



CO₂-Minderungspotenziale durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in Dienstwagenflotten

Ergebnisbericht
im Rahmen des Projektes „Future Fleet“
AP 2.7

Autoren:

Peter Kasten, Öko-Institut e.V.

Dr. Wiebke Zimmer, Öko-Institut e.V.

Unter Mitarbeit von

Stephan Leppler, Öko-Institut e.V.

Oktober 2011

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* unter dem Förderkennzeichen 03KP602 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Feldtest-Design	10
2	Energieverbrauch und Fahrleistung in Future Fleet	12
2.1	Das Ladeverhalten	13
2.2	Nutzungsdaten	16
3	CO₂-Bilanz Future Fleet	21
3.1	Methodisches Vorgehen und Annahmen	21
3.2	Ergebnisse.....	27
4	Szenarien für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in Dienstwagenflotten.....	31
4.1	Wechselwirkung zwischen Elektromobilität und Strommarkt	31
4.1.1	Strommarktmodellierung und Merit Order.....	32
4.1.2	Marktentwicklung und Fahrprofile von Elektro-Pkw	35
4.1.3	CO ₂ -Emissionsfaktoren	37
4.2	TCO-Betrachtung	40
4.2.1	Methodik	41
4.3	Methodisches Vorgehen für die Szenarientwicklung	44
4.3.1	Maximalpotenzial für die Szenarientwicklung für das Unternehmen SAP	45
4.3.2	Maximalpotenzial für die Szenarientwicklung für die Dienstwagenflotte in Deutschland	47
4.3.3	Akzeptanzbestimmung für Elektrofahrzeuge	48
4.3.4	Bestandsentwicklung und Emissionsbilanz	50
4.4	Mögliche Entwicklungspfade von Elektromobilität für das Unternehmen SAP	53
4.4.1	Ergebnisse der Szenariobetrachtung	56
4.5	Mögliche Entwicklungspfade von Elektromobilität für Dienstwagenflotten in Deutschland	64
4.5.1	Ergebnisse der Szenariobetrachtung	65
5	Zusammenfassung	69
5.1	Arbeitsschritte.....	69
5.2	Wesentliche Erkenntnisse und Ergebnisse.....	69

5.2.1 CO₂-Bilanz Future Fleet70

5.2.2 Szenariobetrachtungen71

6 Literaturverzeichnis..... 73

Anhang A: Szenarioannahmen 76

Anhang B: Annahmen für TCO-Modell..... 79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des Verkehrssektors inkl. der Vorketten [2]	8
Abbildung 2: Ladekurve 27. Februar 2011	13
Abbildung 3: Ladekurve 18. März 2011 (nur Vorgang der Batterieladung dargestellt)	14
Abbildung 4: Ladekurve 18. März 2011 (vollständig)	15
Abbildung 5: Ladekurve 01. Juni 2011	16
Abbildung 6: Datenqualität (zeitliche Verteilung)	17
Abbildung 7: Emissionsfaktoren für den Flottenversuch Future Fleet	28
Abbildung 8: Absolute Emissionen Future Fleet (Szenario „Anpassung“, optimiertes System) ..	29
Abbildung 9: Relative CO ₂ -Emissionseinsparung durch Flottenversuch Future Fleet	30
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Merit Order	32
Abbildung 11: Modellschema PowerFlex	34
Abbildung 12: Effekt auf Stromerzeugung durch Elektromobilität	38
Abbildung 13: Schema TCO-Modell	42
Abbildung 14: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Restwertbestimmung bei PHEV und BEV	44
Abbildung 15: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Bestimmung von Umweltentlastungspotenzialen	45
Abbildung 16: Illustration der Bestimmung der Akzeptanz (Bsp. Relative Mehrkosten bei der Beschaffung)	50
Abbildung 17: Total Cost of Ownership – Jahr: 2020, Größenklasse: klein, Fahrleistung: 12.741 km	57
Abbildung 18: Total Cost of Ownership – Jahr: 2020, Größenklasse: klein, Fahrleistung: 34.750 km	58
Abbildung 19: Potenzialabschätzung für elektrische Fahrzeuge im Unternehmen SAP – 2020 ..	60
Abbildung 20: Potenzialabschätzung für elektrische Fahrzeuge im Unternehmen SAP – 2030 ..	61
Abbildung 21: Relative CO ₂ -Einsparung durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen für das Unternehmen SAP - 2020	62
Abbildung 22: Relative CO ₂ -Einsparung durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen für das Unternehmen SAP - 2030	63
Abbildung 23: Potenzialabschätzung für elektrische Fahrzeuge in der Dienstwagenflotte in Deutschland – 2020	65
Abbildung 24: Potenzialabschätzung für elektrische Fahrzeuge in der Dienstwagenflotte in Deutschland – 2030	66
Abbildung 25: Relative CO ₂ -Einsparung durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen für die Dienstwagenflotte in Deutschland - 2020	67
Abbildung 26: Relative CO ₂ -Einsparung durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen für die Dienstwagenflotte in Deutschland – 2030	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Firmen und Privatfahrzeuge nach Fahrzeugsegmenten [4]	10
Tabelle 2: Fahrzeugcharakteristika des eingesetzten Pkw „Stromos“ [6]	11
Tabelle 3: Kriterien zur Verwendbarkeit zur Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs beim Fahren	18
Tabelle 4: Spezifischer, gemittelter Energieverbrauch beim Fahren nach Nutzungsszenario	18
Tabelle 5: Spezifischer gemittelter Energieverbrauch beim Fahren nach Monat.....	19
Tabelle 6: Fahrleistung differenziert nach Nutzungsszenario.....	20
Tabelle 7: Stromzusammensetzung und CO ₂ -Emissionsfaktoren an SAP-eigenen Ladestationen	22
Tabelle 8: CO ₂ -Emissionsfaktoren für weitere Standorte / Szenarien	22
Tabelle 9: Verbrauch und CO ₂ -Intensität konventioneller Fahrzeuge (Annahmen für Flottenversuch Future Fleet)	23
Tabelle 10: Fahrleistung der Feldtestteilnehmer vor und während der wochenweisen Überlassung	24
Tabelle 11: Annahmen zur CO ₂ -Bilanz für Future Fleet	26
Tabelle 12: Größenklassen- und Antriebstypstruktur Privatwagen.....	27
Tabelle 13: Anzahl elektrisch angetriebener Pkw in Strommarktsimulation.....	36
Tabelle 14: Kennzahlen zu zusätzlicher Stromerzeugung durch Elektromobilität	39
Tabelle 15: Parameter zur Restwertbestimmung	43
Tabelle 16: Restriktionen bei Bestimmung des Maximalpotenzials von batterieelektrischen Fahrzeugen für das Unternehmen SAP	47
Tabelle 17: Akzeptanzverteilung zu Mehrkosten bei Beschaffung eines batterieelektrischen Fahrzeugs	49
Tabelle 18: Struktur der Dienstwagenflotte in Deutschland.....	51
Tabelle 19: Verbrauch in CO ₂ -Intensität konventioneller Fahrzeuge - Annahmen für 2020 / 2030	52
Tabelle 20: Elektrischer Energieverbrauch von batterieelektrischen (BEV) und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen (PHEV) – Annahmen für 2020/2030	52
Tabelle 21: Jahresfahrleistung aus empirischer Untersuchung im Projekt Future Fleet	55
Tabelle 22: Jahresfahrleistung in Szenarien mit Mobilitätskonzept (Betrachtung für das Unternehmen SAP)	56
Tabelle 23: Jahresfahrleistung von Dienstwagen in Deutschland – abgeleitet aus Mid 2008.....	64
Tabelle 24: Jahresfahrleistung in Szenarien mit Mobilitätskonzept (Betrachtung Dienstwagenflotte in Deutschland)	65

1 Einleitung

Deutschland will seine Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 % gegenüber 1990 senken. Ein ambitioniertes Ziel, das nur erreicht werden kann, wenn alle relevanten Sektoren – Industrie, Haushalte, Energiewirtschaft und Verkehr - ihre CO₂-Emissionen deutlich reduzieren.

Wesentliche Sektoren haben bisher durchaus Erfolge vorzuweisen: Die Energiewirtschaft beispielsweise emittiert heute 20 %, das verarbeitende Gewerbe rund 40 % weniger als vor 20 Jahren [1]. Anders ist das Bild im Verkehrssektor. Die CO₂-Emissionen des Verkehrs haben sich zwischen 1960 und heute mehr als verdoppelt, verglichen mit 1990 sind sie um knapp 8 % gestiegen. Verantwortlich dafür ist zu einem großen Anteil der Pkw-Verkehr, der im Jahr 2009 rund 127 Mio.t CO₂ emittiert hat und damit für rund 60 % der Emissionen im Verkehrssektor stand [2].

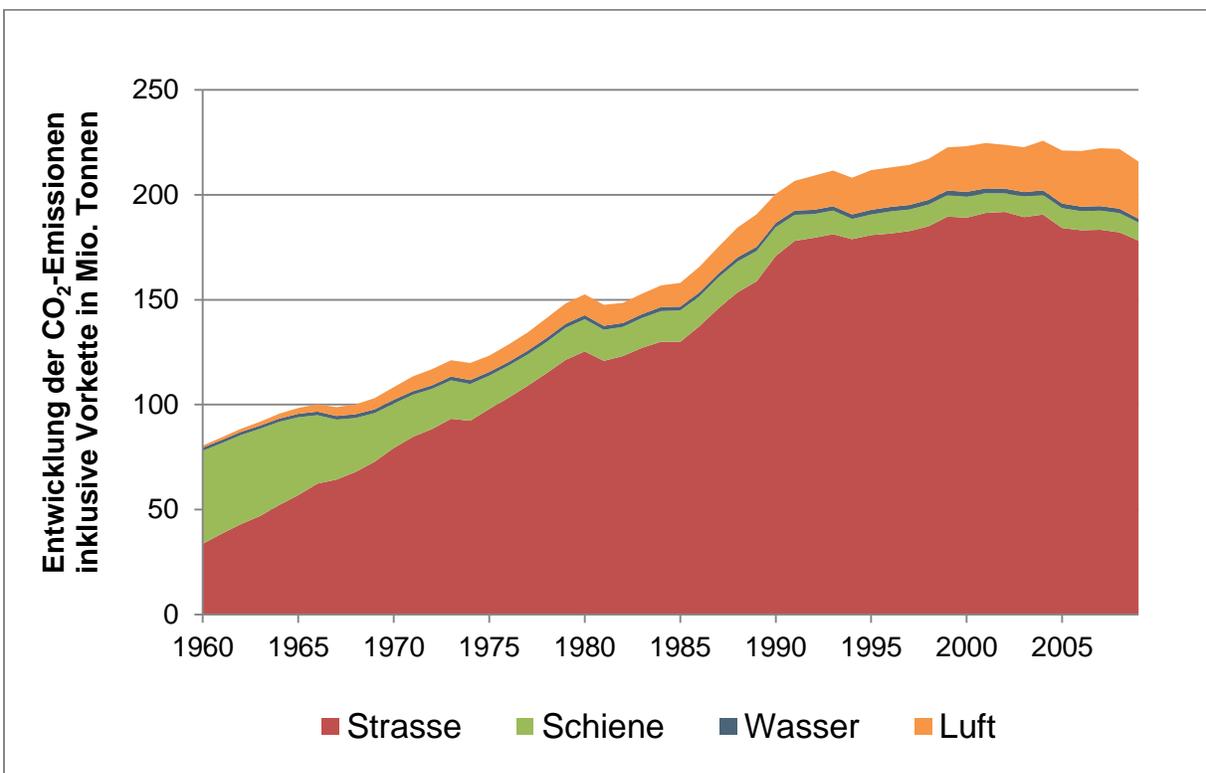


Abbildung 1: Entwicklung der CO₂-Emissionen des Verkehrssektors inkl. der Vorketten [2]

Nicht unwesentlich tragen die Dienstwagen hierzu bei. Seit 2001 liegt der Anteil der gewerblichen Neuzulassungen insgesamt über dem der privaten [3]. 2008 und 2010 hatten die gewerblich neu zugelassenen Pkw einen Anteil von rund 60 %, 2009 stellte mit rund 37 %

aufgrund der Abwrackprämie eher ein Ausnahmejahr dar [4]. Die große Bedeutung gewerblich zugelassener Fahrzeuge relativiert sich, wenn der Fahrzeugbestand betrachtet wird. Im Jahr 2009 macht nach [4] der gewerbliche Fahrzeugbestand etwa 10 % des gesamten Fahrzeugbestands aus. Nach der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“¹ [5] sind von den 41,3 Mio. Pkw in privaten Haushalten 3,56 Mio. gewerblich zugelassen, hierbei handelt es sich damit vor allem um auch privat genutzte Dienstwagen. Der große Unterschied zwischen Bestand und Neuzulassungen lässt sich vor allem mit der Haltedauer der Fahrzeuge erklären, die bei privaten Haltern deutlich länger ist. Auch wenn die Zahl von 3,56 Mio. Pkw zunächst unbedeutend erscheint: Dienstwagen haben einen wesentlichen Einfluss auf die CO₂-Emissionen des Verkehrs. Hierfür gibt es verschiedene Gründe.

1. Gewerblich zugelassene Pkw haben einen entscheidenden Einfluss auf die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands in Deutschland, weil der größte Teil bereits nach wenigen Jahren weiterverkauft wird und so den Gebrauchtwagenmarkt dominiert [3].
2. Gewerbliche Halter beschaffen vergleichsweise mehr repräsentativere und damit in der Regel auch verbrauchsstärkere Fahrzeuge. Das verdeutlicht Tabelle 1, in der nach Fahrzeugklasse differenziert wird. Vergleicht man jeweils die Gruppe der gewerblich zugelassenen und auf der anderen Seite die des privaten Fahrzeugbestandes, wird deutlich, dass bei gewerblich zugelassenen Fahrzeugen Pkw der oberen Mittelklasse, Oberklasse und Geländewagen prozentual gesehen mehr als doppelt so häufig vertreten sind wie bei privat zugelassenen Fahrzeugen. Bei privaten Fahrzeugen der Segmente Kleinwagen, Kompaktklasse und Minis liegt dagegen der Anteil deutlich über dem der gleichen Fahrzeugklasse im Firmenwagensegment.
Die Tendenz gewerblicher Halter zu höheren Fahrzeugsegmenten hat höhere durchschnittliche CO₂-Emissionen zur Folge. Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von im Jahr 2008 neu zugelassenen Firmenfahrzeugen lagen bei 167 g/km im Gegensatz zu 162 g/km bei privat zugelassenen Fahrzeugen [4].
3. Dienstwagen haben pro Jahr mit rund 25.626 km eine deutlich höhere Fahrleistung als privat zugelassene Pkw mit 12.629 km (Eigene Auswertung, [5]). Die höheren spezifischen CO₂-Emissionen fallen dadurch deutlich stärker ins Gewicht.

Die Reduktion der Emissionen von Dienstwagen kann damit einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Neben der Anschaffung besonders effizienter und kleinerer Pkw können hier alternative Antriebe wie der Elektromotor eine Möglichkeit darstellen. Genau dort setzt das Projekt Future Fleet an: Es wurden batterieelektrische² Fahrzeuge in die Firmenwagenflotte der SAP AG integriert. Der Flottenversuch hat damit die Gelegenheit geboten, auf Basis von realen Nutzungs- und Fahrzeugdaten das Umweltentlastungspotenzial für die Anwendung von

¹ Die Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ wird in Folge mit MiD 2008 abgekürzt.

² Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) besitzen einen Elektromotor als Antrieb, der durch die Fahrzeugbatterie mit Energie versorgt wird. Die Fahrzeugbatterie kann an speziellen Ladesäulen, mit einem speziellen Ladekabel aber auch an normalen Steckdosen geladen werden

batterieelektrischen Pkw als Dienstwagen und als Poolfahrzeuge von SAP zu quantifizieren und darauf aufbauend weitere zukünftige Potenziale abzuleiten.

Tabelle 1: Firmen und Privatfahrzeuge nach Fahrzeugsegmenten [4]

Fahrzeugsegment	Firmenfahrzeug (Bestand)	Privatfahrzeug (Bestand)
Kleinwagen, Kompaktklasse, Minis	34,3 %	57,7 %
Mittelklasse	23,4 %	20,7 %
Obere Mittelklasse, Oberklasse	12,7 %	6,0 %
Utilities	10,3 %	2,3 %
Geländewagen	7,1 %	2,9 %
Großraum-Vans	6,7 %	4,3 %
Sonstige	5,5 %	6,1 %

Die Bilanzierung des Umweltnutzens von Elektrofahrzeugen erfordert die Berücksichtigung mehrerer Einflussfaktoren, die im Rahmen des Flottenversuchs erfasst und ausgewertet wurden (Kapitel 0). Für eine fundierte Beurteilung des Umweltnutzens von Elektrofahrzeugen sind Energieverbräuche, die tatsächlich beim täglichen Betrieb anfallen, eine Grundvoraussetzung. Diese wurden im Rahmen des Flottenversuches unter Realbedingungen erhoben. Der Energieverbrauch der Fahrzeuge im Realbetrieb in Kopplung mit der durch Elektrofahrzeuge geleisteten Fahrleistung ermöglichte dann die Quantifizierung des Gesamtstrombedarfs der Flotte. Für die Gesamtwirkungsabschätzung wurden die aus der Strombereitstellung resultierenden Emissionen den Emissionen konventioneller verbrennungsmotorischer Fahrzeuge derselben Fahrleistung gegenübergestellt. Aus der Differenz ergibt sich der Netto-Emissionsvorteil der elektrisch betriebenen Fahrzeugflotte. Das Vorgehen und die Ergebnisse zur Bilanzierung der CO₂-Emissionen des Flottenversuches Future Fleet sind in Kapitel 3 beschrieben. Aufbauend auf den Ergebnissen der Akzeptanz- und Nutzungsanalysen wurde dann zum einen in verschiedenen Szenarien untersucht, welchen Umweltnutzen eine Ausdehnung des Flottenversuchs auf die gesamte Fahrzeugflotte von SAP haben würde. Zum anderen wurde auf Basis der erfolgten Analysen das Gesamtpotenzial für betriebliche Fahrzeugflotten in Deutschland in Szenarien abgeleitet und auf seine Umweltentlastungspotenziale hin untersucht. Die Szenarioanalysen sind in Kapitel 4 dargestellt.

1.1 Feldtest-Design

Von Ende Januar bis Ende September 2011 standen 27 Elektrofahrzeuge bei der SAP AG im Rahmen von Future Fleet für den Feldtest zur Verfügung. Bei den Fahrzeugen handelte es sich

um einen batterieelektrischen viertürigen Kleinwagen des Herstellers German eCars. In Tabelle 2 sind die relevanten Fahrzeugcharakteristika der eingesetzten batterieelektrischen Pkw „Stromos“ tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 2: Fahrzeugcharakteristika des eingesetzten Pkw „Stromos“ [6]

Eigenschaft	Größe
Batteriekapazität [kWh]	19,2
Reichweite [km]	> 100
Energieverbrauch [kWh / 100 km]	15 – 20
Vollladung (Hausanschluss) [h]	< 8

Die Ladeinfrastruktur wurde durch die MVV Energie AG an den Standorten Walldorf (14 Ladepunkte), St. Leon-Rot (14 Ladepunkte), Bensheim (4 Ladepunkte) und Karlsruhe (2 Ladepunkte) aufgebaut. Die Ladestationen befanden sich zum Teil in Parkhäusern für SAP-Beschäftigte, aber auch auf Parkplätzen unter freiem Himmel.

