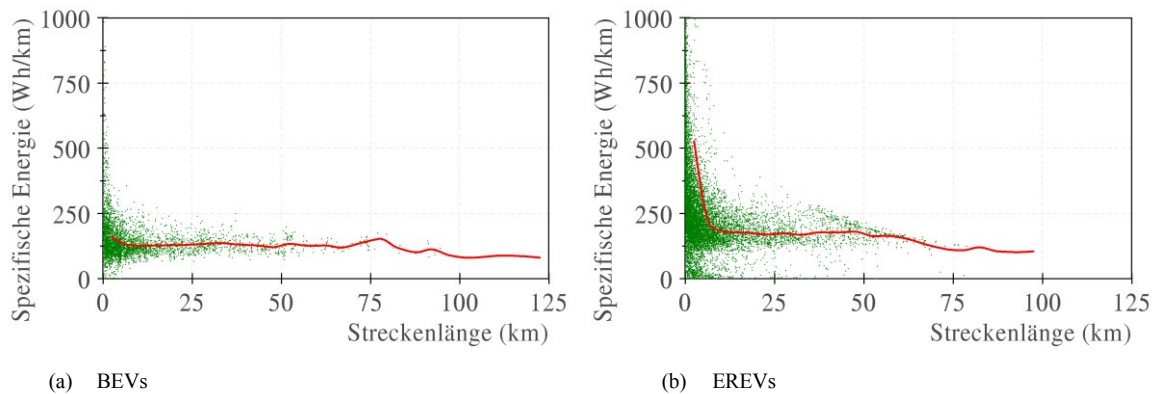


Abbildung 9 Spezifischer Gesamtenergieverbrauch im rein elektrischen Betrieb bezogen auf die gefahrene Streckenlänge (Punkte: Einzelfahrten, Linien: Durchschnittswerte) [15]

Bei kurzen Strecken ist der spezifische Verbrauch für die Klimatisierung, d.h. Klimaanlage-kompressor oder Heizung, deutlich höher als bei längeren Strecken. Beim Start ist die Abweichung der gewünschten von der tatsächlichen Temperatur im Fahrzeug am größten. Bis die gewünschte Innentemperatur erreicht ist, wird für die Klimatisierung eine hohe Leistung aufgewendet. Anschließend verringert sich diese Leistung, so dass der spezifische Energiebedarf für längere Strecken immer weiter abnimmt. Bei den EREVs war der Effekt insgesamt größer als bei den BEVs, obwohl die maximal verfügbare Heizleistung bei beiden Fahrzeugtypen nahezu gleich und die maximale Kühlleistung des Klimaanlagekompressors der BEVs sogar größer ist. Hierfür gibt es mehrere Gründe. Zunächst bieten die im Projekt vertretenen EREVs eine Klimaautomatik an wohingegen die Klimageräte in den BEVs manuell eingeschaltet werden müssen. Mit dem Bewusstsein, dass die Nutzung der Klimageräte bei BEVs direkten Einfluss auf die Reichweite hat, nahmen die Nutzer teilweise Komforteinbußen in Kauf und verzichteten auf die Klimatisierung. Ein weiterer Faktor ist die fahrzeuggesteuerte Klimatisierung der Traktionsbatterie, die bei den BEVs nur bei hohen Temperaturen zur Kühlung einsetzt, um Schädigungen vorzubeugen. Die Batterie der EREVs wird über einen weiten Temperaturbereich klimatisiert, also auch bei kühlen Temperaturen geheizt. Auch bei den 12-V-Nebenaggregaten wurde bei beiden Fahrzeugtypen für kleinere Strecken ein höherer spezifischer Verbrauch festgestellt. Gründe sind u.a., dass zu Beginn einer Fahrt die 12-V-Batterie nach vorheriger Ruhephase mit Selbstentladung verstärkt geladen werden muss und die Lüfter für die Klimatisierung intensiv genutzt werden.