Die Fahrzeuge des Flottenversuchs wurden für den Einsatz in zwei Nutzungsszenarien aufgeteilt:

1. „Wochenweise Überlassung“: Den Fahrzeugnutzern der SAP AG wird ein Elektrofahrzeug für eine Woche (Montag bis Montag) überlassen. Die Fahrzeuge können innerhalb dieses Zeitraums dienstlich und privat genutzt werden. Die Fahrzeuge werden nach Auswahl der Nutzer am Wochenanfang zugeteilt. Zum Laden müssen die Nutzer einen Stellplatz an einer der Ladesäulen buchen. Sie können die Fahrzeuge aber auch zuhause oder an frei zugänglichen Ladesäulen anschließen.
2. „Dienstliche Nutzung als Poolfahrzeug“: Die Fahrzeuge können für dienstliche Fahrten innerhalb eines Tages zu einem anderen SAP-Standort oder zu einem innerhalb der Reichweite liegenden anderen Einsatzort eingesetzt werden. Die Nutzer buchen ein Elektroauto über den Softwareprototyp, ihnen wird dann auf Grundlage der Fahrtanfrage (Entfernung, Dauer) ein passendes Fahrzeug zugeteilt.

Die Nutzer hatten in beiden Szenarien die Möglichkeit, mehrmals im Projektverlauf die Fahrzeuge zu nutzen.

Des Weiteren wurden einige Fahrzeuge als „Backup“ nicht an SAP-Mitarbeiter verliehen und es wurden Fahrzeuge nach Reparaturmaßnahmen als „Werkstatt“-Fahrzeug deklariert. Den Datensätzen wurde während der Aufbereitung der Daten jeweils das Nutzungsszenario zugewiesen, in welchem das Fahrzeug während des jeweiligen Ladevorgangs eingesetzt wurde.

2 Energieverbrauch und Fahrleistung in Future Fleet

Der Flottenversuch Future Fleet ermöglicht nicht nur die Entwicklung der Infrastruktur und der Software für den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in betrieblichen Flotten. Durch die häufige Nutzung der 27 eingesetzten batterieelektrischen Fahrzeuge ließen sich reelle Fahr- und Ladedaten gewinnen, die im Vergleich zu oft stark Annahmen-basierten Bilanzierungen eine detaillierte ökobilanzielle Betrachtung der im Flottenversuch eingesetzten Fahrzeuge zulassen.

Essentielle Größen für die Ermittlung der durch die Fahrzeugnutzung entstehenden CO₂-Emissionen sind bei batterieelektrischen Pkw

- der Energieverbrauch bei der Nutzung des batterieelektrischen Pkw,
- die Ladeverluste,
- sonstige energetische Verbräuche / Systemverluste,
- die Fahrleistung der elektrischen Pkw sowie mögliche Verlagerungseffekte auf andere Verkehrsträger,
- die CO₂-Emissionen des von elektrischen Pkw genutzten Stroms.

Um die Energieverbräuche der eingesetzten batterieelektrischen Fahrzeuge und die Verluste während des Ladevorgangs zu ermitteln, wurden an den im Rahmen von Future Fleet an den SAP-Standorten Walldorf, St. Leon-Rot, Karlsruhe und Bensheim aufgestellten Ladesäulen Daten aus dem Fahrzeug im Abstand von drei bis sechs Minuten automatisch zur wissenschaftlichen Auswertung aufgenommen. Relevante Größen für die Bewertung des Umweltnutzens sind dabei

- das Datum und die Uhrzeit,
- der Kilometerstand des Pkw
- der Ladezustand der Batterie,
- der Netzzähler der Ladesäule,
- die Ladeleistung.

Aus den aufgenommenen Daten lassen sich somit das zeitlich aufgelöste Ladeverhalten und die energetischen Verluste während des Aufenthalts an der Ladesäule ermitteln (Abschnitt 2.1). Der Energieverbrauch bei der Nutzung der Fahrzeuge lässt sich aus dem veränderten Kilometerstand und der Ladezustandsänderung eines Fahrzeugs zwischen zwei Ladevorgängen ableiten. Da die Daten allerdings nur an den Ladesäulen auf dem Betriebsgelände der SAP AG aufgenommen wurden, kann der spezifische Energieverbrauch nur für Fahrten ermittelt werden, bei denen die Fahrzeugbatterie nicht an einer „fremden“ Ladesäule oder an einer normalen Steckdose aufgeladen wurde. Da für die Aufstellung der CO₂-Bilanz der mittlere Energieverbrauch während der Fahrt ausreichend ist, ist das Fehlen einiger Ladevorgänge nicht

von entscheidender Bedeutung. Zusammen mit der Bestimmung der Fahrleistung sind die ermittelten Werte für den Energieverbrauch während der Fahrzeugnutzung in Abschnitt 2.2 aufgeführt.

2.1 Das Ladeverhalten

Durch die automatische Aufnahme einiger Fahrzeugdaten während der Batterieladung an allen im Projekt Future Fleet aufgestellten Ladesäulen war es möglich, das zeitlich aufgelöste Ladeverhalten, die sogenannte Ladekurve, der eingesetzten batterieelektrischen Fahrzeuge nachzuvollziehen. Zudem lässt sich mit Hilfe der Ladedaten bestimmen, wie hoch die Wandlungsverluste während der Batterieladung sind. Weiterhin wurde die Ladeleistung mit in den Datensatz aufgenommen, so dass das Lademanagement der Fahrzeugbatterie zumindest grob abbildbar ist.

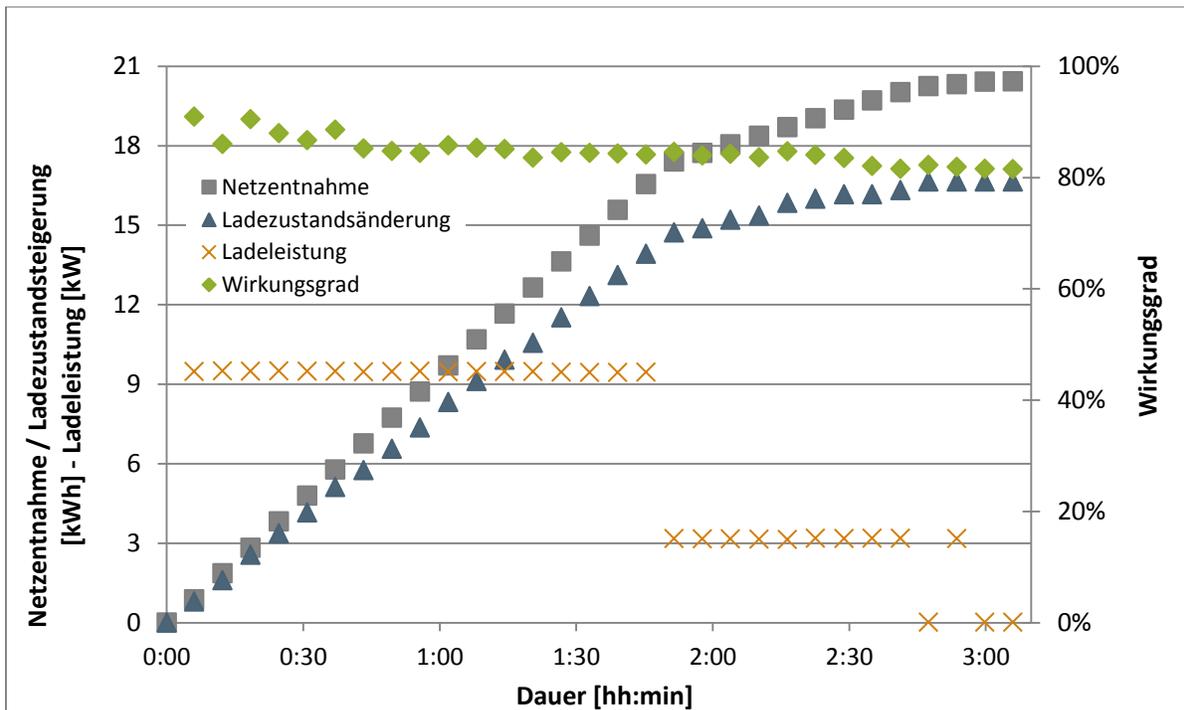


Abbildung 2: Ladekurve 27. Februar 2011

In Abbildung 2 ist als Beispiel die Vollladung einer fast komplett leer gefahrenen Batterie dargestellt. Die Batterieladung beginnt bei dem Ladestatus von 13 % (2,5 kWh Restenergie), wobei dem Fahrzeug nach ungefähr drei Stunden an einer Ladesäule auf dem SAP-Betriebsgelände wieder die vollständige Batteriekapazität zur Verfügung steht. Zudem ist an Abbildung 2 das Batterielademanagement der eingesetzten Fahrzeuge erkennbar. Die Umschaltung von der dreiphasigen Ladung mit ca. 9 kW auf die einphasige Ladung mit ca. 3 kW erfolgt bei dem Batterieladestatus von 90 %. Dadurch verringert sich die Ladegeschwindigkeit für die letzten 10 % der Batteriekapazität erheblich und stellt mit ungefähr einer Stunde einen

erheblichen Teil der Zeit dar, die für eine vollständige Batterieladung benötigt wird. Das in Abbildung 2 beispielhaft gezeigte Ladeverhalten ist charakteristisch für die in Future Fleet eingesetzten Fahrzeuge und kann daher generell für die in Kapitel 4.1 folgende CO₂-Bilanzierung genutzt werden.

In Abbildung 3 ist eine weitere Ladekurve mit einem Batterieladestatus von 75 % zu Beginn der Aufladung zu sehen. Die vollständige Aufladung dauert für diese noch zu drei Vierteln volle Batterie ungefähr eine Stunde und das Lademanagement mit der Umschaltung von drei- auf einphasige Ladung ist auch hier deutlich zu erkennen. Wie in Abbildung 2 treten auch in dieser Ladekurve energetische Verluste von knapp 20 % während der Ladung der Batterie auf.

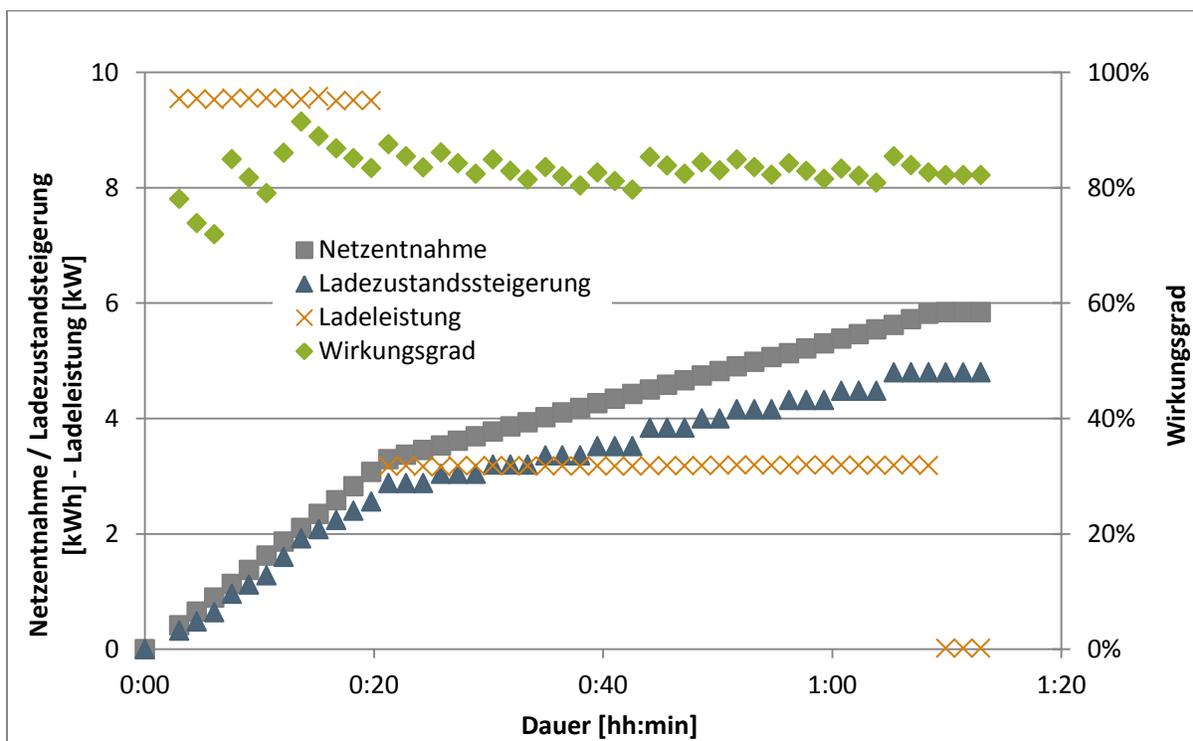


Abbildung 3: Ladekurve 18. März 2011 (nur Vorgang der Batterieladung dargestellt)

Neben den Verlusten während der Batterieladung sind weitergehende Verluste nach Vollladung der Fahrzeuge erkennbar, solange die Fahrzeuge mit einer Ladesäule verbunden sind. Diese Verluste ergeben sich aus notwendigen Erhaltungsladungen und weiteren energetischen Verbrauchern, die für das Batteriemangement eingesetzt werden. In Abbildung 4 ist beispielhaft die vollständige Ladekurve des bereits in Abbildung 3 gezeigten Ladevorgangs dargestellt. Das entsprechende Fahrzeug war über das Wochenende ungefähr 72 Stunden mit einer Ladesäule verbunden und nach ungefähr einer Stunde wieder vollständig aufgeladen. Durch die Verbindung zum Stromnetz wurde jedoch auch nach Aufladen der Batterie weiterhin Strom verbraucht. Dieser zusätzliche Stromverbrauch wird verursacht durch die so genannte Erhaltungsladungen (das sind Peaks in der Ladeleistung, die auftreten, um die Batterie auf

100 % zu halten) und durch energetische Verbraucher für das Batteriemanagement – wie zum Beispiel das elektrische Gebläse der Batterie. Für den in Abbildung 4 dargestellten Ladevorgang ergibt sich mit diesen zusätzlichen Ladeverlusten durch das reine „Angeschlossen-Sein“ an die Ladesäule ein Gesamtwirkungsgrad von nur 41 %.

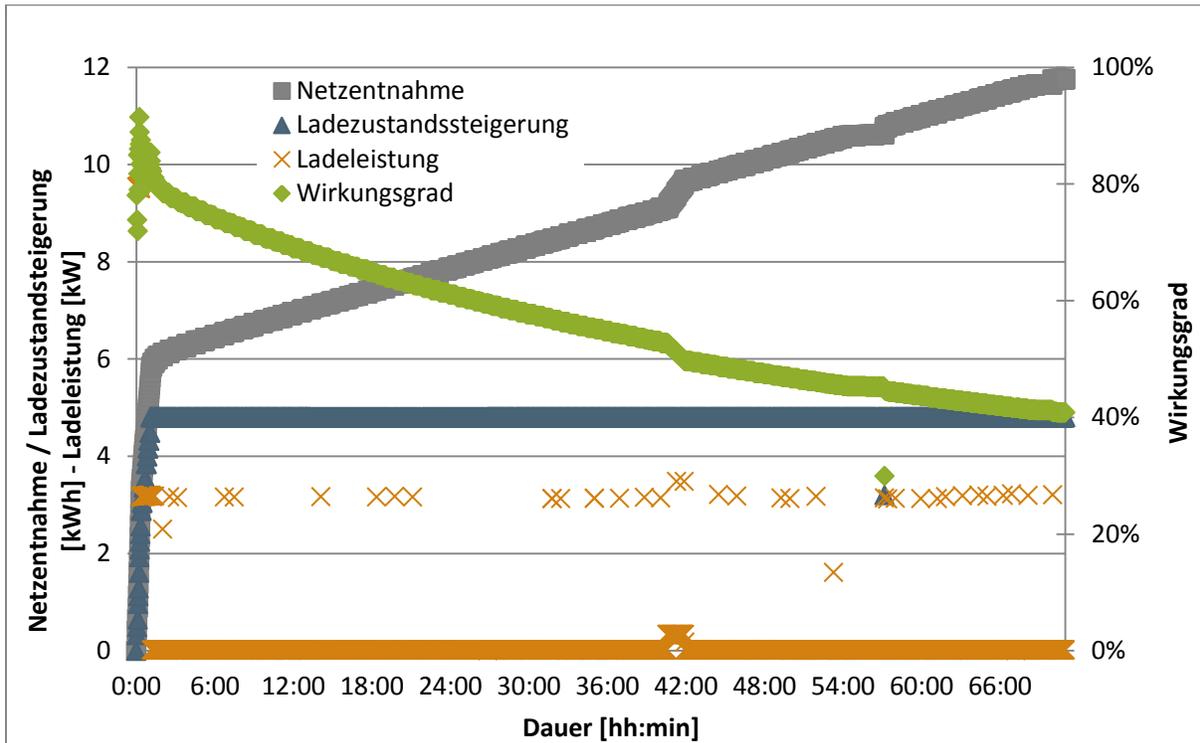


Abbildung 4: Ladekurve 18. März 2011 (vollständig)

Zusammenfassend für den Flottenversuch lässt sich aus den aufgenommenen Daten ein Gesamtwirkungsgrad von 55 % bestimmen, wobei sich die Verluste zu ungefähr 20 % aus Wandlungsverlusten während der Batterieladung und zu 25 % aus Verlusten nach der vollständigen Batterieladung zusammensetzen. Die Auswertung der Daten hat weiterhin ergeben, dass eine vollständige Beladung der Fahrzeugbatterie an einer Ladesäule auf dem SAP-Betriebsgelände ungefähr drei Stunden dauerte, wobei die Ladeleistung ab einem Batterieladezustand von 90 % verringert wurde.

Abschließend ist noch anzumerken, dass bei vielen aufgenommenen Ladevorgängen Probleme mit der Messung des Ladezustands der Batterie erkennbar sind. Hier wurde der Ladezustand vom System als höher eingeschätzt, als er in Realität war (Bsp.: Abbildung 5). Bei diesen Ladevorgängen führte dies zu einer verfrühten Umschaltung auf die einphasige Ladung, wodurch sich die Ladezeit für die Vollladung erhöhte.

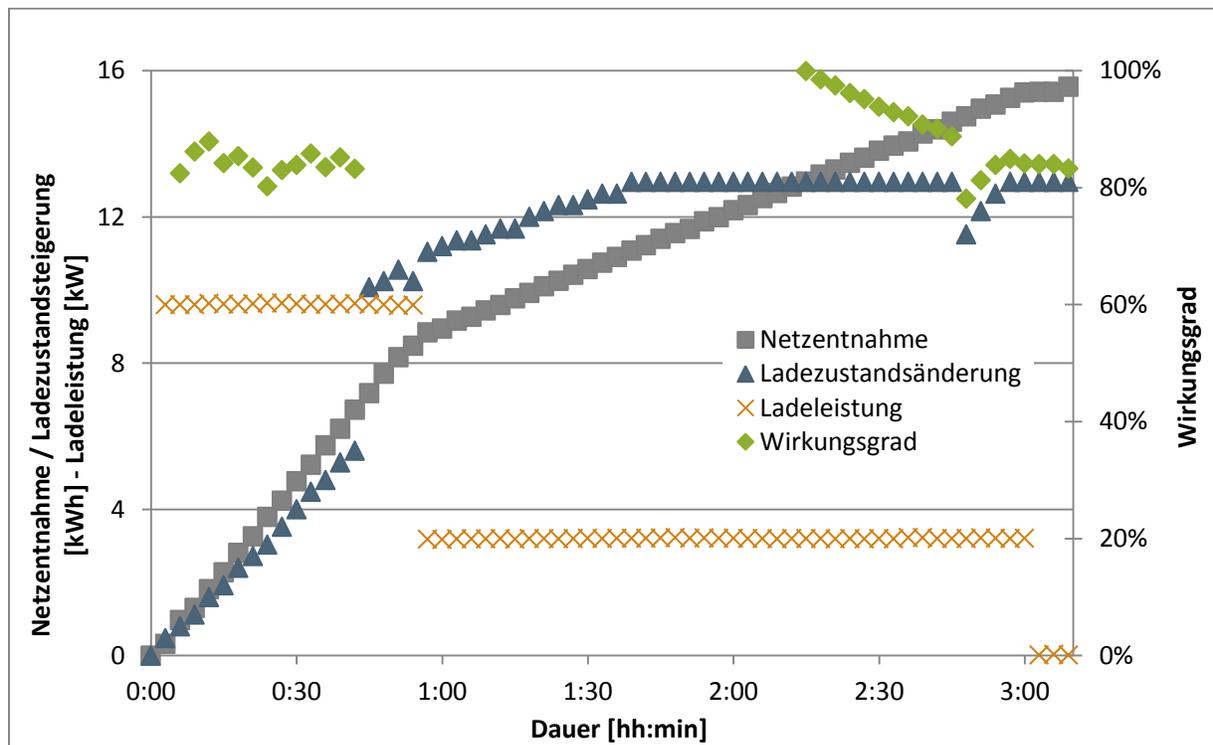


Abbildung 5: Ladekurve 01. Juni 2011

2.2 Nutzungsdaten

Um ein vollständiges Bild für den Energieverbrauch der batterieelektrischen Fahrzeuge im Rahmen des Projekts Future Fleet zu erhalten, wird neben der Bestimmung der Ladeverluste zusätzlich der Energieverbrauch während der Nutzung sowie die Fahrleistung der Fahrzeuge benötigt. Über die Ladezustandsveränderung und die Veränderung des Kilometerstands eines Fahrzeugs zwischen zwei Ladevorgängen kann der spezifische Energieverbrauch der Fahrzeugnutzung zwischen diesen beiden Ladevorgängen bestimmt werden.

Dies setzt allerdings voraus, dass alle Ladevorgänge eines Fahrzeugs erfasst werden, was im Projekt Future Fleet nicht der Fall war, da die Ladedaten nur an für Future Fleet errichteten Ladesäulen aufgenommen werden konnten. Für Ladevorgänge zuhause oder an einer nicht am Projekt beteiligten Ladesäule standen die Ladedaten daher nicht zur Verfügung, so dass nur 44 % der Ladedaten zur Bestimmung des mittleren spezifischen Energieverbrauchs während der Pkw-Nutzung genutzt werden können (Abbildung 6). Als Charakteristikum für die Bestimmung, ob ein Ladevorgang für die Auswertung des Energieverbrauchs verwendet werden kann, wurde der ermittelte spezifische Energieverbrauch eines Fahrzeugs zwischen zwei Ladevorgängen gemäß Tabelle 3 ausgewählt.

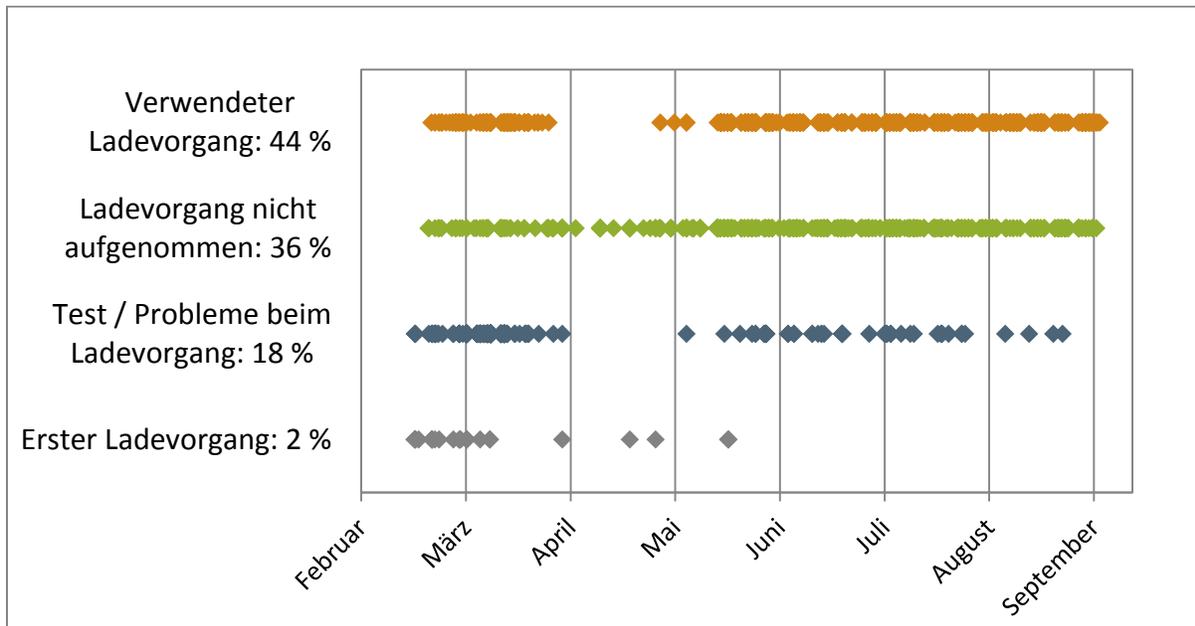


Abbildung 6: Datenqualität (zeitliche Verteilung)

Bei Ladevorgängen der Kategorie „Erster Ladevorgang“ konnte naturgemäß kein Energieverbrauch berechnet werden. In der Kategorie „Test / Probleme beim Ladevorgang“ sind Ladevorgänge zusammengefasst, bei denen sich der Kilometerstand zwischen zwei Ladevorgängen nicht ändert. Die Häufung zu Beginn des Flottenversuchs und in den Nutzungsszenarien „Werkstatt“ und „Backup“ lassen den Schluss zu, dass es sich dabei vor allem um Tests sowie um die Eingewöhnungsphase der Fahrzeugnutzer handelt. Die Verteilung zwischen den beiden restlichen Kategorien bleibt nach der Eingewöhnungsphase der Fahrzeugnutzer weitestgehend konstant. In der Kategorie „Ladevorgang nicht aufgenommen“ sind Ladevorgänge aufgenommen, bei denen zwischen den zwei Ladevorgängen weniger Energie verbraucht wurde, als vom Hersteller als Mindestverbrauch angegeben wird. Tritt ein solcher Fall in den Ladedaten auf, ist davon auszugehen, dass die Fahrzeugbatterie zwischen diesen Ladevorgängen an einer Steckdose oder einer „fremden“ Ladestation geladen wurde. Daher werden diese Datensätze nicht für die Bestimmung des Energieverbrauchs verwendet.

Schlussendlich wurden für die Bestimmung des Energieverbrauchs während der Pkw-Nutzung nur Datensätze der Kategorie „Verwendeter Ladevorgang“ benutzt. Diese stellt mit Abstand die größte Kategorie dar, so dass davon auszugehen ist, dass die Datenmenge eine ausreichende Grundlage für die Bestimmung des mittleren spezifischen Energieverbrauchs darstellt.

Anzumerken ist zudem der Zeitraum der Datenaufnahme. Mitte Februar 2011 wurde mit der Aufzeichnung der Daten begonnen. Als Schlussdatum für die Datenauswertung wurde das erste Wochenende im September 2011 ausgewählt, so dass eine relevante Anzahl an Ladedaten für März 2011 bis einschließlich August 2011 vorliegt, wovon der April 2011 aufgrund von Problemen mit der Datenaufzeichnung ausgeschlossen wird.

Tabelle 3: Kriterien zur Verwendbarkeit zur Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs beim Fahren

Kategorie	Kriterium
Erster Ladevorgang	Erster aufgenommener Ladevorgang
Test / Probleme beim Ladevorgang	Keine Fahrt zwischen zwei Ladevorgängen
Ladevorgang nicht aufgenommen	Spezifischer Energieverbrauch < 15 kWh / 100 km
Verwendeter Ladevorgang	Spezifischer Energieverbrauch \geq 15 kWh / 100 km

Über eine gewichtete Mittelung (Gewichtungsfaktor: Fahrstrecke) der Energieverbräuche der einzelnen Ladevorgänge wurde der mittlere spezifische Energieverbrauch mit 17,7 kWh / 100 km bestimmt. Grundlage für diesen Energieverbrauch ist die Fahrleistung und der Ladestand der Batterie vor und nach der Fahrt, Ladeverluste sind hier nicht mit berücksichtigt. Der Wert von 17,7 kWh / 100 km entspricht den Angaben des Herstellers und ergibt bei vollständiger Ausreizung der Batteriekapazität eine Reichweite von 108 km. In den Gruppengesprächen nach der Teilnahme am Feldversuch gaben die Fahrzeugnutzer eine maximale Reichweite der Fahrzeuge von 80 bis 100 km an, so dass davon auszugehen ist, dass der bestimmte Verbrauchswert eine berechnete Annahme für die weitere CO₂-Bilanzierung darstellt.

Tabelle 4: Spezifischer, gemittelter Energieverbrauch beim Fahren nach Nutzungsszenario

Nutzungsszenario	Energieverbrauch [kWh / 100 km]
Wochenweise Überlassung	17,3
Poolfahrzeug	19,6
Backup	20,7
Werkstatt	18,3

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Fahrzeuge in den verschiedenen Nutzungsszenarien unterschiedliche Energieverbräuche aufweisen (Tabelle 4). Der geringere Verbrauch für die Nutzung als Dienstwagen („wochenweise Überlassung“) ergibt sich wahrscheinlich aus der Tatsache, dass bei dieser Nutzungsart die „Furcht“ vor dem Überschreiten der Reichweite ausgeprägter war als in den anderen Nutzungsszenarien und somit sparsam gefahren wurde. Bei der Nutzung als Poolfahrzeug von Standort zu Standort war den meisten Nutzern bewusst, dass am anderen Standort eine Ladesäule zur Verfügung steht,

an der die Batterie aufgeladen und somit die Restreichweite des batterieelektrischen Pkw wieder erhöht werden kann. Zudem wurden die Fahrzeuge vom Software-Prototyp so verteilt, dass die Batterie für die angegebene Fahrt ausreichend gefüllt war. Diese beiden Faktoren führten bei der Nutzung als Poolfahrzeug wahrscheinlich zu einer weniger sparsamen Fahrweise und zu höheren Energieverbräuchen.

Tabelle 5: Spezifischer gemittelter Energieverbrauch beim Fahren nach Monat

Monat	Energieverbrauch [kWh / 100 km]
Februar*	22,1
März	19,2
April**	-
Mai	17,1
Juni	17,1
Juli	17,3
August	17,0
September*	17,7

* Für Februar und September liegen nur wenige Daten vor.

** Für April liegt nur ein Messwert vor.

Bei der jahreszeitlichen Differenzierung des spezifischen Energieverbrauchs (Tabelle 5) ist im März eine signifikante Spitze erkennbar. Die Werte für Februar und September sind aufgrund der wenigen Daten mit Unsicherheit behaftet, für April lag nur ein Datenpunkt vor, so dass diese Werte nicht mit berücksichtigt sind. Da die eingesetzten Fahrzeuge über ein Diesel-Aggregat beheizt wurden, ist die Außentemperatur wegen eines möglichen Einsatzes einer Heizung im Fahrzeuginnenraum kein Grund für den zusätzlichen Energieverbrauch des Fahrzeugs in den kälteren Monaten März und - mit entsprechenden Unsicherheiten - Februar. Wenn die Batterie jedoch auf unter 5 Grad abkühlt, wird diese über Heizmatten auf über 5 Grad aufgewärmt. Dadurch entsteht ein zusätzlicher elektrischer Energieverbrauch, der sich in den Monaten Februar und März widerspiegelt.

Anhand der aufgenommenen Daten konnte des Weiteren die Fahrleistung der eingesetzten Fahrzeuge bestimmt werden. Da einige Fahrzeuge bereits vor dem Beginn der Datenaufnahme von Teilnehmern des Flottenversuchs genutzt wurden, ist ein geringer Teil der Fahrleistung nicht in den an den Ladesäulen aufgezeichneten Daten mit aufgenommen. Daher wurde die Fahrleistung mit einem Korrekturfaktor an den für das Fahrzeugmanagementsystem

aufgezeichneten Wert angeglichen. Insgesamt wurde im Projekt Future Fleet bis einschließlich dem ersten September-Wochenende eine Fahrleistung von 88.231 km zurückgelegt. Die Mehrzahl der Fahrten wurde dabei im Nutzungsszenario wochenweise Überlassung getätigt.

Tabelle 6: Fahrleistung differenziert nach Nutzungsszenario

Nutzungsszenario	Fahrleistung [km]	Anteil an Fahrleistung [%]
Wochenweise Überlassung	76.357	87
Poolfahrzeug	6.432	7
Backup	3.334	4
Werkstatt	2.107	2
Gesamt	88.231	100

3 CO₂-Bilanz Future Fleet

Batterieelektrische Pkw werden durch einen Elektromotor angetrieben, der mit Strom aus der Fahrzeugbatterie gespeist wird. Anders als beim Verbrennungsmotor werden dabei weder direkte CO₂- noch Schadstoffemissionen freigesetzt, so dass lokal von einem CO₂-freiem Fahren gesprochen werden kann. Allerdings werden die Fahrzeugbatterien mit Energie aus dem Stromnetz geladen, weshalb beim Einsatz von batterieelektrischen Pkw die für Elektromobilität anfallende Stromerzeugung entscheidend für den Umweltnutzen ist.

Grundsätzlich sollte für die Bestimmung von CO₂-Emissionsfaktoren für Elektrofahrzeuge untersucht werden, wie sich der Strommarkt durch die zusätzliche Stromnachfrage ändert und welche zusätzlichen Emissionen dadurch entstehen. Ein solches Vorgehen wurde für die Bestimmung der CO₂-Intensität der Stromerzeugung für die im Rahmen des Flottenversuchs Future Fleet eingesetzten Fahrzeuge zunächst nicht gewählt, da der Effekt der Nutzung von 27 batterieelektrischen Pkw auf den Strommarkt minimal und eine Ableitung der detaillierten Fahrzeugnutzung aus den aufgenommenen Daten nur mit hohem Aufwand möglich gewesen wäre. Für die Szenariobetrachtungen bis zum Jahr 2020 und 2030, in denen dann laut Ziel der Bundesregierung eine bzw. sechs Millionen Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen unterwegs sein werden, ist dann eine detaillierte Modellierung des Stromsektors notwendig, um die durch E-Pkw entstehenden CO₂-Emissionen bestimmen zu können. Dies wird in Kapitel 4.1 beschrieben.

In allen hier präsentierten Bilanzen sind der Anlagenbau sowie die Anlagenentsorgung für die Kraftstoff- bzw. Stromherstellung mit in der Bilanzierung berücksichtigt. Unbetrachtet bleiben dagegen die Herstellung und die Entsorgung der Pkw und deren Batterien.

In diesem Kapitel wird auf den Flottenversuch Future Fleet Bezug genommen und untersucht, wie hoch die Emissionseinsparung durch die Nutzung der 27 batterieelektrischen Fahrzeuge ist. In Abschnitt 2.2 wurde bereits die Ableitung des Energieverbrauchs der Fahrzeuge, der energetischen Verluste des Gesamtsystems sowie der Fahrleistung der eingesetzten Fahrzeuge vorgestellt. Die dort aufgeführten Werte, die aus im Flottenversuch aufgenommenen Daten gewonnen wurden, werden für die in diesem Abschnitt folgende CO₂-Emissionsbilanz verwendet.

3.1 Methodisches Vorgehen und Annahmen

Da die Stromprodukte, die im Rahmen von Future Fleet für die Ladung an den Ladestationen auf dem SAP-Gelände verwendet wurden, bekannt sind, können mit Hilfe der CO₂-Intensivität dieser Stromprodukte die Emissionen für die Batterieladung an den SAP-Standorten Walldorf, St. Leon-Rot, Karlsruhe und Bensheim bestimmt werden (Tabelle 7).

Tabelle 7: Stromzusammensetzung und CO₂-Emissionsfaktoren an SAP-eigenen Ladestationen

Standort	Zusammensetzung	Emissionsfaktor [kg CO ₂ / kWh _{el}]
Walldorf	100 % Altanlagen Wasserkraft	0,589
St. Leon-Rot	100 % Altanlagen Wasserkraft	0,589
Karlsruhe	50 % Altanlagen Wasserkraft; 50 % EEG-Anlagen	0,589
Bensheim	Strommix	0,589

An den beiden Standorten Walldorf und St. Leon-Rot wurde für die Stromlieferung der Ladestationen Energie aus Altanlagen für erneuerbaren Energien (> 12 Jahre) verwendet. Strommengen aus Altanlagen für erneuerbaren Energien sind bereits im Strommix Deutschlands mit eingerechnet, so dass in der Bilanzierung für diese beide Standorte der Emissionsfaktor des Strommixes 2010 für Deutschland angesetzt wird [7]. Derselbe Emissionsfaktor wird ebenfalls für die Bilanzierung der Batterieladung an den SAP-eigenen Ladestationen der beiden Standorte Karlsruhe und Bensheim verwendet. In Karlsruhe wurde Strom aus Altanlagen für erneuerbare Energien und EEG³-geförderten erneuerbaren Energieanlagen zur Verfügung gestellt. Da durch den Einsatz von EEG-geförderten erneuerbaren Energieanlagen kein Impuls zum stärkeren Ausbau von erneuerbaren Energien ausgeht, werden auch solche Anlagen mit der CO₂-Intensivität des Strommixes für Deutschland gewertet. Am Standort Bensheim wurde für das Projekt Future Fleet kein spezieller Stromliefervertrag abgeschlossen.