4.2 Temperatureinfluss

Aufgrund der zuvor dargelegten Einflüsse bei kurzen Strecken werden im Folgenden für die Untersuchung wetterbedingter Faktoren auf den Verbrauch nur rein elektrische Fahrten mit einer Mindestlänge von 2 km berücksichtigt. Die spezifischen Energieverbräuche aller Fahrten während eines Jahres und die dabei jeweils am Fahrzeug vorherrschende mittlere Temperatur sind kalendarisch in Abbildung 10 aufgetragen. Jeder rote Punkt zeigt die mittlere Temperatur für eine Fahrt, der dazugehörige spezifische Energieverbrauch wird von einem grünen Punkt dargestellt. Der durchschnittliche spezifische Gesamtenergieverbrauch im Winter bei Temperaturen zwischen 0 °C und 10 °C war bei beiden Fahrzeugtypen teilweise mehr als 50 % höher als im Sommer bei Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C.

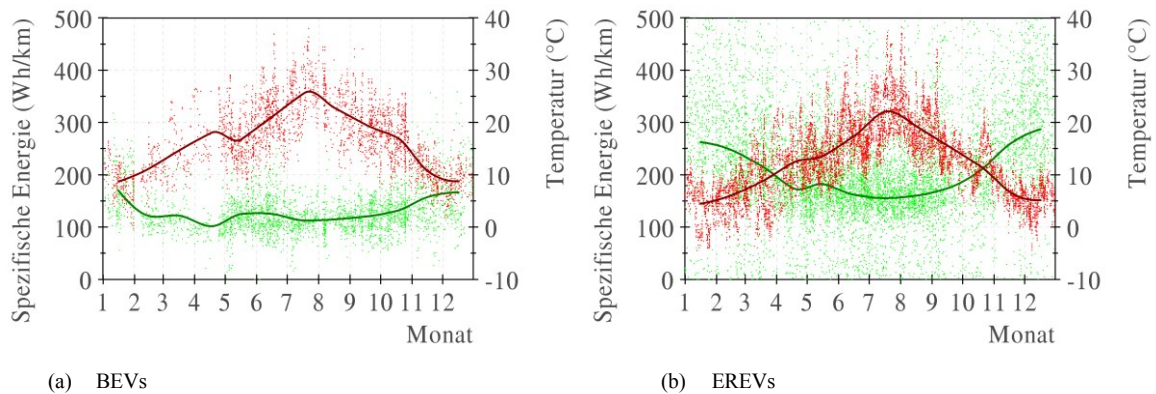


Abbildung 10 Spezifischer Gesamtenergieverbrauch (grün) mit der jeweils zugehörigen Außentemperatur (rot) im Jahresverlauf (Punkte: Einzelfahrten, Linien: Durchschnittswerte) [15]

Ein wesentlicher Faktor sind auch hier die Nebenverbraucher. Die Klimatisierung der EREVs beansprucht den höchsten Energieverbrauch bei niedrigen Temperaturen und sinkt auf ein Minimum bei etwa 18 °C (Abbildung 11 b). Für höhere Temperaturen steigt der Verbrauch wieder an. Die BEVs zeigen die eine ähnliche Tendenz. Jedoch liegt der höchste Verbrauch bei niedrigen Temperaturen deutlich unter dem der EREVs und sinkt auf bis zu 1 Wh/km bei 28 °C (Abbildung 11 a). Der erneute Anstieg bei höheren Temperaturen fällt ebenfalls kleiner aus als bei den EREVs. Es ist eine Häufung der Einzelwerte bei sehr niedrigen Verbräuchen zu erkennen, was auf den bereits angesprochenen Verzicht auf Komfort zugunsten einer längeren Reichweite bei BEVs sowie auf den zurückhaltenderen Einsatz der Batterieklimatisierung hindeutet.