Tabelle 8: CO₂-Emissionsfaktoren für weitere Standorte / Szenarien

Standort / Szenario	Emissionsfaktor [kg CO ₂ / kWh _{el}]
100 % Neuanlagen Wind-Onshore	0,024
100 % Neuanlagen Photovoltaik	0,089
Ladung zu Hause / sonstige Standorte (Strommix)	0,589

Für die CO₂-Bilanzierung werden noch weitere Emissionsfaktoren verwendet, welche in Tabelle 8 aufgeführt sind. Um das maximale Potenzial zur Emissionseinsparung aufzeigen zu können,

³ EEG – Erneuerbare Energien Gesetz: Mit diesem Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien erhalten Anlagebetreiber eine festgelegte Vergütung für ihren erzeugten Strom und Netzbetreiber werden zu dessen vorrangiger Abnahme verpflichtet. Die Vergütungssätze werden jeweils dem erneuerbaren Energieziel der Bundesregierung angepasst, so dass davon ausgegangen wird, dass durch den Bezug von EEG-geförderten Strom kein zusätzlicher ökologischer Nutzen generiert wird

wird die Bilanzierung ebenfalls für die Bereitstellung aus unterschiedlichen erneuerbaren Neuanlagen (Wind-Onshore, Photovoltaik) gerechnet. Die Emissionsfaktoren dafür sind [8] entnommen. Da bei der Nutzungsart „wochenweise Überlassung“ ein erheblicher Teil der Ladevorgänge nicht an den Ladestationen von SAP durchgeführt wurde, muss auch ein Emissionsfaktor für die Batterieladung außerhalb des SAP-Firmengeländes definiert werden. Laut der empirischen Erhebung [9] haben 21 % der Ladevorgänge im Rahmen der wochenweisen Überlassung der Elektrofahrzeuge nicht an SAP-eigenen Ladestationen stattgefunden, so dass die Annahme getroffen wird, dass 20 % der Energie für das Nutzungsszenario „wochenweise Überlassung“ zuhause oder an anderen Ladestationen geladen wurde. Als konservative Annahme – also unter der Annahme, dass keine Grünstrom-Produkte verwendet werden – wird in der durchgeführten CO₂-Bilanzierung dafür der aktuellste Emissionsfaktor des Strommixes (2010) für Deutschland angesetzt.

Um die Emissionseinsparungen des Flottenversuchs Future Fleet bestimmen zu können, müssen die Emissionen der Basisentwicklung ohne Elektromobilität bekannt sein. Zur Ableitung eines mittleren CO₂-Emissionsfaktors der heutigen SAP-Dienstwagenflotte (Abbildung 7) werden die Kraftstoffverbräuche und Emissionsfaktoren gemäß Tabelle 9 ebenso wie die Bestandsstruktur der Dienstwagenflotte verwendet.

Tabelle 9: Verbrauch und CO₂-Intensität konventioneller Fahrzeuge (Annahmen für Flottenversuch Future Fleet)

Fahrzeuggröße	Otto-Motor			Diesel-Motor		
	Verbrauch [l/100 km]	CO ₂ -Intensität [g CO ₂ /l]	Emissionsfaktor [g CO ₂ /km]	Verbrauch [l/100 km]	CO ₂ -Intensität [g CO ₂ /l]	Emissionsfaktor [g CO ₂ /km]
klein	5,9	2.683	159	3,9	2.871	111
mittel	7,5	2.683	200	5,4	2.871	156
groß	10,1	2.683	272	7,3	2.871	209

Die Kraftstoffverbrauchsdaten der konventionellen⁴ Fahrzeuge wurden aus den Daten der in Deutschland neu zugelassenen Pkw⁵ abgeleitet und – da diese in einem standardisierten Fahrzyklus erhoben werden, der nicht den realen Verbräuchen entspricht – mit einem Zuschlag von 10 % versehen. Die CO₂-Intensität wird basierend auf den Angaben zu Flüssigkraftstoffen in TREMOD Version 5 [10] berechnet und berücksichtigt eine 4-prozentige Beimischung von Ethanol zu Benzin bzw. eine 7-prozentige Beimischung von Biodiesel zum Dieselmotorkraftstoff.

⁴ Konventionelle Fahrzeuge (CV) besitzen einen Verbrennungsmotor und werden entweder mit Benzin oder mit Dieselmotorkraftstoff betrieben.

⁵ www.kraftfahrtbundesamt.de

Ein weiterer Faktor zur Bewertung des Umweltnutzens des Flottenversuchs ist die Veränderung des Mobilitätsverhaltens während der Nutzung des Elektrofahrzeugs. Dafür wurden die Feldtestteilnehmer im Rahmen der „wochenweisen Überlassung“ für eine Woche aufgefordert ein Mobilitätstagebuch zu führen. Im Mobilitätstagebuch sollten die Nutzer alle Touren⁶ eines Tages mit Wahl des Verkehrsmittels und der Strecke der Tour auflisten. Während der Nutzung des batterieelektrischen Fahrzeugs sollte zudem die Wegstrecke, die andere Personen mit dem elektrischem Fahrzeug zurückgelegt haben, mit aufgeführt werden, damit die gesamte Fahrleistung des elektrischen Fahrzeugs in der Testwoche im Mobilitätstagebuch abgebildet ist.

Um Aussagen über eine mögliche Veränderung des Mobilitätsverhaltens mit der Nutzung eines batterieelektrischen Pkw treffen zu können, mussten die Feldtestteilnehmer nicht nur während der Testwoche des elektrischen Fahrzeugs ein solches Mobilitätstagebuch führen. Bereits in der 3. Kalenderwoche 2011 (17. bis 23. Januar 2011) – noch vor Ausgabe der ersten Fahrzeuge – waren alle Teilnehmer für eine Woche zusätzlich vorab aufgefordert, ein Mobilitätstagebuch zu führen.

Die im Durchschnitt in den Mobilitätstagebüchern aufgeführten Wegstrecken der Feldtestteilnehmer vor Start der Elektrofahrzeugnutzung und im Rahmen der wochenweisen Überlassung sind in Tabelle 10 aufgeführt. Deutlich erkennbar ist die stark verringerte Nutzung des Dienstwagens während der Zeit mit einem batterieelektrischen Fahrzeug. Gleichzeitig steigt die Fahrleistung der zusätzlich im Haushalt befindlichen Privatwagen, so dass eine Verlagerung in der Verkehrsmittelwahl eindeutig zu erkennen ist. Insgesamt liegt die Fahrleistung mit dem Dienst- und dem Privatwagen bei Nutzung eines batterieelektrischen Fahrzeugs 15 % unter den mit den Pkw zurückgelegten Distanzen in der 3. Kalenderwoche 2011 und der Anteil der Privatwagennutzung an der Fahrleistung steigt von 3 % auf 32 %.

Tabelle 10: Fahrleistung der Feldtestteilnehmer vor und während der wochenweisen Überlassung

Woche	Fahrleistung Dienstwagen [km]			Fahrleistung Privatwagen [km]		
	Werktag	Samstag	Sonntag	Werktag	Samstag	Sonntag
KW 3 2011	40	56	42	1	1	2
Testwoche	30	16	10	6	21	29

Zu dem aufgeführten Vergleich der Fahrleistungen ist allerdings noch anzumerken, dass dies kein repräsentativer Vergleich ist, da unterschiedliche Wochen des Jahres miteinander verglichen werden. Bei niedrigen Temperaturen ist generell davon auszugehen, dass mehr

⁶ Definition Tour: Eine Tour ist eine geschlossene Wegekette mit Start und Ziel zuhause. Sie kann mehrere Wegezwecke besitzen; Hauptverkehrsmittel ist das Verkehrsmittel, mit welchem die größte Wegstrecke zurückgelegt wird.

Wegstrecken mit dem Fahrzeug zurückgelegt werden, so dass die geringere Fahrleistung in den Wochen mit dem batterieelektrischem Fahrzeug zumindest teilweise auch durch eine stärkere Nutzung des Fahrrads und weiterer Verkehrsmittel erklärt werden kann. Weiterhin stellt die Nutzung während der „wochenweisen Überlassung“ keine repräsentative Nutzung als Dienstwagen dar. Es ist davon auszugehen, dass die Nutzer die Elektrofahrzeuge vermehrt in Wochen ohne lange Fahrten genutzt haben, um somit die Reichweitenproblematik zu umgehen. Gleichermäßen besaß die Nutzung eines batterieelektrischen Fahrzeugs eine hohe Wertschätzung bei Bekannten und Freunden der Feldtestteilnehmer [9], so dass mit hoher Wahrscheinlichkeit Wege mit dem Pkw zurückgelegt wurden, die normalerweise mit anderen Verkehrsmitteln zurückgelegt werden. Eine weitere Unsicherheit ergibt sich aus der Tatsache, dass nur die Feldtestteilnehmer selbst zum Mobilitätsverhalten befragt wurden. Um die Verlagerungseffekte umfassend abbilden zu können, hätte zusätzlich eine Befragung des sozialen Umfelds der Feldtestteilnehmer durchgeführt werden müssen.

Trotz der aufgeführten Unsicherheiten bezüglich Verlagerungseffekten im Mobilitätsverhalten bietet die Auswertung der Mobilitätstagebücher die Möglichkeit, grundlegende Veränderungen des Mobilitätsverhaltens beim Einsatz batterieelektrischer Fahrzeug darzulegen. Eine repräsentativere und ausführlichere Vorgehensweise war im Rahmen des Projekts Future Fleet nicht möglich und auch nicht vorgesehen.

Aufgrund des unterschiedlichen Mobilitätsverhaltens in der Woche vor Nutzung der Elektrofahrzeuge und während der wochenweisen Überlassung der batterieelektrischen Fahrzeuge werden zwei Szenarien betrachtet. Im Szenario „Flottenversuch“ werden die CO₂-Emissionen der konventionellen Fahrzeuge mit dem Mobilitätsverhalten der 3. Kalenderwoche 2011 gekoppelt und mit den CO₂-Emissionen der Elektrofahrzeug- und Privatwagennutzung während des Flottenversuchs verglichen, um die Emissionseinsparung zu bestimmen. Anzumerken ist dabei, dass im Flottenversuch die Fahrleistung bei Nutzung der elektrischen Fahrzeuge um 15 % geringer ausgefallen ist als bei Nutzung der konventionellen Fahrzeuge, wodurch sich die Emissionen bereits durch die geringere Fahrleistung vermindern.

Das zweite Szenario „Anpassung“ geht davon aus, dass bei Besitz eines batterieelektrischen Fahrzeugs dieselben Strecken zurückgelegt werden müssen wie mit einem konventionellen Fahrzeug. Daher wird die Fahrleistung der batterieelektrischen Fahrzeuge und der Privatwagen für dieses Szenario an die Fahrleistung aus der Vorher-Befragung der 3. Kalenderwoche 2011 angepasst, so dass der Emissionsminderungseffekt durch eine verringerte Fahrleistung vermieden wird. Dafür wurde in der Vorher-Befragung für die Dienstwagen der Fahrleistungsanteil für Touren über 200 km bestimmt⁷, da davon auszugehen ist, dass solche Touren nicht mit dem verwendeten batterieelektrischen Pkw zu bewältigen sind. Nach Abzug der Fahrleistung dieser langen Touren von der täglichen Fahrleistung der Dienstwagen stellt dies im Szenario „Anpassung“ die Fahrleistung der elektrischen Pkw dar. Die restliche Fahrleistung aus der Vorher-Befragung wird in diesem Szenario mit Privatwagen zurückgelegt. In diesem Szenario sind für den Vergleich zwischen konventioneller und elektrischer Fahrzeugnutzung

⁷ Fahrleistungsanteil von Touren > 200 km: Werktag: 15 %, Samstag: 43 %, Sonntag: 42 %

dieselbe Fahrleistung sowie eine Verlagerung zu Fahrten mit dem Privatwagen hinterlegt. Zudem wird gemäß der Anpassung von der maximal möglichen Nutzung des batterieelektrischen Fahrzeugs ausgegangen.

Tabelle 11: Annahmen zur CO₂-Bilanz für Future Fleet

Eigenschaft	Inkl. aller Verluste		Optimiertes System	
	Flottenversuch	Anpassung	Flottenversuch	Anpassung
Ladewirkungsgrad [%]	82	82	82	82
Gesamtwirkungsgrad SAP-Ladestation [%]	55	55	82	82
Gesamtwirkungsgrad sonstige Ladestation [%]	74	74	82	82
Fahrleistung Dienstwagen [km / Woche]	176	226	176	226
Fahrleistung Privatwagen [km / Woche]	82	78	82	78
Anteil Fahrleistung Privatwagen [%]	32	26	32	26
Verbrauch Diesel-Heizung [l]	73	86	73	86
Fahrleistung Backup/Werkstatt [km]	5.441	5.441	0	0

Für beide beschriebenen Szenarien wird zudem eine Betrachtung inklusive aller im Flottenversuch aufgetretenen Verluste sowie eine Betrachtung von batterieelektrischen Fahrzeugen in einem optimierten System vorgestellt. Dieser Weg wird gewählt, da einige energetischen Verluste auf den derzeitigen Stand der Technik und den Erfahrungsstand im Umgang mit Elektromobilität zurückzuführen sind und in Zukunft vermieden werden können. Daher entspricht bei dieser Betrachtung der Gesamtwirkungsgrad für einen Ladevorgang exakt dem Ladewirkungsgrad, so dass Verluste durch Erhaltungsladungen und sonstige energetischen Verbraucher vernachlässigt werden. Weiterhin wird bei der Betrachtung eines optimierten Systems davon ausgegangen, dass keine Fahrten für die Nutzungsarten „Backup“ und „Werkstatt“ auftreten.

Um die Emissionen der Nutzung des Privatwagens in der CO₂-Bilanz berücksichtigen zu können, wird die Größenklassen- und Antriebtypstruktur der Privatwagen benötigt. Diese Struktur wird aus der empirischen Untersuchung MiD 2008 abgeleitet, indem die Annahme getroffen wird, dass die dort aufgelisteten, gewerblich zugelassenen Fahrzeuge repräsentativ für die Dienstwagenflotte in Deutschland sind. Die für die Bilanzierung angesetzte Größenklassen- und Antriebsstruktur von Privatwagen (Tabelle 12) wird folglich aus den in der MiD 2008 vorkommenden Pkw abgeleitet, die zwar zu einem Haushalt mit mindestens einem Dienstwagen gehören, selbst aber privat zugelassen sind. Für Fahrten zwischen den verschiedenen SAP-Standorten, für die batterieelektrische Fahrzeuge aus einem Fahrzeugpool geliehen werden konnten, wird in der Bilanzierung angenommen, dass diese Fahrten ansonsten mit einem Dienstwagen durchgeführt worden wären. Daher fließen diese Fahrten in der Bilanzierung mit dem Emissionsfaktor der konventionellen Dienstwagenflotte von SAP ein.

Tabelle 12: Größenklassen- und Antriebtypstruktur Privatwagen

Größenklasse	Otto-Motor	Diesel-Motor
klein	35 %	2 %
mittel	36 %	11 %
groß	10 %	6 %

Abschließend wird noch darauf hingewiesen, dass in den im Flottenversuch genutzten Fahrzeugen keine elektrische Heizung für die Fahrgastzelle vorhanden war. Stattdessen war in den Fahrzeugen eine mit Dieselmotorkraftstoff betriebene Heizung eingebaut. Der Gesamtverbrauch während des Flottenversuchs ist wie die übrigen genannten Annahmen in Tabelle 11 zu einer Übersicht zusammengefasst und wurde im Szenario „Anpassung“ gemäß der Steigerung der elektrischen Fahrleistung erhöht.

3.2 Ergebnisse

Aus der angenommenen Struktur der Dienstwagenflotte von SAP sowie der Privatwagenstruktur der Feldtestteilnehmer lässt sich mit Hilfe der in Tabelle 9 aufgeführten durchschnittlichen Kraftstoffverbräuche und den CO₂-Intensitäten ein Emissionsfaktor für die konventionellen Fahrzeuge bestimmen. Für die elektrisch angetriebenen Pkw lässt sich dieser unter Berücksichtigung der energetischen Lade- und Systemverluste mit dem Emissionsfaktor der Strombereitstellung (Tabelle 7 und Tabelle 8) und den Energieverbräuchen beim Fahren (Tabelle 4) ableiten. In Abbildung 7 sind die so ermittelten Emissionsfaktoren für die Fahrzeugnutzung im Projekt Future Fleet sowohl unter Berücksichtigung aller energetischen Verluste als auch mit der Annahme eines optimierten Systems dargestellt.

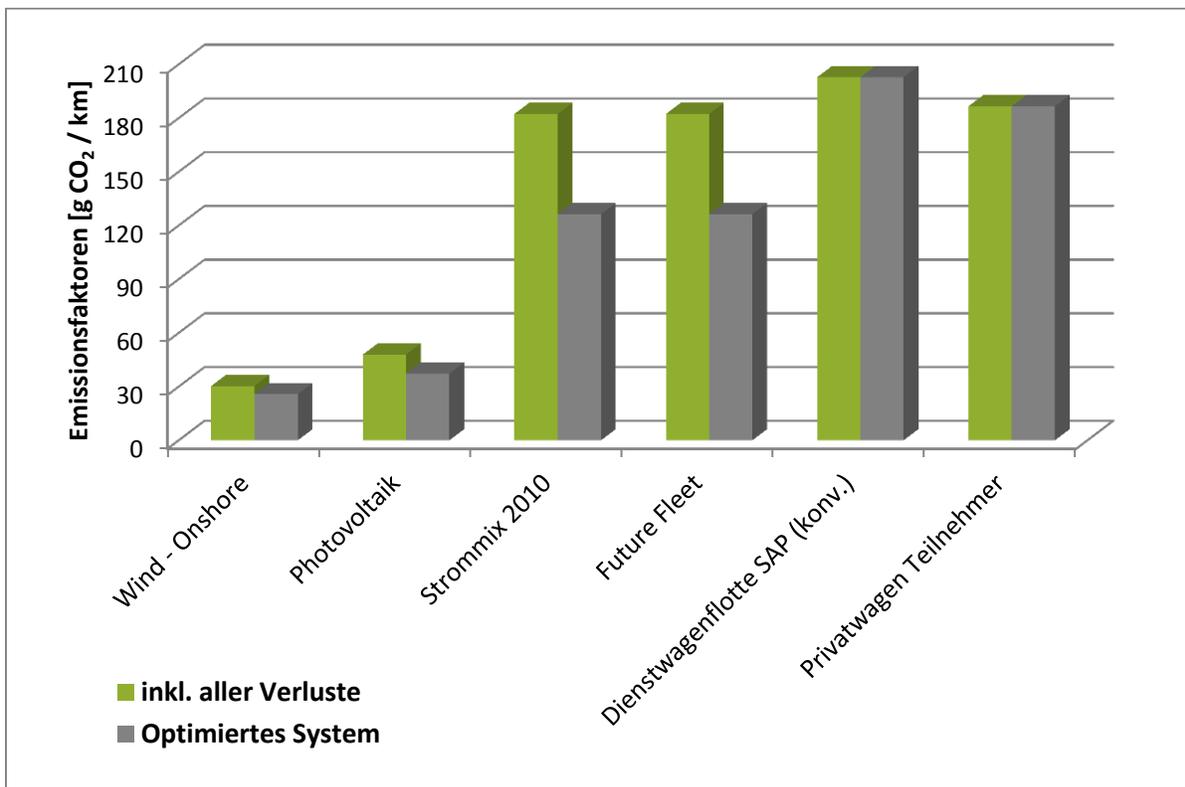


Abbildung 7: Emissionsfaktoren für den Flottenversuch Future Fleet

In der Darstellung ist die Bedeutung der Art der Strombereitstellung für den Umweltnutzen von Elektromobilität deutlich erkennbar. Wird zur Beladung emissionsarmer Strom aus Neuanlagen erneuerbarer Energiequellen eingesetzt, sinkt die CO₂-Belastung auf weniger als 30 g/km. Dieser für den Einsatz erneuerbarer Energien aus Neuanlagen recht hoch anmutende Wert ergibt sich aus der Tatsache, dass für das Nutzungsszenario „wochenweise Überlassung“ die Annahme getroffen wird, dass 20 % der Ladevorgänge an nicht zum Projekt Future Fleet gehörigen Ladestationen durchgeführt werden. Diese Ladevorgänge werden mit dem Emissionsfaktor des Strommixes für Deutschland verrechnet, wodurch sich die Höhe dieses Emissionsfaktors erklären lässt.

Zudem lässt sich aus Abbildung 7 ablesen, dass durch die Elektrofahrzeugnutzung im Projekt Future Fleet selbst unter Berücksichtigung der hohen Systemverluste pro Kilometer weniger CO₂-Emissionen freigesetzt wurden, als mit den Fahrzeugen der heutigen Dienstwagenflotte je Kilometer emittiert werden. Dabei ist allerdings anzumerken, dass ein hoher Anteil der Dienstwagenflotte von SAP aus Fahrzeugen großer Fahrzeugklassen mit hohen spezifischen Emissionen besteht, im Flottenversuch Future Fleet allerdings elektrische Kleinwagen eingesetzt wurden. Unter Berücksichtigung der hohen Systemverluste befinden sich Emissionsfaktoren der batterieelektrischen Pkw im Bereich heutiger, konventioneller Mittelklassefahrzeuge, bei Vernachlässigung der Systemverluste im Bereich heutiger, konventioneller Kleinwagen.

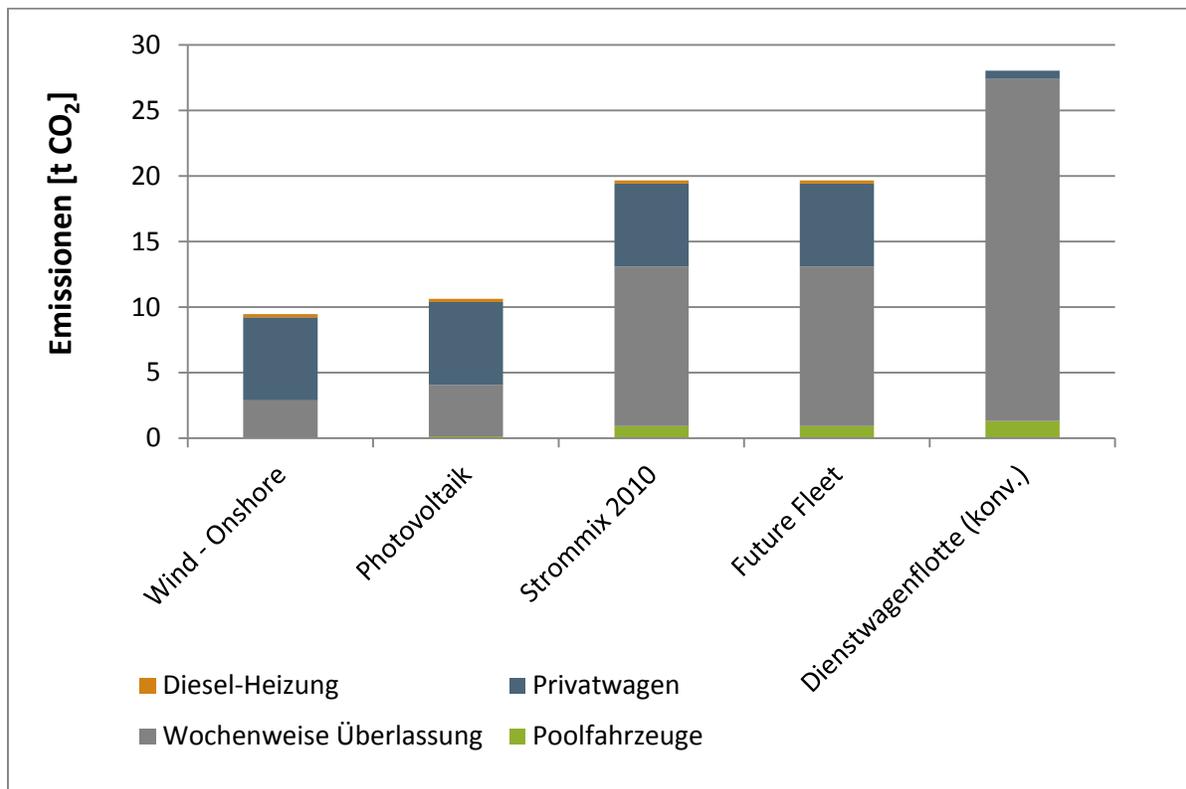


Abbildung 8: Absolute Emissionen Future Fleet (Szenario „Anpassung“, optimiertes System)

Um zu verstehen, aus welchen Quellen die CO₂-Emissionen im Rahmen der betrachteten Szenarien stammen, ist in Abbildung 8 für verschiedene Arten der Strombereitstellung die Verteilung der absoluten CO₂-Emissionsmengen auf die unterschiedlichen Produzenten dargestellt. Diese Abbildung bezieht sich auf das Szenario „Anpassung“ und vernachlässigt energetische Systemverluste. Die geringen Emissionen von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen bei emissionsarmer Strombereitstellung sind in dieser Abbildung klar zu erkennen. Trotz sehr viel höherer Fahrleistung der batterieelektrischen Fahrzeuge sind in diesem Fall die CO₂-Emissionen durch die Verlagerung von Fahrten auf konventionelle Privatfahrzeuge höher als die Emissionen der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge.

Im Fall einer emissionsintensiveren Strombereitstellung – wie beispielsweise während der Fahrzeugnutzung in Future Fleet – erhöhen sich die CO₂-Emissionen erheblich, da sich die auf die Fahrleistung bezogenen Emissionen unter Vernachlässigung der Systemverluste im Bereich heutiger Kleinwagen bewegen. Der im Vergleich zu Verbrennungsmotoren effizientere Energieeinsatz bei Elektroantrieben wird dabei durch die Emissionen bei der Stromproduktion zunichte gemacht.

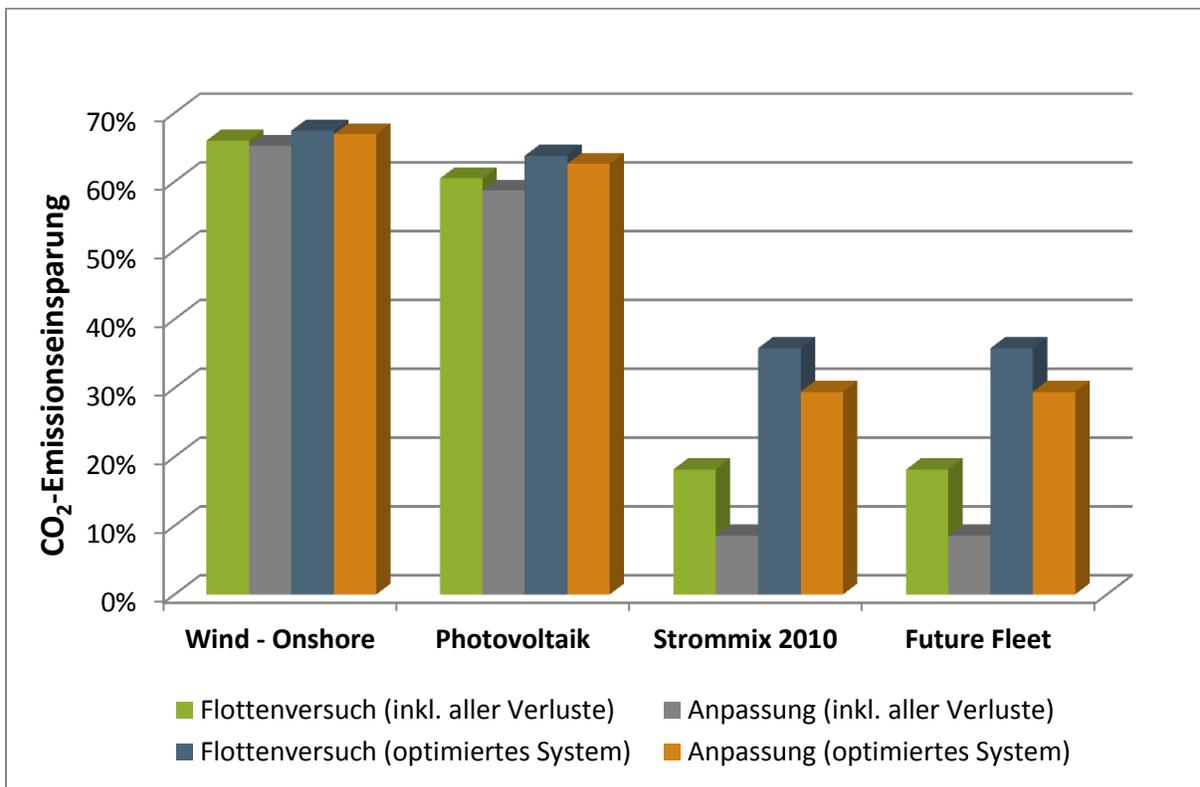


Abbildung 9: Relative CO₂-Emissionseinsparung durch Flottenversuch Future Fleet

Durch den Flottenversuch Future Fleet wurden CO₂-Emissionen eingespart. Die relative Emissionsreduktion durch den Flottenversuch Future Fleet ist in Abbildung 9 für alle in Abschnitt 3.1 vorgestellten Szenarien dargestellt. Durch die geringere Fahrleistung in der E-Pkw Testwoche (Tabelle 10) und die im Vergleich zur Dienstwagenflotte geringeren spezifischen Emissionen der batterieelektrischen Fahrzeuge (Abbildung 7) wurde im Flottenversuch eine CO₂-Emissionsreduktion von fast 20 % erzielt. In einem optimierten System mit geringen und daher vernachlässigbaren Systemverlusten sowie bei einer Anpassung an die gewöhnliche Fahrleistung, d.h. in einem Szenario, das einer Praxisituation entsprechen könnte, ergibt sich bei gleichem Strombezug eine relative CO₂-Emissionseinsparung von fast 30 %. Das hohe Potenzial von Elektromobilität für einen Beitrag zu Emissionsminderungen im Verkehrssektor ist deutlich bei der Kalkulation mit emissionsarmen Arten der Strombereitstellung zu erkennen. Hier steigt die potenzielle Emissionsminderung auf über 60 %.

4 Szenarien für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in Dienstwagenflotten

Im Gegensatz zu Abschnitt 3 wird in diesem Abschnitt nicht konkret auf den Flottenversuch Future Fleet Bezug genommen. Die Erkenntnisse aus dem Flottenversuch werden in Verbindung mit Annahmen zur weiteren Entwicklung im Umfeld der Elektromobilität allerdings zu einer Abschätzung zukünftiger Markt-, aber auch Umweltentlastungspotenziale verwendet. Für die Betrachtung der CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen genügt es dabei nicht mehr, den konkreten Strombezug eines Kunden zu betrachten. Elektromobilität wird bei einer hohen Marktdurchdringung im Stromsystem vielmehr die Rolle eines flexiblen Nachfragers einnehmen, so dass die Nutzung von Elektrofahrzeugen und deren Umweltentlastungspotenziale in den Kontext des gesamten Stromsystems eingeordnet werden müssen. Darauf wird in Abschnitt 4.1 eingegangen.

Die Anschaffung eines elektrisch angetriebenen Pkw wird auch in den Jahren bis 2030 im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit höheren Anschaffungskosten verbunden sein. Durch die hohe Effizienz der Elektroantriebe und die geringen Strombezugskosten werden elektrische Fahrzeuge allerdings geringere Betriebskosten aufweisen. Da die Kosten für die Fahrzeugnutzung eine entscheidende Größe beim Fahrzeugkauf sind, wird in den Analysen in diesem Kapitel unter anderem ein Total Cost of Ownership-Modell (TCO-Modell) eingesetzt, welches sowohl die Anschaffungs- als auch die Betriebskosten eines Fahrzeugs berücksichtigt und in Abschnitt 4.2 detailliert betrachtet wird.

Bevor in den Kapiteln 4.4 und 4.5 auf mögliche Entwicklungspfade für Elektromobilität im Unternehmen SAP und für die Dienstwagenflotte in Deutschland eingegangen wird, ist in Abschnitt 4.3 das methodische Vorgehen für die Abschätzungen in diesen Kapiteln vorgestellt.

4.1 Wechselwirkung zwischen Elektromobilität und Strommarkt

Um zukünftige CO₂-Minderungspotenziale für eine verstärkte Marktdurchdringung von E-Pkw in Firmenflotten bzw. als Dienstwagen ausweisen zu können, reicht es nicht mehr aus, einfach einen durchschnittlichen Emissionsfaktor für den Strommix anzusetzen. Denn laut Ziel der Bundesregierung werden in 2020 eine und im Jahr 2030 sechs Millionen Elektrofahrzeuge zusätzlichen Strom benötigen. Für die Frage, wie hoch die CO₂-Emissionen des Fahrstroms dann sind, ist bei diesem Zusatzbedarf entscheidend, welcher Strom für diese neuen Verbraucher zusätzlich produziert werden muss. Zur Berechnung der Emissionen muss daher verglichen werden, wie der Kraftwerkseinsatz mit und ohne Elektrofahrzeuge aussieht. Um

hierzu genaue Aussagen treffen zu können, muss zum einen die zusätzliche Stromnachfrage durch die elektrischen Fahrzeuge und zum anderen der Strommarkt zeitlich aufgelöst modelliert werden. Das Vorgehen hierzu ist im folgenden Kapitel dargestellt.

4.1.1 Strommarktmodellierung und Merit Order

Elektrofahrzeuge werden in Zukunft durch die Aufladung der Fahrzeugbatterien eine neue Last im Stromsystem Deutschlands darstellen. Für die Frage, in welchen Kraftwerken und aus welchen Energieträgern der Strom für die Elektrofahrzeuge produziert wird, sind die Marktmechanismen der Strombörse maßgeblich. Der entscheidende Marktmechanismus am Spotmarkt der Strombörse EEX ist die Merit Order, mit deren Hilfe stündlich bestimmt wird, aus welchen Kraftwerken der Strom zur Lastdeckung bereitgestellt wird (Abbildung 10).

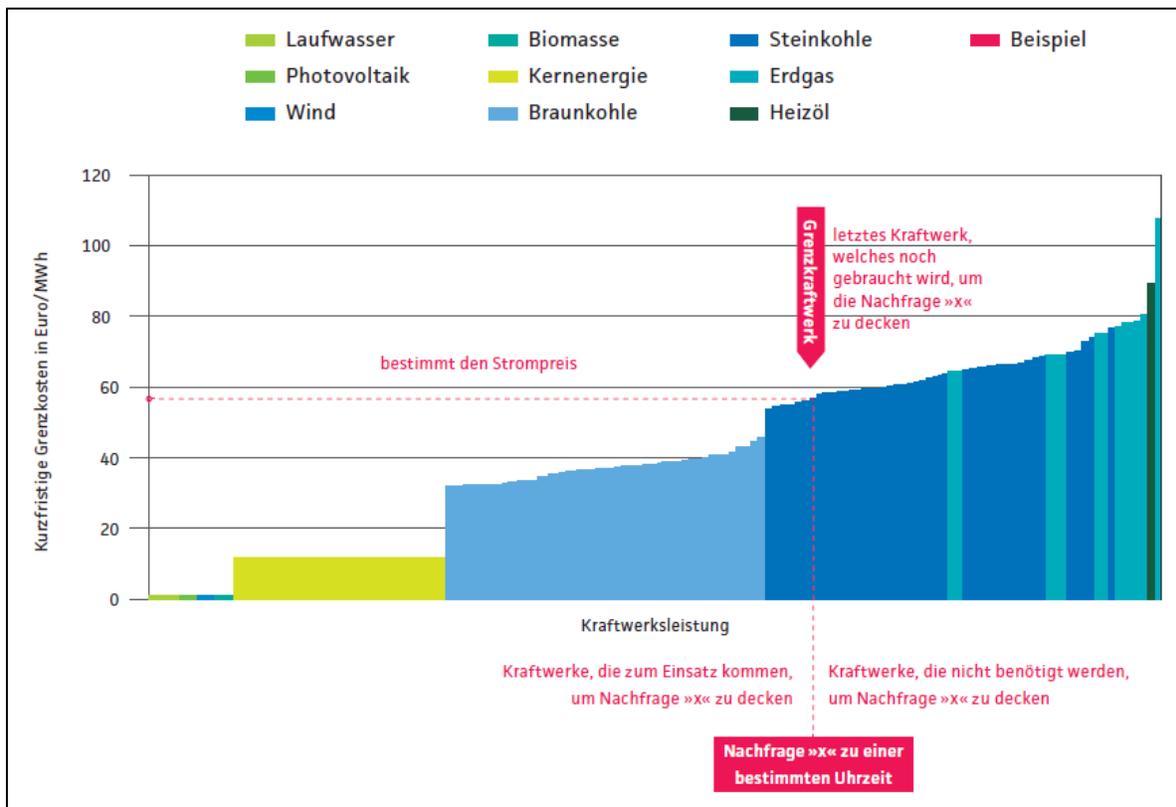


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Merit Order

Die Energieerzeuger bieten am Spotmarkt der EEX stündlich Strom aus ihren Kraftwerken zu einem bestimmten Preis an, wobei dieser Preis hauptsächlich aus den Brennstoff-, den CO₂-Zertifikats- und den sonstigen variablen Betriebskosten - zusammengefasst in den kurzfristigen Grenzkosten - der einzelnen Kraftwerke besteht. Aus diesen Angeboten der Energieerzeuger wird darauf eine aufsteigende Kostenreihenfolge - die Merit Order - aufgestellt. Das letzte

Kraftwerk, das zur Befriedigung der Lastnachfrage benötigt wird, ist das so genannte Grenzkraftwerk. Strom wird nun in allen Kraftwerken, die einen niedrigeren Preis als das Grenzkraftwerk für die jeweilige Stunde geboten hatten, produziert, wobei an alle produzierenden Kraftwerke der Preis des Grenzkraftwerks ausbezahlt wird.

Die niedrigsten kurzfristigen Grenzkosten weisen die erneuerbaren Energien auf, weshalb sie, wenn sie zur Verfügung stehen, in der Merit Order generell noch vor den Atomkraftwerken gehandelt werden. Braunkohlekraftwerke folgen in der Merit Order dem Strom aus Atomkraftwerken, und Steinkohlekraftwerke produzieren Strom (außer im Vergleich zu sehr modernen Gaskraftwerken) billiger als herkömmliche Gaskraftwerke. Heizölkraftwerke werden nur in absoluten Spitzenzeiten zur Stromerzeugung eingesetzt.

Entsprechend der nachgefragten Last ergibt sich aus der Merit Order heute folgendes Bild: In Niedriglastzeiten (vor allem nachts) wird der benötigte Strom vor allem in den sogenannten Grundlastkraftwerken, den Atom- und Braunkohlekraftwerken, erzeugt. Steigt die Last morgens und abends, werden Steinkohlekraftwerke zusätzlich eingesetzt und stellen das Grenzkraftwerk, und nur in Spitzenlastzeiten werden Gaskraftwerke und gegebenenfalls Heizölkraftwerke hinzugeschaltet.