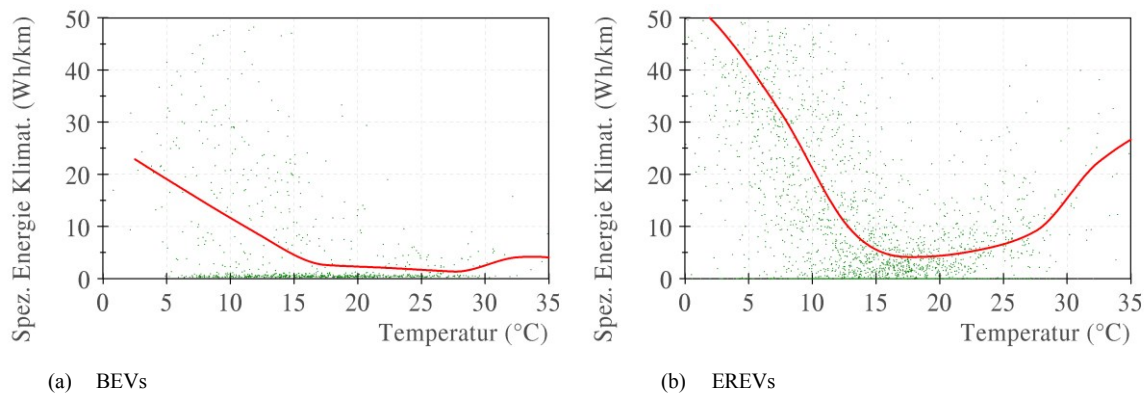


Abbildung 11 Spezifischer Energieverbrauch für die Klimatisierung (Heizung und Klimaanlage) bezogen auf die während der Fahrt gemessene Außentemperatur (Punkte: Einzelfahrten, Linien: Durchschnittswerte) [15]

Auch der Energieverbrauch der 12-V-Nebenaggregate ist bei niedrigen Temperaturen höher. Dies ist ebenfalls auf Komfortfunktionen zurückzuführen, wie z.B. die Sitzheizung und Lüftung aber auch auf sicherheitsrelevante Funktionen, wie Heckscheibenheizung und Licht. Das Fahrlicht muss an kalten Wintertagen mit kürzeren Tageslichtzeiten tendenziell länger genutzt werden.

5 Ladeverhalten

Neben den Fahrstrecken spielt bei EVs das Ladeverhalten eine wichtige Rolle. Das Fahrzeug soll möglichst immer für die nächste Fahrt verfügbar sein, jedoch muss bei zunehmender Zahl an EVs die Belastung des elektrischen Netzes berücksichtigt werden. Entweder muss die Netzinfrastuktur besonders leistungsfähig ausgebaut sein, oder aber die Ladeverfahren müssen intelligenter gestaltet werden. Im Folgenden werden das Ladeverhalten der Testfahrer sowie ein Ansatz zur Reduzierung der Netzbelastung in Spitzenzeiten diskutiert. Dabei werden Freitage von den Bewertungen größtenteils ausgenommen, da an diesen Tagen der Fahrzeug- und Fahrerwechsel stattfand sowie weitere Aufgaben des Fahrzeugmanagements durchgeführt wurden.

5.1 Fahrzeugnutzungs- und Ladezeiten im Tagesverlauf

Obwohl die Fahrzeuge im Projekt Langstrecken-Elektromobilität bereits eine besonders intensive Nutzung bezüglich der Reichweite erfuhren, machte diese Nutzung im Schnitt nur einen Bruchteil von 4 % bis maximal 11 % der Tageszeit aus (Tabelle 2). Das heißt, dass die EVs die meiste Zeit standen. Die Auswertung der Ladezeiten und der vorherigen oder nachfolgenden Standzeiten zeigt, dass EVs dabei mehr als die Hälfte der Zeit an oder in der Nähe eines Ladepunktes standen (Abbildung 12 und Abbildung 13). In Anbetracht der zur Projektlaufzeit noch nicht flächendeckend aufgebauten und teilweise nur eingeschränkt verfügbaren Ladeinfrastruktur ist dies ein großer Anteil, der noch weiter erhöht werden kann. Hierbei ist auffällig, dass BEVs sogar noch häufiger an einem Ladepunkt standen als EREVs. Dies lässt sich durch den fehlenden Range-Extender und die Notwendigkeit, das Fahrzeug zwingend für eine Weiterfahrt aufladen zu müssen, begründen. Nur maximal 16 % der Zeit luden die EVs dabei tatsächlich. Es blieben damit durchschnittlich 35 % bis 55 % der Zeit für ggfs. sinnvolle Verschiebungen der Ladelast übrig (Tabelle 2), worauf in Unterkapitel 5.4 weiter eingegangen wird.