Stehen in Zukunft allerdings vermehrt erneuerbare Energien zur Verfügung, wird sich die Merit Order und der Kraftwerkstyp des Grenzkraftwerks in den einzelnen Stunden ändern, da die erneuerbaren Energien sich am billigen Ende der Merit Order einordnen und damit teurere konventionelle Kraftwerke aus dem Markt drängen werden. Steht nachts viel Windstrom zur Verfügung, wird dadurch weniger Braunkohlestrom zur Lastdeckung verwendet werden; scheint tagsüber die Sonne, werden weniger Steinkohle- und Gaskraftwerke zum Einsatz kommen.

Um den Einfluss von Elektromobilität auf den Strommarkt und damit auf den Kraftwerkseinsatz für Elektrofahrzeuge bewerten zu können, wurde das Strommarktmodell PowerFlex angewendet, das über ein Modul zur detaillierten Abbildung von Elektromobilität verfügt [11]. In diesem Modell werden durch Minimierung der Zielfunktion die kurzfristigen Stromerzeugungskosten über ein Jahr minimiert, so dass stündlich die Merit Order abgebildet wird.

Als Eingangsgröße werden für die Simulation mit PowerFlex der Kraftwerkspark, die kurzfristigen Grenzkosten der Kraftwerke und die Stromnachfrage benötigt (Abbildung 11). Der Kraftwerkspark wird mit Hilfe des Kraftwerksinvestitionsmodells ELIAS bestimmt und orientiert sich für den Ausbau der erneuerbaren Energien an der Leitstudie 2010 [12] des BMU. Die den Simulationsläufen zugrunde gelegten Kosten für den Betrieb eines Kraftwerks sind der Studie [13] entnommen und die Lastnachfrage entspricht den Annahmen aus [14], wobei sich die zeitliche Auflösung an historischen Daten des Jahres 2008 orientiert [15].

Das Modul Elektromobilität des Modells PowerFlex ermöglicht die Integration des Stromverbrauchs für die Batterieladung in die abgebildete Stromnachfrage. Dafür müssen als Eingangsgrößen die Anzahl, die Nutzung und der Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge sowie

die Ladeleistung an verschiedenen Standorten an das Modell weitergegeben werden. Zudem kann in dem Modul für Elektromobilität zwischen einer festgelegten Stromnachfrage und einer Ladung mit Lademanagement unterschieden werden, bei dem das Modell über die Ladezeiten der Elektrofahrzeuge entscheidet. Die festgelegte Stromnachfrage ergibt sich aus einem Ladeverhalten ohne Lademanagement, d.h. die Fahrzeugbatterien werden geladen, sobald sich ein Fahrzeug an einem Standort mit Lademöglichkeit befindet. Das Lademanagement sorgt dagegen für ein preisoptimiertes Ladeverhalten, indem PowerFlex die Ladung der Elektrofahrzeuge gemäß der angegebenen Standorte und Energieverbräuche in preisgünstige Stunden verschiebt.

Die Ergebnisgrößen sind der Kraftwerkseinsatz und die durch die Merit Order bestimmten Strompreise für die Stromerzeugung, die jeweils in stündlicher Auflösung ausgegeben werden. Mit Hilfe des Kraftwerkeinsatzes ist folglich darstellbar, welche und wie viel Brennstoffe in jeder Stunde für die Stromerzeugung eingesetzt werden und welche Menge CO₂ dabei freigesetzt wird. Zudem wird durch das Modul Elektromobilität das Ladeprofil der Elektrofahrzeuge in stündlicher Auflösung bestimmt.

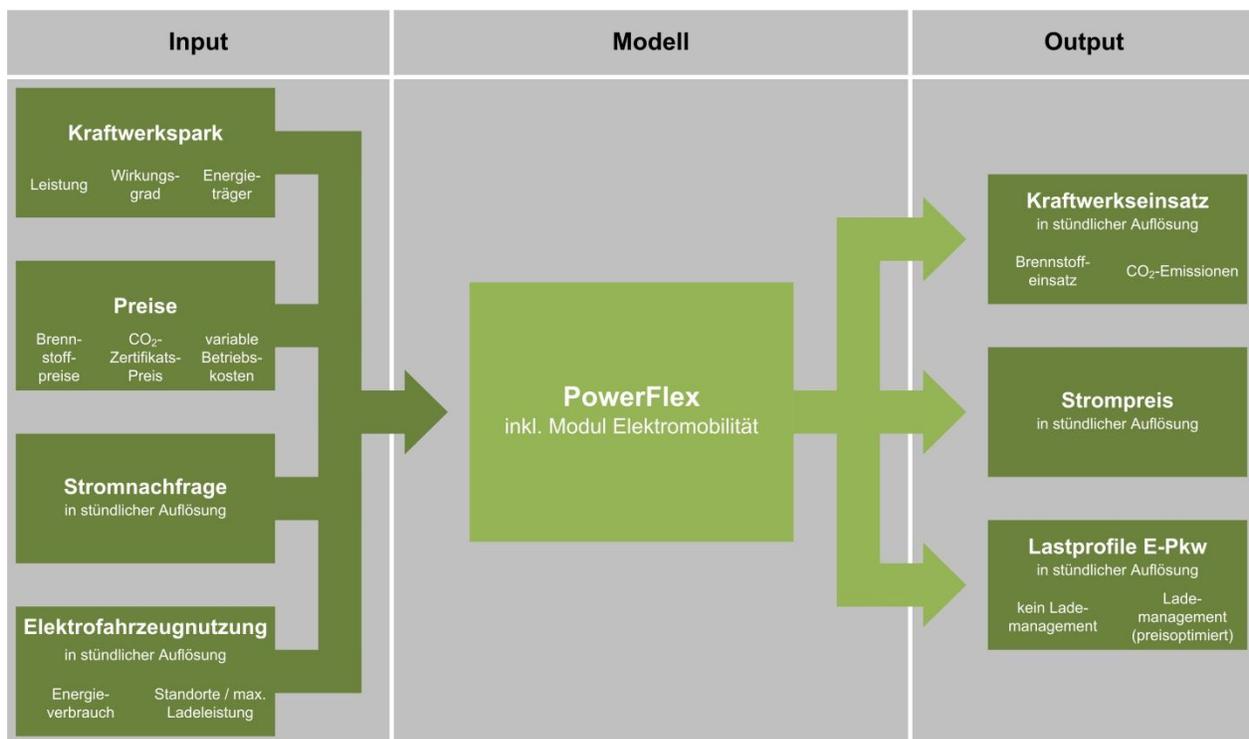


Abbildung 11: Modellschema PowerFlex

Abschließend ist für das Modell PowerFlex noch anzumerken, dass das Stromsystem Deutschlands mittels der Merit Order nur zeitlich aufgelöst simuliert wird. Eine örtliche Auflösung

der Strombereitstellung und –nachfrage ist genauso wenig gegeben wie eine Abbildung des Übertragungs- und Verteilnetzes in Deutschland. Eine Abregelung bestimmter Stromerzeugungskapazitäten und die zeitliche Verschiebung bestimmter Stromnachfragemengen aufgrund regionaler bzw. lokaler Netzüberlastung werden mit PowerFlex daher nicht abgebildet.

4.1.2 Marktentwicklung und Fahrprofile von Elektro-Pkw

Für die Bestimmung der Eingangsgrößen in das Modell PowerFlex ist es notwendig, Abschätzungen zur zukünftigen Zahl an Elektrofahrzeugen zu treffen. Zudem benötigt PowerFlex die Information, wie viele Fahrzeuge zu welcher Uhrzeit an welchem Ort stehen und wie viel Energie durch die Fahrzeugnutzung wann verbraucht wird. Eine detaillierte Beschreibung der Modellierung zur Ableitung dieser Daten ist in [16] zu finden. An dieser Stelle soll hierzu nur eine kurze Zusammenfassung gegeben werden.

Grundlage für die Bestimmung einer Marktentwicklung bis zum Jahr 2030 sind die zukünftigen Rahmenbedingungen für Elektromobilität. Im Rahmen von Expertendiskussionen und durch Literaturlauswertung werden Annahmen für die technologische Entwicklung von Elektrofahrzeugen und der Ladeinfrastruktur sowie für die Entwicklung von Kraftstoff- und Strompreisen und der Herstellungskosten von Pkw getroffen. Diese Annahmen werden ebenfalls für die Potenzialabschätzungen des Kapitels 4 verwendet und sind detailliert im Anhang A zu finden.

Zudem wird für die Ableitung der Marktentwicklung angenommen, dass sich das Mobilitätsverhalten in den Jahren bis 2030 nicht erheblich verändert. Durch diese Annahme können die empirischen Erhebungen Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2002 (KiD 2002) [17] und MiD 2008 [5] als Basis für das Mobilitätsverhalten der Jahre 2020 und 2030 verwendet werden.

Im Rahmen der Studie [16] wird die mögliche Marktentwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen detailliert analysiert. Als Grundlage dieser Analyse wird die MiD 2008 verwendet, für die alle Mitglieder von rund 26.000 Haushalten über ihr Mobilitätsverhalten an einem Stichtag befragt wurden. In Verbindung mit den im Anhang dargestellten Annahmen zu Elektromobilität lässt sich daraus ein theoretisches Maximalpotenzial für privat und für zum Haushalt gehörige gewerblich zugelassene Fahrzeuge (Dienstwagen) ableiten. Dieses Potenzial stellt unter Annahme eines gleich bleibenden Mobilitätsverhaltens die Obergrenze der Marktentwicklung für batterieelektrische Fahrzeuge dar.

Entscheidend für die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen ist allerdings die Akzeptanz für elektrisch angetriebene Fahrzeuge. Um dies zu berücksichtigen wurde in [11] eine Conjoint-Analyse mit ca. 1.500 potenziellen Neuwagenkäufern durchgeführt, in der eine Marktsituation für Fahrzeuge verschiedener Antriebstypen simuliert wurde. Die für unterschiedliche Fahrzeugklassen realisierte Analyse ermöglicht die Bestimmung der Akzeptanz für batterieelektrische Fahrzeuge und wird unter Berücksichtigung des vorher bestimmten

Maximalpotenzials genutzt, um die Marktentwicklung batterieelektrischer Fahrzeuge abzubilden.

Im Gegensatz zur MiD 2008 ist in der KiD 2002 „nur“ das Mobilitätsverhalten gewerblich zugelassener Fahrzeuge abgebildet. Unter Annahme derselben Rahmenbedingungen wie bei der Analyse der MiD 2008 lässt sich daraus für gewerblich genutzte Servicefahrzeuge ein Maximalpotenzial an batterieelektrischen Fahrzeugen abbilden. Für die Akzeptanzanalyse wurde eine Unternehmensbefragung durchgeführt und die Fahrzeugkosten als entscheidende Größe für die Kaufentscheidung von Servicefahrzeugen ermittelt. Daher wird die Akzeptanz für batterieelektrische Fahrzeuge in diesem Fall anhand einer Total Cost of Ownership-Betrachtung abgeleitet.

Abschließend wird in [16] in Hinblick auf die Marktentwicklung berücksichtigt, dass sich der Markt für Elektrofahrzeuge erst am Anfang befindet und somit noch nicht dieselben Produktionskapazitäten und die Produktvielfalt wie bei verbrennungsmotorischen Pkw zur Verfügung stehen. Diese Eigenschaft ist mit einer dämpfenden Technologiediffusionskurve abgebildet, die aus der Marktentwicklung für Hybridfahrzeuge in den USA abgeleitet wurde [19].

Eine weitere Annahme für die Marktentwicklung ist die Erfüllung der Ziele der Bundesregierung [20] von einer Million bzw. sechs Millionen elektrisch angetriebener Fahrzeuge in den Jahren 2020 / 2030. Da im Rahmen von [16] nur die Marktentwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen detailliert untersucht wird und für die Analyse der Effekte von Elektromobilität auf den Strommarkt der Bestand aller elektrisch angetriebenen Pkw notwendig ist, gilt für die Bestandsentwicklung, dass die zur Zielerfüllung fehlenden elektrischen Fahrzeuge mittels Plug-In-Hybrid-Pkw⁸ erreicht werden (Tabelle 13).

Tabelle 13: Anzahl elektrisch angetriebener Pkw in Strommarktsimulation

Antriebstyp	2020	2030
Batterieelektrische Pkw	77.000	935.000
Plug-In-Hybrid-Pkw	932.000	5.065.000
Gesamt	1.000.000	6.000.000

Neben der Anzahl der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge ist die Fahrzeugnutzung entscheidend für die Zusammensetzung des für Elektromobilität zusätzlich zu produzierenden Stroms. Daher wurden aus dem in den Studien MiD 2008 und KiD 2002 hinterlegtem Mobilitätsverhalten typische Fahrzeugnutzungsprofile abgeleitet. Berücksichtigt werden dabei

⁸ Plug-In-Hybrid-Pkw (PHEV) besitzen einen Elektromotor und einen Verbrennungsmotor als Antrieb, die seriell miteinander verschaltet sind. Die Fahrzeugbatterie erlaubt elektrische Fahrten von kurzer Reichweite. Besitzt die Fahrzeugbatterie keine Energie mehr, kann mit dem Verbrennungsmotor weiter gefahren werden.

die Uhrzeiten und die Fahrleistung mehrerer Fahrten am Tag sowie die Standorte und Standzeiten zwischen diesen Fahrten. Mit Hilfe dieser Fahrzeugnutzungsprofile und den in Anhang A hinterlegten Szenarioannahmen ist PowerFlex in der Lage, die Stromnachfrage der Elektrofahrzeuge zu simulieren und – wenn eingestellt – ein preisoptimiertes Ladeverhalten abzubilden.

Insgesamt sind in der Strommarktmodellierung in [16] 55 Fahrzeugnutzungsprofile hinterlegt. Fünf Profile repräsentieren dabei die batterieelektrischen Servicefahrzeuge, 20 Profile sind für privat zugelassene und als Dienstwagen genutzte batterieelektrische Pkw hinterlegt. Plug-In-Hybrid-Pkw sind durch 30 Profile repräsentiert.

4.1.3 CO₂-Emissionsfaktoren

Eine der Ergebnisgrößen aus dem Strommarktmodell PowerFlex ist der Kraftwerkseinsatz zur Deckung der zeitlich aufgelösten Stromnachfrage. Um die Auswirkungen von Elektromobilität auf den Kraftwerkseinsatz analysieren zu können, wurde für die Jahre 2020 und 2030 zunächst ein Basislauf ohne die zusätzliche Stromnachfrage durch Elektromobilität simuliert. Darauf folgend wurden weitere Simulationsläufe mit Berücksichtigung der Elektromobilität durchgeführt, so dass sich die Auswirkungen von Elektromobilität auf den Kraftwerkseinsatz über die Differenz der Läufe mit und ohne Elektrofahrzeuge ergeben.

Um mit Elektromobilität eine möglichst geringe Menge an CO₂ zu erzeugen, ist es wesentlich, dass die emissionsarmen erneuerbaren Energien in der für Elektromobilität zusätzlich erzeugten Strommenge einen möglichst hohen Anteil ausmachen. Daher wurde neben den vom Investitionsmodell ELIAS bestimmten Kraftwerkspark (s. Seite 49), ein Kraftwerkspark entwickelt, in dem gemäß der von Elektrofahrzeugen nachgefragten Strommenge Erzeugungskapazitäten erneuerbarer Energien zugebaut sind. Die im Vergleich zur Leitstudie 2010 des BMU zusätzlichen erneuerbaren Energiekapazitäten werden in diesem Szenario zu 75 % aus Onshore-Windkraftanlagen und zu 25 % aus Biogasanlagen zur Verfügung gestellt.

Für das Nutzerverhalten wird in diesem Projekt in allen Simulationsläufen angenommen, dass alle Elektrofahrzeugnutzer ihr Fahrzeug mit einer Ladestation verbinden, sobald sie das Fahrzeug nach einer Fahrt abgestellt haben. Zudem wird in allen Simulationsläufen das preisoptimierte Ladeverhalten der Elektrofahrzeuge abgebildet, wodurch die Fahrzeugladung unter Berücksichtigung der Restriktionen durch die Fahrzeugnutzung in möglichst kostengünstige Stunden verschoben wird.

Die Zusammensetzung und die Menge der zusätzlichen Stromnachfrage für Elektromobilität ist in Abbildung 12 für die Jahre 2020 und 2030 dargestellt. Im Vergleich zur gesamten Stromnachfrage ist die Strommenge für Elektromobilität gering und beträgt weniger als 0,5 % bzw. rund 2 % der in den beiden Jahren insgesamt nachgefragten Strommenge. In beiden Simulationsläufen mit einem erneuerbare Energien-Ausbau gemäß der Leitstudie 2010 ist der Anteil erneuerbarer Energien in der zusätzlichen Stromerzeugung gering. Die Integration von ohne Elektromobilität ungenutzten erneuerbaren Energiekapazitäten ist daher recht niedrig. Der

Hauptgrund hierfür liegt in der Tatsache, dass mit den vorliegenden Annahmen bereits ohne Elektromobilität der größte Teil der Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien von der sonstigen Stromnachfrage genutzt wird (Tabelle 14). Ohne weitere Kapazitäten an erneuerbaren Energien kann daher nur ein geringer Teil der für Elektromobilität zusätzlich erzeugten Strommenge durch (ansonsten überschüssige) erneuerbare Energien gedeckt werden.