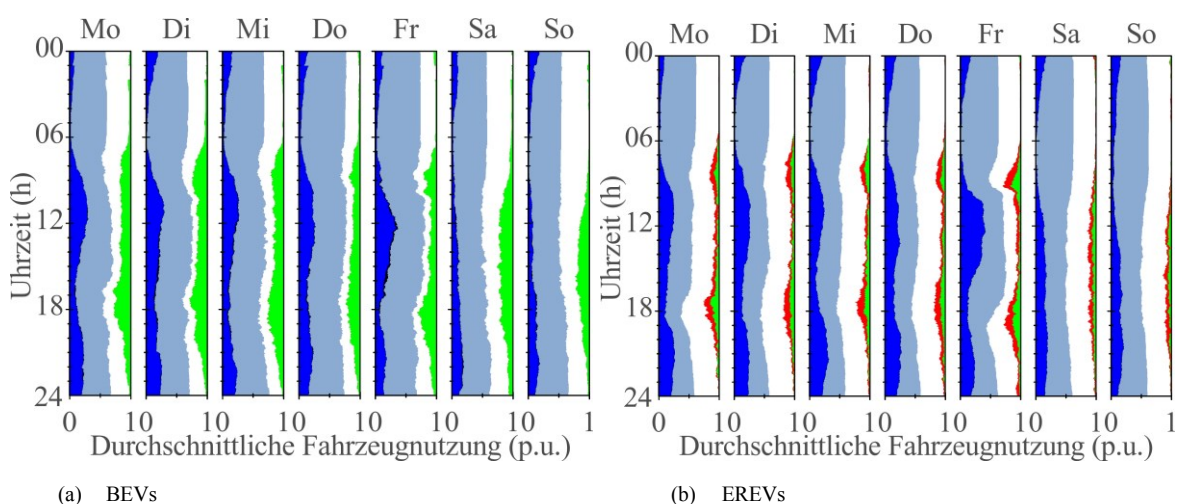
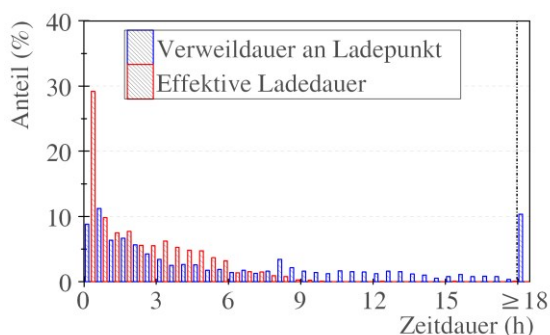


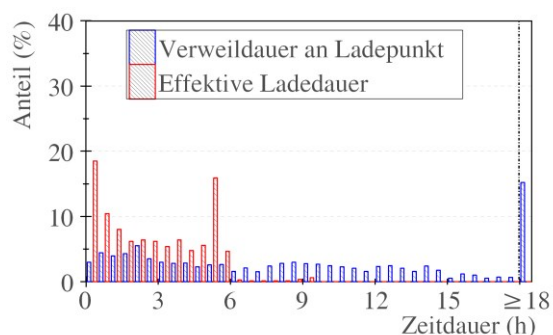
Abbildung 12 Anteil der durchschnittlichen Fahrzeugnutzung im Tagesverlauf für jeden Wochentag (blau: Ladung; schwarz: DC-Schnellladung; hellblau: stehend in der Nähe eines Ladepunktes; weiß: stehend ohne Bezug zu einem Ladepunkt; rot: Fahrt mit (anteiliger) Nutzung des Range-Extenders; grün: rein elektrische Fahrt) [16],[17]

Tabelle 2. Prozentuale durchschnittliche Fahrzeugnutzung gemittelt für Wochentage sowie Samstag und Sonntag für EREVs (E) und BEVs (B) (basierend auf [16])

| | | Normalladung | DC-Schnellladung | Standzeit ohne Ladung | Standzeit gesamt an Ladepunkt | Standzeit ohne Ladepunkt | Fahrt mit Benzinverbrauch | Fahrt rein elektrisch | Gesamtfahrt |
|---------|---|--------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------|
| Mo - Do | E | 16,0 % | n/a | 38,8 % | 54,8 % | 38,9 % | 3,6 % | 2,8 % | 6,4 % |
| | B | 15,4 % | 0,4 % | 53,0 % | 68,8 % | 20,2 % | n/a | 11,0 % | 11,0 % |
| Sa | E | 11,9 % | n/a | 45,5 % | 57,4 % | 37,1 % | 2,9 % | 2,6 % | 5,5 % |
| | B | 9,5 % | 0,3 % | 47,7 % | 57,5 % | 31,6 % | n/a | 10,9 % | 10,9 % |
| So | E | 12,1 % | n/a | 45,4 % | 57,5 % | 38,5 % | 2,3 % | 1,7 % | 4,0 % |
| | B | 8,3 % | 0,2 % | 49,1 % | 57,6 % | 35% | n/a | 7,4 % | 7,4 % |



(a) BEVs

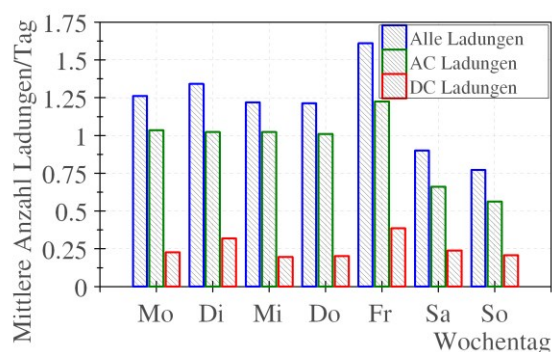


(b) EREVs

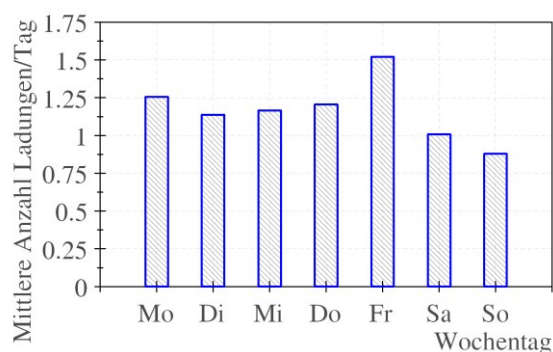
Abbildung 13 Gemessene Verteilung der Ladezeiten und der Standzeiten nahe eines Ladepunktes [17]

5.2 Ladehäufigkeit

Die meisten Ladevorgänge verteilen sich wochentags vorrangig auf zwei Zeitfenster. In der Regel werden EVs entweder tagsüber zwischen 8 Uhr und 14 Uhr während der Arbeitszeit geladen oder nach Feierabend zwischen 19 Uhr und 1 Uhr morgens. Nicht immer haben die Testfahrer aber zwei Ladevorgänge durchgeführt, sondern vielmehr die eine oder die andere Möglichkeit genutzt. Hervorzuheben ist dabei, dass überdurchschnittlich viele Testfahrer täglich die Möglichkeit hatten, während der Arbeitszeit zu laden, was auf Kulanz der Arbeitgeber zurückzuführen ist, die zum Teil für die Testphase vorübergehende Lademöglichkeiten boten. Eine einfache Ladung pro Tag reichte jedoch für die Fahrstrecken im Schnitt nicht aus, so dass die Reichweite zum Beispiel durch Nutzung einer Schnellladung ergänzt werden musste (Abbildung 14).



(a) BEVs



(b) EREVs

Abbildung 14 Durchschnittliche Anzahl durchgeführter Ladevorgänge an jedem Wochentag während der Projektphase [16]

5.3 Kapazitätsausnutzung der Fahrzeugbatterie

Durch die beiden unterschiedlichen Eigenschaften der Reichweitenverlängerung bei BEVs und EREVs ergab sich ein unterschiedliches Ladeverhalten. So war die Häufigkeit der Batterieladezustände (SoC engl: State of Charge) zu Beginn von Ladevorgängen bei BEVs breit verteilt und zu niedrigen SoC-Werten hin abnehmend (Abbildung 15). Dies ist kennzeichnend, da Ladepunkte in der Regel nicht genau bei vollständig entladener Batterie zu erreichen sind bzw. erreicht werden. Dem entgegen steht das Verhalten bei EREVs. Hier fand die Mehrheit der Ladevorgänge bei einer vollständig entladenen Batterie statt (Abbildung 16). Dies wird auch anhand der in Abbildung 17 dargestellten Strecke zwischen zwei Aufladungen deutlich. Die Zielgruppe der Langstreckenpendler benötigte oftmals mehr Reichweite als elektrisch verfügbar war. Möglich war dies grundsätzlich nur, weil nach der vollständigen Entladung das Weiterfahren durch den integrierten Verbrennungsmotor gewährleistet war.