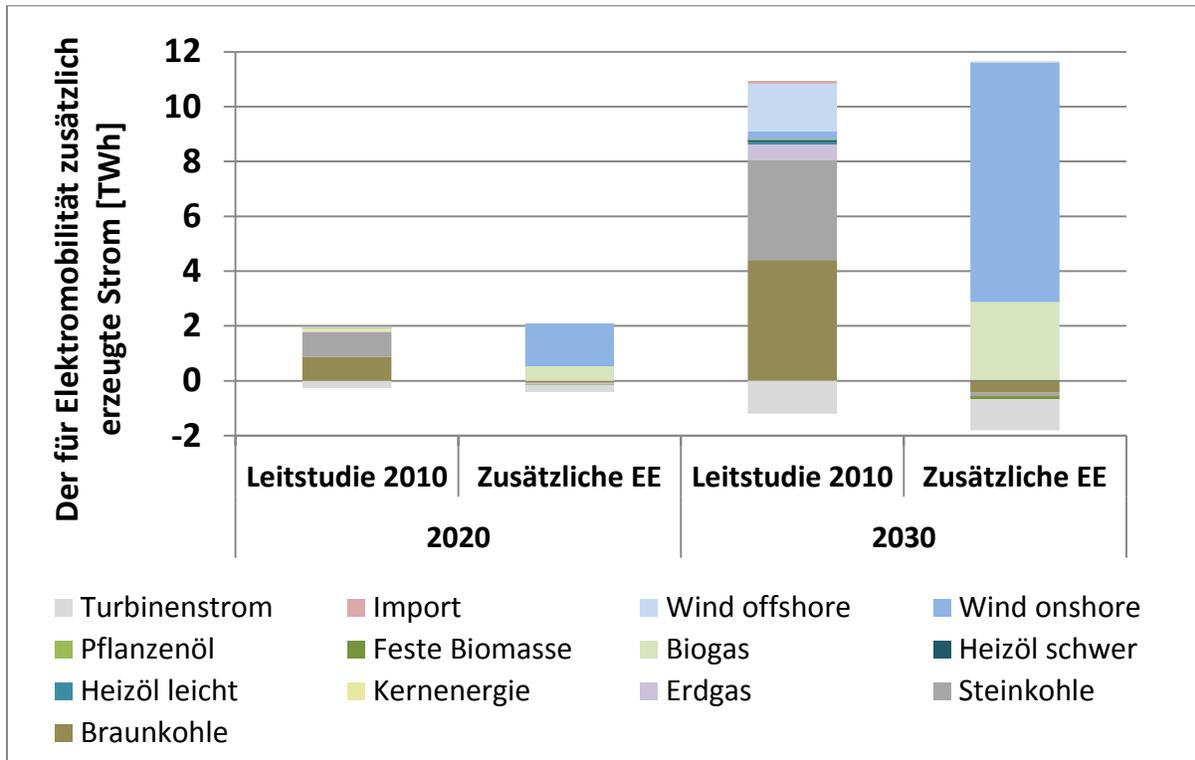


Abbildung 12: Effekt auf Stromerzeugung durch Elektromobilität

Der Großteil der Stromerzeugung für Elektromobilität wird in diesen Szenarien daher durch Braun- und Steinkohlekraftwerke produziert, da diese in der Merit Order am billigeren Ende platziert sind und durch die Verschiebung der Ladezeiten in preisgünstige Stunden häufiger zum Einsatz kommen. Zudem werden die Fahrzeuge häufig über Nacht geladen, in denen das Grenzkraftwerk in der Regel ein Braunkohlekraftwerk ist.

Ein weiteres Merkmal der Einführung von Elektromobilität in den Strommarkt ist bei Berücksichtigung des Lademanagements die geringere Nutzung von Pumpspeicherkraftwerken im Vergleich zum Basislauf ohne Elektromobilität. Da mit Elektrofahrzeugen eine weitere flexible Nachfrageoption in den Strommarkt eingeführt wird und die Ladung der Fahrzeuge nicht mit Kosten verbunden ist, wird die Ladung der Elektrofahrzeuge der Nutzung der Pumpspeicherkraftwerke – wenn mit den Restriktionen durch die Fahrzeugnutzung vereinbar – vorgezogen und die Leistung der Pumpspeicherkraftwerke über das gesamte Jahr verringert.

Tabelle 14: Kennzahlen zu zusätzlicher Stromerzeugung durch Elektromobilität

	2020			2030		
	Basislauf ohne E-Pkw	Leitstudie 2010 + E-Pkw	Zusätzliche EE + E-Pkw	Basislauf ohne E-Pkw	Leitstudie 2010 + E-Pkw	Zusätzliche EE + E-Pkw
Anteil ungenutzter EE [%]	0,15	0,11	0,12	2,49	1,62	2,32
Anteil EE in zusätzlicher Stromerzeugung [%]	-	1,1	107,1	-	18,8	104,7
Emissionsfaktor der zusätzlichen Stromerzeugung [kg CO ₂ / kWh _{el}]	-	0,908	0	-	0,752	0,017

Eine andere Zusammensetzung der Stromnachfrage der Elektrofahrzeuge ergibt sich in den Simulationsläufen mit dem Zubau zusätzlicher erneuerbarer Energien. Die zusätzliche Stromnachfrage wird dabei vollständig durch die zugebauten erneuerbaren Energien gedeckt. Dies ist neben der Tatsache des hohen Anteils ansonsten ungenutzter erneuerbarer Energien auch dem preisoptimierten Lademanagement geschuldet, welches die Batterieladung in preisgünstige – und somit in Zeiträume mit ansonsten ungenutzten erneuerbaren Energien – Stunden verschiebt. Erkennbar ist dabei also, dass der Preis am Spotmarkt der EEX ein geeignetes Signal für eine wenig CO₂-intensive Stromerzeugung für Elektromobilität ist. Voraussetzung dafür ist allerdings ein genügend hoher Anteil an ansonsten nicht in den Strommarkt integrierten erneuerbaren Energien.

In den betrachteten Szenarien mit einem zusätzlichen Zubau von erneuerbaren Energieanlagen ist zudem erkennbar, dass bei der Einführung von Elektromobilität mehr Strom aus erneuerbaren Energiequellen genutzt wird, als für Elektromobilität benötigt wird. Dies ergibt sich aus dem Zubau von Biogasanlagen, die durch die Möglichkeit einer zeitunabhängigen Nutzung einen Teil der Grundlastversorgung übernehmen und somit Braunkohlekraftwerke teilweise aus der Stromproduktion verdrängen.

Abschließend ist noch anzumerken, dass in Kapitel 4 die in Tabelle 14 aufgeführten CO₂-Emissionsfaktoren für die CO₂-Bilanzierung verwendet werden. Damit werden alle Emissionen durch die zusätzliche Stromnachfrage dem Einsatz von Elektrofahrzeugen zugesprochen. Alternativ kann eine CO₂-Bilanz auch mit dem Emissionsfaktor des gesamten Strommixes berechnet werden. In diesem Fall würde die Stromnachfrage der Elektrofahrzeuge genauso wie andere Stromverbraucher behandelt werden. Zur Bewertung des möglichen Umweltnutzens wird allerdings die zuerst angesprochene Variante verwendet, um explizit die Auswirkungen des Einsatzes von Elektrofahrzeugen durch die zusätzliche Stromnachfrage aufzuzeigen.

Weiterhin sind regulatorische Rahmenbedingungen nicht berücksichtigt. Im Rahmen des europäischen CO₂-Zertifikatehandels sind die CO₂-Emissionen europaweit bis ins Jahr 2020 begrenzt. Auch für die Jahre nach 2020 ist mit einer Weiterführung des Zertifikatehandels zu rechnen. Die Verschiebung von Emissionen aus dem Verkehrssektor in den Stromsektor führt zumindest bis 2020 zu verstärkten Emissionseinsparungen in anderen Sektoren, die mit in den europäischen Emissionsrechtehandel involviert sind. Auch hier wird darauf verwiesen, dass durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen zunächst technisch zusätzliche Emissionen entstehen und eine Diskussion über Rahmenbedingungen und Emissionszuordnungen im Rahmen dieses Projektes nicht geführt wird.

4.2 TCO-Betrachtung

Der Preis eines Fahrzeugs ist beim Fahrzeugkauf ein entscheidendes Kriterium für die Fahrzeugauswahl und stellt eine zentrale Größe für Akzeptanz und somit für Marktdurchdringungen neuer Fahrzeugkonzepte dar. Der Anschaffungspreis ist aber nicht die alleinige Größe bei einer Kostenbetrachtung für die Nutzung eines Fahrzeugs. Die während des Betriebs anfallenden Kosten unterscheiden sich je nach Größenklasse, Ausstattung und Antriebstyp, so dass sich in der derzeitigen Marktsituation bei hoher Fahrleistung trotz eines höheren Anschaffungspreises vermehrt für Diesel-Fahrzeuge mit geringeren Betriebskosten entschieden wird. Bei der Einführung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen in den Markt verstärkt sich für Fahrzeugkäufer das Spannungsfeld zwischen hohen Ausgaben zur Anschaffung eines batterieelektrischen Pkw und den geringeren Betriebskosten des Fahrzeugs.

Für gewerblich zugelassene Fahrzeuge und Flottenkunden spielt die Gesamtkostenanalyse des Fahrzeugbesitzes und der Fahrzeugnutzung bereits heute eine bedeutende Rolle [21] beim Fahrzeugkauf. Für gewerbliche Servicefahrzeuge ist die Analyse der Gesamtkosten gemäß einer Unternehmensbefragung in [16] sogar das am wichtigsten eingeschätzte Kriterium bei der Kaufentscheidung. Selbst im privaten Sektor besteht nach [21] vermehrt der Wunsch nach einer Aufschlüsselung der Gesamtkosten der Fahrzeugnutzung.

Um in den Kapiteln 4.4 und 4.5 für die Akzeptanzbetrachtung nicht nur den Kostenvergleich zwischen den Anschaffungskosten von elektrisch und verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen abbilden zu können, wird zusätzlich eine Vollkostenbetrachtung für die in der Betrachtung konkurrierenden Fahrzeugkonzepte angewendet. Das dafür verwendete TCO (Total Cost of Ownership)-Modell wird in diesem Abschnitt vorgestellt und betrachtet neben den Anschaffungs- und Betriebskosten auch die Entsorgung der Fahrzeuge, was in Falle einer Dienstwagenflotte dem Weiterverkauf auf dem Gebrauchtwagenmarkt entspricht.

Durch die Berücksichtigung der Entsorgung bzw. des Wiederverkaufswerts des Fahrzeugs in der Analyse unterscheidet sich die TCO-Betrachtung von einer Cost of Ownership Betrachtung nach [21], in der die Entsorgung bzw. der Weiterverkauf nach der Haltedauer eines Fahrzeugs nicht in die Kostenanalyse mit einfließt. Der Wiederverkaufswert wird genauso wie beispielsweise die Versicherungskosten und Reparaturkosten in der Relevant Cost of Ownership Analyse nach [22] nicht betrachtet, da nach [22] in diesen Kostenkategorien keine

relevanten Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen zu erwarten sind. Da der Wiederverkauf eines Fahrzeugs im Kontext gewerblicher Flotten allerdings ein entscheidendes Kriterium in der Kostenbetrachtung darstellt, wird die Gesamtkostenanalyse im Rahmen des Projektes Future Fleet mit Hilfe eines TCO-Modells – also inklusive dem Wiederverkaufswert – durchgeführt.

4.2.1 Methodik

Die TCO-Modellierung erfolgt für Fahrzeuge unterschiedlicher Antriebstypen. Verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge werden dabei auf Kostenebene mit Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen und rein batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen verglichen. Wie bereits erwähnt, sind für diese Fahrzeugtypen stark unterschiedliche Anschaffungs- und Betriebskosten in der Modellierung hinterlegt. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wird in der Modellierung zudem zwischen Otto- und Diesel-Fahrzeugen unterschieden, da sie unterschiedliche Kostenstrukturen und Restwertentwicklungen aufweisen.

In der TCO-Betrachtung werden die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** schematisch dargestellten Kostenkategorien für alle betrachteten Fahrzeugtypen berücksichtigt. Zur Berechnung der Total Cost of Ownership werden für alle Kostenkategorien mittels Inflationsbereinigung und Diskontierung reelle Barwerte bestimmt. Über Aufsummierung dieser reellen Barwerte über die Haltedauer des Fahrzeugs und alle Kostenkategorien wird schließlich die Total Cost of Ownership bestimmt. Der Wiederverkaufswert geht dabei als negative Kostenkategorie in die TCO ein, da durch den Verkauf der Fahrzeuge ein Erlös erzielt wird. Wird der so bestimmte Wert durch die Gesamtfahrleistung des betrachteten Fahrzeugs dividiert, ergibt sich eine Kostenbetrachtung pro gefahrenen Kilometer.

Im Folgenden wird detailliert auf die Bestimmung des Wiederverkaufswerts der verschiedenen Fahrzeugtypen eingegangen, da der Wiederverkaufswert der Fahrzeuge eine bedeutende Größe für die TCO-Modellierung von Pkw darstellt und gerade bei der Einführung von neuen Fahrzeugkonzepten einer hohen Unsicherheit unterliegt. Daher sollen an dieser Stelle das Vorgehen und die so getroffenen Annahmen möglichst transparent gemacht werden. Die weiteren Annahmen und Rechenschritte zur Bestimmung weiterer Kostenkategorien sind in Anhang B aufgeführt.

Der Wiederverkaufswert eines Pkw hängt von vielen Faktoren ab. Darunter fallen einerseits eher technische Faktoren wie Antriebstyp, Fahrzeugsegment und Kilometerstand, andererseits aber auch emotionale Faktoren wie das Image des Herstellers und des Pkw-Modells sowie der Zustand des Fahrzeugs. Eine Abschätzung der eher emotionalen Faktoren für die Bestimmung des Wiederverkaufswerts eines Fahrzeugs stellt sich als äußerst schwierig dar und ist für die Zukunft schwer prognostizierbar, weshalb auf eine Berücksichtigung dieser Faktoren verzichtet wird.

	Konventioneller Pkw	Plug-In-Hybrid-Pkw	Batterieelektrischer Pkw
Anschaffungskosten	Anschaffungspreis	Anschaffungspreis	Anschaffungspreis
Variable Kosten	Wartung & Pflege		
	Schmierstoffe		Keine Schmierstoffe
Fixkosten	Versicherungen		
	Kfz-Steuer	Kfz-Steuer	Kfz-Steuer-Befreiung
	Haupt- & Abgasuntersuchung		Hauptuntersuchung
Kraftstoffkosten	Benzin/Diesel	Benzin/Diesel + Strom	Strom
Wiederverkaufswert	Wiederverkaufswert	Wiederverkaufswert	Wiederverkaufswert

Abbildung 13: Schema TCO-Modell

Für die Abschätzung des Wiederverkaufswerts konventioneller Pkw wird daher ein an [23] orientiertes Vorgehen gewählt. In [23] wird davon ausgegangen, dass zwei Parameter den Wertverlust eines Fahrzeugs bestimmen (Gleichung 1). Einerseits verliert ein Fahrzeug nach [23] dadurch an Wert, dass es kein Neuwagen mehr ist und von einer anderen Person bereits genutzt wurde. Dieser Effekt ist in Gleichung 1 durch den Faktor a abgebildet. Der zweite Parameter b berücksichtigt die Fahrleistung des Fahrzeugs und mindert den Wert des Fahrzeugs gemäß der Fahrleistung während des Besitzes des Fahrzeugs. RW_{CV} und I_{CV} stellen in Gleichung (1) den Wiederverkaufswert und die Investitionskosten bzw. den Anschaffungspreis der konventionellen Fahrzeuge dar. Für M muss die Jahresfahrleistung in der Einheit km angegeben werden und t gibt die Haltedauer des Fahrzeugs an.

$$RW_{CV} = a * I_{CV} * \left(1 - b \frac{M}{15.000 [km]}\right)^t \quad (1)$$

Da sich der Wiederverkaufswert je nach Segment und Antriebstyp unterschiedlich entwickelt, wurden die Parameter a und b für die betrachteten Größenklassen und Antriebstypen getrennt voneinander bestimmt. Dafür wurden aus der Datenbank [24] jeweils drei typische Pkw herangezogen und deren Restwerte für verschiedene Haltedauern und Jahresfahrleistungen ausgelesen. Die so ausgelesenen Restwerte wurden mittels Methode der kleinsten Fehlerquadrate zur Parameterbestimmung (Tabelle 15) verwendet. An den dargestellten Parametern ist erkennbar, dass der relative Wertverlust durch die Tatsache, dass das betrachtete Fahrzeug kein Neuwagen mehr ist, mit steigender Pkw-Größenklasse zunimmt. Zudem ist der auf die Fahrleistung bezogene, relative Wertverlust bei Fahrzeugen mit einem Otto-Motor höher als bei Diesel-Pkw. Dies kann damit begründet werden, dass Diesel-Motoren robuster und auf höhere Fahrleistungen ausgelegt sind.

Tabelle 15: Parameter zur Restwertbestimmung

Größenklasse	Otto-Motor		Diesel-Motor	
	a	b	a	b
klein	0,7185	0,0955	0,7004	0,0764
mittel	0,6638	0,0829	0,6836	0,0750
groß	0,6454	0,0805	0,6772	0,0773

Für elektrisch angetriebene Fahrzeuge lässt sich die Restwertentwicklung nicht aus empirischen Daten ableiten, da solche Fahrzeuge bisher nur in sehr geringen Stückzahlen auf den Gebrauchtwagenwagenmarkt gelangt sind. Allgemein ist anzumerken, dass die Restwertbestimmung für elektrisch angetriebene Fahrzeuge daher mit großen Unsicherheiten verbunden und beim Kauf eines Fahrzeugs ein großes Investitionsrisiko darstellt.

Zur Bestimmung des Wiederverkaufswerts dieser Fahrzeuge wird daher eine Idee von [25]⁹ aufgegriffen und davon ausgegangen, dass Zweitwagnutzer beim Kauf eines elektrischen Fahrzeugs bereit sind, die zusätzlichen Kosten zu tragen, die sie während der Zweitnutzung gegenüber einem konventionellem Pkw wieder einsparen.

Dafür wird zunächst die Gesamtbetriebsdauer der Fahrzeuge definiert und die Annahme getroffen, dass diese Fahrzeuge nach Ablauf der Lebensdauer keinen Restwert mehr besitzen. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, eine TCO-Betrachtung der Zweitnutzung der Fahrzeuge mit dem definierten Restwert von Null durchzuführen. Somit lässt sich bei vorgegebener Fahrleistung der Zweitnutzung die Differenz der während der Nutzung anfallenden Kosten zwischen einem elektrisch angetriebenen und einem konventionellen Fahrzeug bestimmen. Dieser Wert stellt die Betriebskostensparnis des Zweitwagnutzers beim Besitz eines elektrisch angetriebenen Pkw dar und ist in Gleichung 2 als $\Delta BK_{Zweitnutzer,xEV}$ dargestellt.

$$RW_{xEV} = RW_{CV} + \Delta BK_{Zweitnutzer,xEV} \quad (2)$$

Als Basis für die Restwertbestimmung von Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen wird dabei der Wiederverkaufswert des entsprechenden konventionellen Fahrzeugs gewählt. Für die Bestimmung des Wiederverkaufswert von batterieelektrischen Pkw wird als Basis die Mittelung der Restwerte des Otto- und des Diesel-Fahrzeugs der entsprechenden Größenklasse verwendet, zu der die Betriebskostensparnis des Zweitnutzer hinzuaddiert wird (Gleichung 2). Schematisch ist das Vorgehen zudem in Abbildung 14 dargestellt.