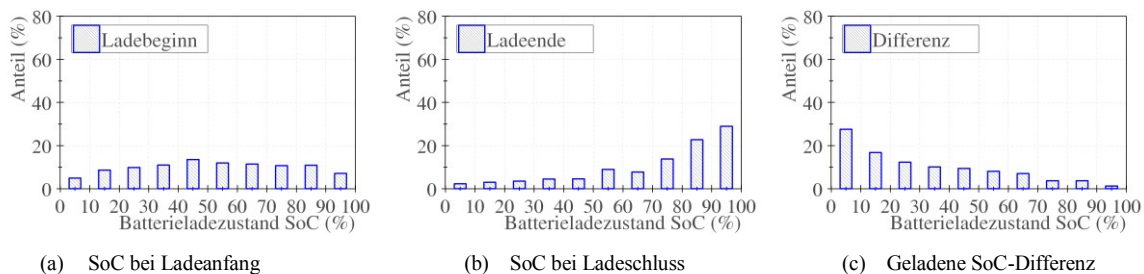


Abbildung 15 Verteilung der SoC-Level bei BEVs [16]

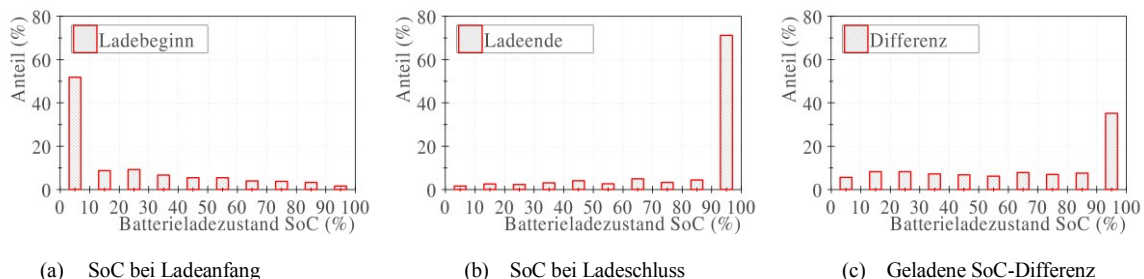


Abbildung 16 Verteilung der SoC-Level bei EREVs [16]

Während die Batterie bei EREVs nach Beendigung des Ladevorgangs in der Regel vollständig geladen war, gab es bei BEVs auch zahlreiche Ladevorgänge, die bereits bei geringeren SoC-Werten beendet wurden. Dies liegt mitunter an den Schnellladevorgängen, die bei den BEVs im Projekt in der ersten Stufe automatisch bei 82 % des SoC beendet werden.

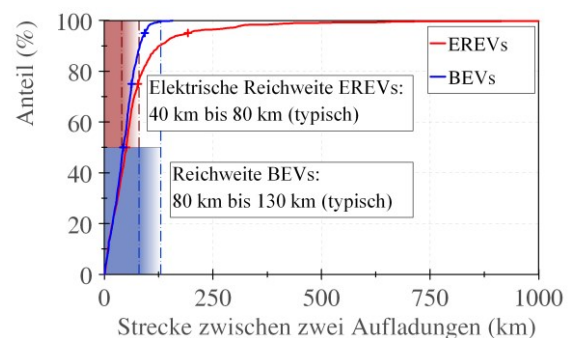


Abbildung 17 Akkumulation der Fahrstrecken zwischen zwei Ladeprozessen (markiert sind die charakteristischen Werte bei 50 %, 75 % und 95 %)

5.4 Lastverschiebungspotenziale

Unregelt (SL) werden Ladevorgänge unmittelbar nach Anschluss von EVs an einen Ladepunkt mit maximaler Leistung gestartet und nehmen gegen Ende mit zunehmendem SoC an Ladeleistung ab. Dies wird auch an den gemittelten Tageslastkurven der Ladevorgänge deutlich (Abbildung 18). Eine leichte Verbesserung bringt bereits die Verteilung der Ladeenergie auf die gesamte Anschlusszeit (LV1), was durch vorherige Angabe der Abfahrtszeit möglich würde. Mit dieser Angabe und dem Austausch dieser Informationen zwischen den EVs (LV2) würde bereits ein sehr gleichmäßiger Lastverlauf über den Tag hinweg erreicht. Bei zusätzlicher Vorhersage täglicher Routinen (LV3) würde dieser nochmals leicht verbessert. Einzig die kurzfristigen energiereichen Schnellladevorgänge der BEVs könnten mit dieser Methode nicht vollständig geglättet werden. Selbstverständlich wäre es bei der Lastverschiebung auch möglich, andere Ziellastkurven vorzuziehen, z.B. zur besseren Einbindung regenerativer Energien.

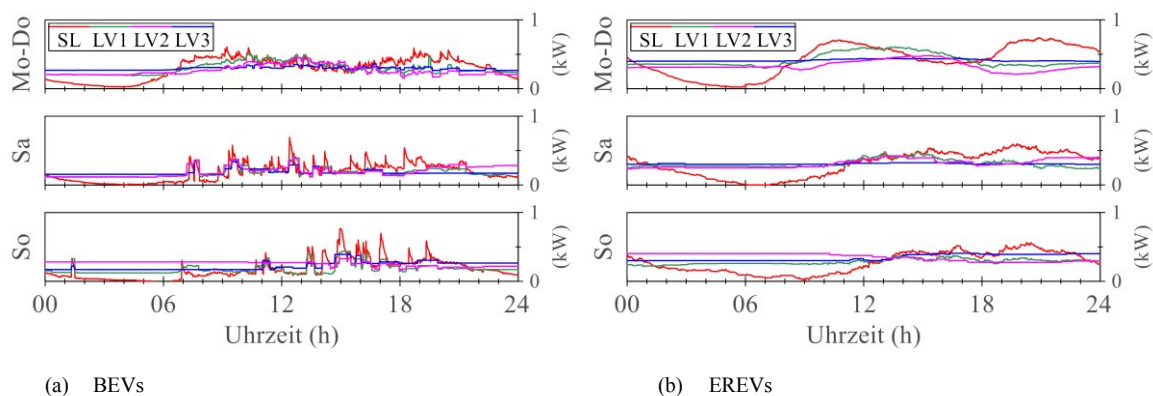


Abbildung 18 Durchschnittlich entstehende Ladelast je Fahrzeug bei Standardladung (SL) und drei verschiedenen Lastverschiebungsmethoden (LV1 bis LV3) [17]

Bei Lastverschiebungen und -glättungen ist zu berücksichtigen, dass Ladegeräte in der Regel im Teillastbereich bei reduzierten Ladeleistungen mit einer geringeren Effizienz arbeiten als im Nennbetrieb (Abbildung 19). Auch die Unterbrechung und spätere Weiterführung von Ladevorgängen kann zu zusätzlichen Verlusten durch eine ggfs. notwendige intensivere Nutzung der Temperierung des Batteriesystems führen. Insbesondere bei breiter Nutzung der Elektromobilität müssen nicht zwangsläufig schlechtere Ergebnisse erzielt werden, wenn diese Faktoren in den Lastverschiebungsmethoden beachtet würden.

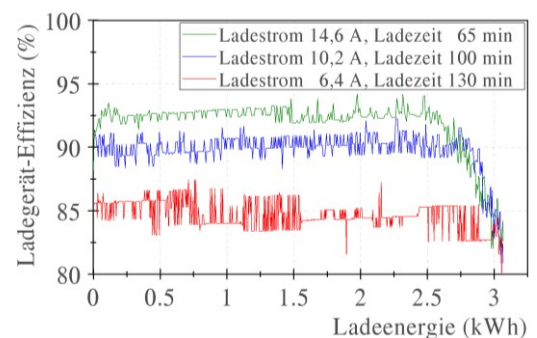


Abbildung 19 Wirkungsgrad eines EV-Ladegerätes bei verschiedenen Ladeströmen

6 Fazit

Die Reichweite von EVs ist entscheidend für den Nutzungsgrad der Fahrzeuge. Trotz noch bestehender Verbesserungspotentiale bei den Fahrzeugen und der Infrastruktur konnten im Projekt bereits Langstreckennutzer die EVs vollständig in ihren Alltag integrieren. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass eine entstehende zusätzliche Belastung des elektrischen Netzes durch Lastverschiebungsmethoden verteilt und damit gering gehalten werden kann.

- [1] Spichartz, P.; Schael, M.; Ni, B.; Broy, A.; Sourkounis, C., "Fleet test of electric vehicles regarding their suitability for daily use," in Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on , vol., no., pp.1396-1400, 20-22 June 2012
- [2] U. Kunert, S. Radke, B. Chlond and M. Kagerbauer, "Auto-Mobilität: Fahrleistungen steigen 2011 weiter," DIW Wochenbericht Nr. 47/2012, November 21st 2012.
- [3] Auto Revue, "Statistik: Rückgang der Pkw-Nutzung," [Online]: <http://autorevue.at/autowelt/oesterreich-pkw-kilometer>, [abgerufen: 01.12.2015]
- [4] infas, DIW, "Mobilität in Deutschland: Ergebnisbericht", [Mobility in Germany: Evaluation report], Projekt-Nr. 70.0736/2003, Bundesministerium Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Bonn, Berlin. (2004)
- [5] DiePresse.com, „VCÖ-Statistik: Österreicher fahren täglich 36 Kilometer,“ [Online] http://diepresse.com/home/panorama/oesterreich/733547/VCÖStatistik_Oesterreicher-fahren-taeglich-36-Kilometer, [abgerufen: 15.01.2016]
- [6] TU Berlin, "AMPERE", [Online] Available: <http://www.projekt-ampere.de/>, [abgerufen: 1.12. 2015]
- [7] KIT, "CROME - Cross-border Mobility for EVs", [Online] Available: <http://crome-project.eu/>, [abgerufen: 01.12. 2015]
- [8] Pfriem, M.; Gauterin, F., "Less range as a possible solution for the market success of electric vehicles in commercial fleets," in Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013 World , vol., no., pp.1-8, 17-20 Nov. 2013
- [9] Marie Tuil, „E-Autos - dreckiger als gedacht,“ [online], <http://www.sueddeutsche.de/auto/zwiespaeltige-umweltbilanz-e-autos-dreckiger-als-gedacht-1.2748493>, [abgerufen: 15.01.2016]
- [10] Spichartz, P.; Dost, P.; Sourkounis, C., "Evaluation of electric range demands of EV and EREV on the basis of field test data," in Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), 2015 International Conference on , vol., no., pp.1-6, 3-5 March 2015
- [11] Bundesamt für Statistik, "Pendler nach Entfernung zwischen Wohnung und Arbeitsstätte 1996 und 2008," [Online]: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/70404/umfrage/pendlernach-entfernung-zwischen-wohnung-und-arbeitsstaette/>, [abgerufen: 01.12.2015].
- [12] Spichartz, P.; Dost, P.; Becker, N.; Sourkounis, C., "Experiences with long distance electromobility in metropolitan areas," in Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE , vol., no., pp.003626-003631, 9-12 Nov. 2015
- [13] Spichartz, P.; Dost, P.; Sourkounis, C.; Balzer, D., " Energy Consumption and User Behaviour in a Field Test Based Evaluation of Frequent Drivers Utilising Extended Range Electric Vehicles," in Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 2016 18th IEEE, 18-20 April 2016 (Accepted)
- [14] Spichartz, P.; Dost, P.; Sourkounis, C., "Utilisation of Battery Electric Vehicles and Extended Range Electric Vehicles in a Field Test," in Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2015 International Conference on , vol., no., pp., 22-25 Nov. 2015
- [15] Dost, P.; Spichartz, P.; Sourkounis, C., "Temperature influence on state-of-the-art electric vehicles' consumption based on fleet measurements," ESARS 2015, vol., no., pp.1,6, 3-5 March 2015
- [16] Dost, P.; Spichartz, P.; Sourkounis, C., "Charging Behaviour of Users Utilising Battery Electric Vehicles and Extended Range Electric Vehicles within the Scope of a Field Test," in Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2015 International Conference on , vol., no., pp., 22-25 Nov. 2015
- [17] Dost, P.; Spichartz, P.; Sourkounis, C., " Evaluation of Potentials for Peak Load Shifting by Means of Electric Vehicles Based on Field Test Measurements," in Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 2016 18th IEEE, 18-20 April 2016 (Accepted)