⁹ Persönliches Gespräch mit Dr. Stefan Pfahl

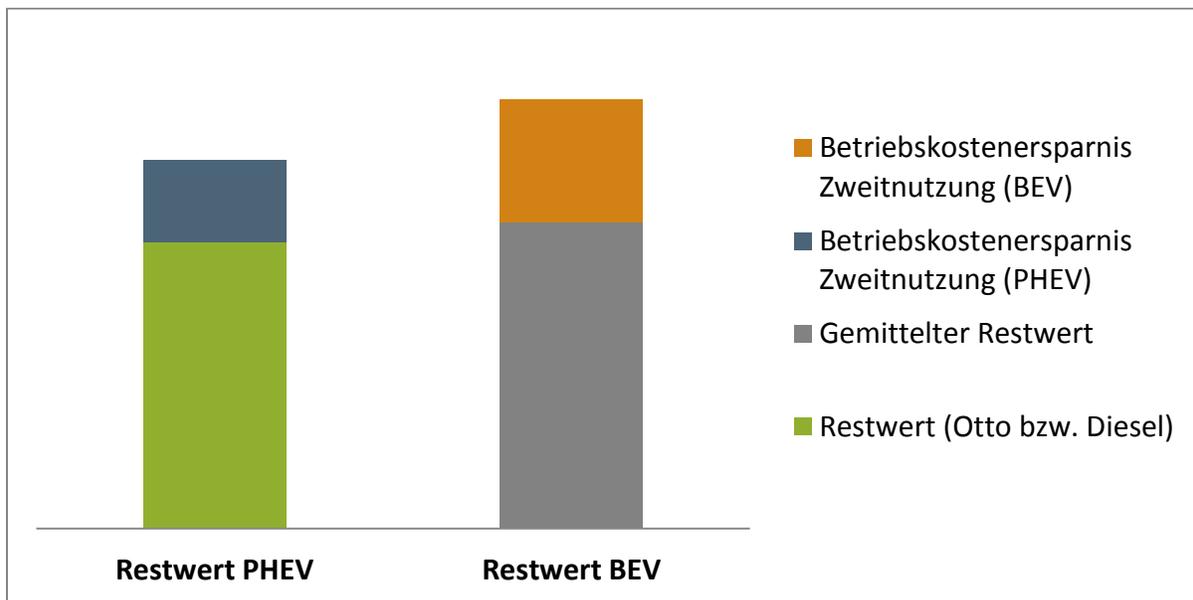


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Restwertbestimmung bei PHEV und BEV

Anzumerken ist die Tatsache, dass durch das beschriebene Vorgehen für elektrische Fahrzeuge eine ähnliche Entwicklung des relativen Wertverlusts der Fahrzeuge angenommen wird wie bei konventionellen Fahrzeugen. Ein höherer Wiederverkaufswert ergibt sich dabei alleine durch die Betriebskostensparnis des Zweitnutzers. Damit ist angenommen, dass die Batterie während der Nutzung keinen Wertverlust erleidet, da sie bis zum Ende der angenommenen Gesamtbetriebsdauer für die Nutzung des Fahrzeugs eingesetzt werden kann. Es ist also keine stärkere Degradation der Batteriekapazität angenommen und eine akzeptable Reichweite wird bis zum Ende der Lebensdauer der Batterie ermöglicht.

4.3 Methodisches Vorgehen für die Szenarienentwicklung

In den beiden folgenden Abschnitten werden mögliche Entwicklungspfade für elektrische Fahrzeuge im Unternehmen SAP und in der Dienstwagenflotte in Deutschland dargestellt. Zudem wird auf die Umweltentlastungspotenziale eingegangen, die durch die Einführung von elektrischen Fahrzeugen erreicht werden können. Das methodische Vorgehen ist in beiden Analysen sehr ähnlich, so dass in diesem Abschnitt die Methodik zur Bestimmung der Umweltentlastungspotenziale von elektrischen Dienstfahrzeugen vorgestellt wird (Abbildung 15).

Um Potenzialabschätzungen für die zukünftige Entwicklung von Elektromobilität durchführen zu können, müssen zukünftige Rahmenbedingungen für den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen angenommen und als Annahmen hinterlegt werden. Im Rahmen von Expertendiskussionen und einer Literaturrecherche wurden Annahmen für die Jahre 2020 und 2030 bestimmt, welche ausführlich in Anhang A dargestellt sind. Daher werden in diesem Abschnitt nur wenige, wesentlich Szenarioannahmen quantitativ benannt.

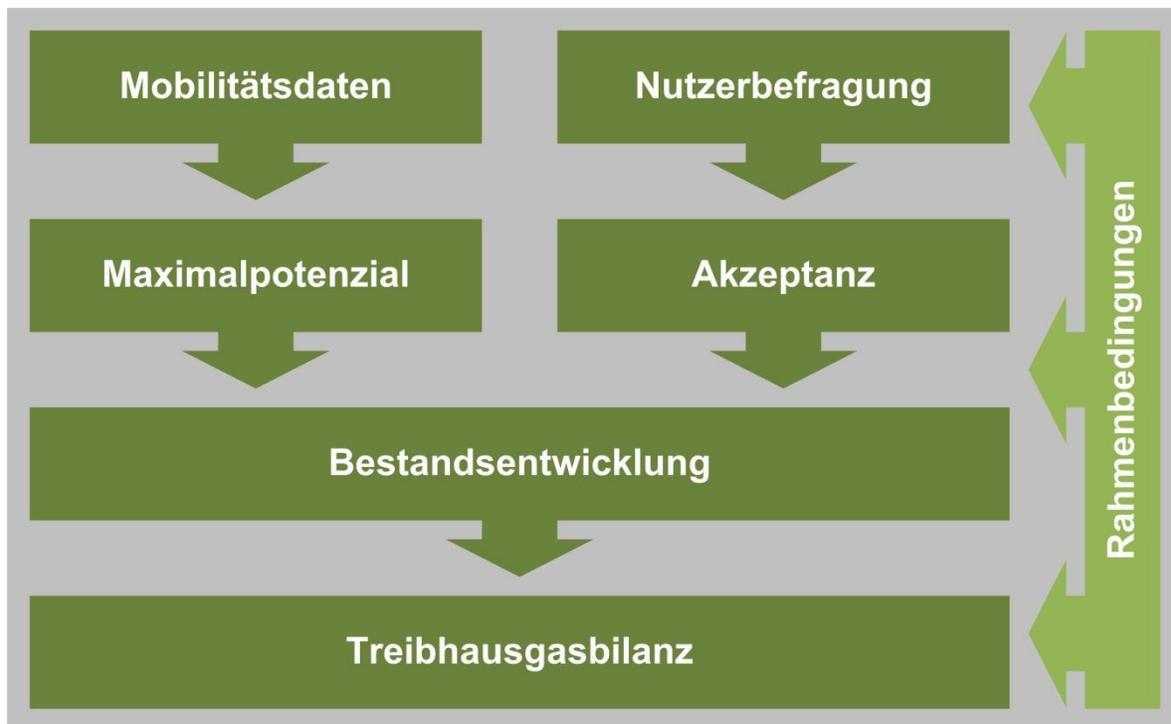


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Bestimmung von Umweltentlastungspotenzialen

Zur Bestimmung der Anzahl an elektrischen Fahrzeugen in den betrachteten Szenarien wird das Maximalpotenzial für den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen aus Mobilitätsdaten abgebildet. Die Idee des Maximalpotenzials besteht darin, abzuleiten, welcher Anteil der Fahrzeuge gemäß der heutigen Fahrzeugnutzung durch elektrische Fahrzeuge substituiert werden kann. Somit stellt das Maximalpotenzial eine Obergrenze für die Menge an elektrischen Fahrzeugen dar, wenn keine Änderung des Mobilitätsverhaltens angenommen wird.

4.3.1 Maximalpotenzial für die Szenarientwicklung für das Unternehmen SAP

Das Maximalpotenzial orientiert sich vor allem an technischen Restriktionen von elektrischen Fahrzeugen (insbesondere Reichweite, Ladedauer, Ladestandorte, Fahrzeuggrößen,...). In der Betrachtung der zukünftigen Entwicklung von Elektromobilität im Unternehmen SAP dienen Ergebnisse aus dem Teilnehmer-Screening und der empirischen Untersuchung während des Feldtest als Grundlage zur Bestimmung des Maximalpotenzials [9]. Entscheidende Größen zur Bestimmung des Maximalpotenzials sind dabei

- die Verfügbarkeit über einen Stellplatz auf dem eigenen Grundstück,
- die gewöhnlich mit dem Dienstwagen zurückgelegte Distanz an einem Arbeitstag,
- die Häufigkeit von Fahrten, die über die Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeugs hinausgehen.

In dem Teilnehmer-Screening zu Beginn des Feldtest wurden die interessierten SAP-Mitarbeiter (1.064 Interessenten) zu den ersten beiden Punkten befragt. Die Verfügbarkeit eines Stellplatzes auf dem eigenen Grundstück ist entscheidend für die unproblematische Batterieladung elektrischer Fahrzeuge. Besteht dagegen nicht die Möglichkeit das Fahrzeug auf dem eigenen Grundstück zu parken, ist der Fahrzeugbesitzer auf die öffentliche Infrastruktur für die Ladung der Fahrzeugbatterie angewiesen. Für diese SAP-Mitarbeiter wird die Annahme getroffen, dass – abhängig von der Entwicklung der (semi-)öffentlichen Ladeinfrastruktur – nur ein gewisser Anteil überhaupt die Möglichkeit besitzt, ein elektrisches Fahrzeug zu nutzen.

Als Obergrenze für die maximal mit dem Dienstwagen zurücklegbare Wegstrecke an einem gewöhnlichen Arbeitstag wird in den Szenarien 100 km angenommen, da nicht abgesichert ist, dass jeder Besitzer eines Elektrofahrzeugs während des Tages einen Stellplatz mit Lademöglichkeit ansteuert und somit die Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeugs erheblich erhöht. Im Teilnehmer-Screening wurde diese Abfrage in Wegstrecken-Kategorien abgefragt, so dass eine genauere Beschreibung der Obergrenze nicht möglich ist. Da diese Abfrage jedoch in keinem Szenario die entscheidende Größe für die Begrenzung des Maximalpotenzials darstellt, ist eine Abfrage auch nicht notwendig.

Lange Fahrten über der maximalen Reichweite von rein batterieelektrischen Fahrzeugen stellen das größte Hindernis für den Einsatz von solchen Fahrzeugen dar. In der empirischen Untersuchung während des Projekts Future Fleet wurden die ausgewählten Nutzer gefragt, wie häufig mit dem Dienstwagen Fahrten mit einer Distanz über 200 km durchgeführt werden. In der Szenarienentwicklung wird darauf aufbauend die Annahme getroffen, dass Besitzer batterieelektrischer Fahrzeuge bei acht Fahrten im Jahr akzeptieren, ein anderes Verkehrsmittel nutzen zu müssen oder die Fahrt nicht durchführen zu können. Mit dieser Annahme lässt sich der Potenzialwert mittels linearer Interpolation zwischen den Grenzen der einzelnen Wertkategorien ermitteln (genauere Erklärung sh. Seite 49).

Da die Daten aggregiert vorliegen und keine Koppelung der Abfragen auf Einzelpersonenebene möglich ist, wird so vorgegangen, dass die größte Restriktion der vorgestellten Kategorien den Wert des Maximalpotenzials (bezogen auf die Nutzung des Fahrzeugs) bestimmt (Tabelle 16). Eine weitere Restriktion ist die Fahrzeuggröße der Dienstwagen. Es wird in der Betrachtung angenommen, dass konventionelle Fahrzeuge nur mit elektrischen Fahrzeugen derselben Größenklasse ersetzt werden. Da nicht davon auszugehen ist, dass reine batterieelektrische Fahrzeuge mittelfristig in den Segmenten großer Fahrzeuge zur Verfügung stehen werden, muss bei der Bestimmung des Bestands an elektrischen Fahrzeugen die Größenklasse der Fahrzeuge mit berücksichtigt werden (sh. Abschnitt 4.3.4).

Tabelle 16: Restriktionen bei Bestimmung des Maximalpotenzials von batterieelektrischen Fahrzeugen für das Unternehmen SAP

Restriktion	Eigenschaft	Potenzial [%]
Verfügbarkeit Ladestation	Stellplatz auf eigenem Grundstück und 30 % / 50 % der Mitarbeiter ohne eigenen Stellplatz	73 / 80
Tägliche Fahrstrecke	< 100 km	92
Anzahl Reichweitenüberschreitung	maximal einmal im Jahr	23
Maximalpotenzial	Minimale Nutzungsrestriktion	23

4.3.2 Maximalpotenzial für die Szenarientwicklung für die Dienstwagenflotte in Deutschland

Bei der Bestimmung des Maximalpotenzials der Dienstwagenflotte in Deutschland wird aufgrund einer anderen Struktur der Mobilitätsdaten ein anderes Vorgehen gewählt. Als Grundlage der Untersuchung dienen die in der Studie MiD 2008 vorkommenden gewerblich zugelassenen Pkw. Bei diesen Fahrzeugen kann davon ausgegangen werden, dass es sich um Dienstwagen handelt und sie somit repräsentativ für die Dienstwagenflotte in Deutschland sind. In diesem Bericht wird eine Zusammenfassung des Vorgehens zur Bestimmung des Maximalpotenzials für die Dienstwagenflotte in Deutschland gegeben. Eine detailliertere Darstellung des Vorgehens – dort allerdings für alle, in der MiD 2008 aufgeführten Fahrzeuge – ist in [11] zu finden.

Grundsätzlich werden dieselben Restriktionen wie in Abschnitt 4.3.1 untersucht, wobei die Fahrzeugdaten genauso wie die Daten über das Mobilitätsverhalten in einzelnen Datensätzen vorliegen. Dies lässt die Kombination der Restriktionen auf Einzelfahrzeugebene zu, so dass für jedes Fahrzeug bestimmt werden kann, ob es gemäß der alltäglichen Nutzung und seiner Größenklasse durch ein batterieelektrisches Fahrzeug ersetzt werden kann. Da in der MiD 2008 für einen Stichtag alle Wege eines Fahrzeugs dokumentiert sind, werden dabei neben der Tagesfahrleistung eines Fahrzeugs auch die Parkstandorte und -zeiten analysiert, um potenzielle Lademöglichkeiten bei der Bestimmung des Maximalpotenzials zu berücksichtigen.

Die entscheidende Restriktion ist auch bei diesem Vorgehen die Reichweitenbeschränkung batterieelektrischer Pkw. Da das Mobilitätsverhalten in der MiD 2008 nur für einen Tag vorliegt, wird die Problematik der Reichweitenüberschreitungen im Mobilitätsverhalten mit Hilfe der Poisson-Verteilung behandelt (Gleichung 3).

$$P_{\lambda}(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} * e^{-\lambda} \quad (3)$$

Die Poisson-Verteilung ist eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung für unabhängig voneinander auftretende Ereignisse mit zwei Ergebnissen („Erfolg“ und „Misserfolg“). Im betrachteten Fall ist das betrachtete Ereignis k , die Häufigkeit einer Fahrt über der angenommenen Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeugs während eines Jahres („Erfolg“). Somit kann bestimmt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit P für die betrachteten Fahrzeuge k Reichweitenüberschreitungen im Jahr auftreten. Einziger Parameter der Poisson-Verteilung ist dabei der Erwartungswert λ der Wahrscheinlichkeitsverteilung. Dieser Erwartungswert entspricht in Gleichung 3 dem Jahresdurchschnitt an Fahrten über der Reichweitengrenze und wurde anhand aller Fahrten von Dienstwagen, die zu Fahrzeugsegmenten möglicher batterieelektrischer Pkw gehören, bestimmt ($\lambda = 15,02$ Reichweitenüberschreitung pro Jahr).

Für das betrachtete Szenario wird angenommen, dass Benutzer batterieelektrischer Fahrzeuge acht Reichweitenüberschreitungen – d.h. Reichweitenüberschreitungen bei vier Hin- und Rückfahrten – pro Jahr akzeptieren würden. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von mehr als acht Reichweitenüberschreitungen pro Jahr liegt gemäß der Poisson-Verteilung bei 93 %, so dass angenommen wird, dass nach dem hier beschriebenen Vorgehen maximal 7 % der Dienstwagen, die zu Größenklassen möglicher batterieelektrischer Pkw gehören, durch batterieelektrische Fahrzeuge ersetzt werden können.

4.3.3 Akzeptanzbestimmung für Elektrofahrzeuge

Im Gegensatz zur Ableitung des Maximalpotenzials für elektrische Fahrzeuge wird für beide folgenden Szenariobetrachtungen dasselbe Vorgehen gewählt und zudem dieselbe Datengrundlage für die Bestimmung der Akzeptanz zum Erwerb eines elektrischen Fahrzeugs verwendet. Neben der Bestimmung des Maximalpotenzials, welches das heutige Mobilitätsverhalten mit den Rahmenbedingungen von Elektromobilität in Verbindung bringt, ist es für die Ableitung der Marktentwicklung wichtig, die Akzeptanz für Elektrofahrzeuge zu kennen. Sie ist die eigentliche Größe zur Bestimmung einer Marktentwicklung, da das Maximalpotenzial nur die obere Grenze für den Einsatz von Elektrofahrzeugen darstellen soll.

Da in dieser Studie vor allem Potenziale für den Einsatz von Elektrofahrzeugen abgeschätzt werden sollen, wird auf eine komplexe Simulation der Kaufentscheidung bei der Beschaffung eines Dienstwagens verzichtet. Vielmehr werden die Ergebnisse aus der empirischen Untersuchung während des Feldtests Future Fleet [9] zur Einordnung der Akzeptanz von elektrischen Fahrzeugen eingesetzt. Die Besonderheit der Ergebnisse aus der empirischen Untersuchung ist die Tatsache, dass die befragten Personen im Gegensatz zu vielen anderen Untersuchungen durch die Teilnahme an Future Fleet Fahrerfahrung mit einem batterieelektrischen Fahrzeug gesammelt und somit die Stärken und Schwächen der Technologie in der Praxis teilweise für mehrere Wochen kennen gelernt haben.

Insgesamt können sich 80 % der Teilnehmer an Future Fleet vorstellen, ein Elektrofahrzeug beim nächsten Fahrzeugkauf zu berücksichtigen. Dieser Wert stellt die maximale Zustimmung für batterieelektrische Fahrzeuge dar. 22 % der befragten Feldtestteilnehmer können sich sogar

einen Erwerb eines Elektrofahrzeugs in den nächsten drei Jahren vorstellen. Diese Gruppe wurde zusätzlich zu den Mindestanforderungen an ein batterieelektrisches Fahrzeug befragt. Die Antworten auf die Frage nach

- der Mindestreichweite,
- der maximal, akzeptierten Ladedauer einer vollständigen Beladung der Batterie,
- der maximalen Mehrkosten beim Erwerb

von batterieelektrischen Fahrzeugen stellen somit die Grundlage für die Bestimmung der Akzeptanz dieser Fahrzeuge dar und werden unter Berücksichtigung der in Anhang A aufgeführten Szenarioannahmen ausgewertet.

In der Befragung wurde den Feldtestteilnehmern die Antwort in Wertkategorien ermöglicht, so dass keine absoluten Werte für die Beantwortung der Fragen vorliegen. Daher wird zur Bestimmung der Akzeptanz zwischen den Grenzen der einzelnen Wertekategorien linear interpoliert, um die Zustimmung für die betrachtete Mindestanforderung zu bestimmen. Beispielhaft – die Akzeptanz beträgt 28 % bei relativen Mehrkosten von 15 % – ist dies in Tabelle 17 und Abbildung 16 für die Ableitung der Akzeptanz von Mehrkosten beim Erwerb eines elektrischen Fahrzeugs dargestellt.

Tabelle 17: Akzeptanzverteilung zu Mehrkosten bei Beschaffung eines batterieelektrischen Fahrzeugs¹⁰

Wertkategorie	Zustimmung [%]
Nichts	6
0 % - 5 %	24
6 % - 10 %	31
11 % - 20 %	24
21 % - 35 %	7
36 % - 50 %	9

¹⁰ Frage: Wie viel darf Ihrer Meinung nach ein Elektrofahrzeug höchstens mehr kosten (im Verhältnis zum Anschaffungspreis eines vergleichbaren Autos mit herkömmlichen Antrieb), um für Sie als Firmenwagen / Privatwagen in Frage zu kommen?

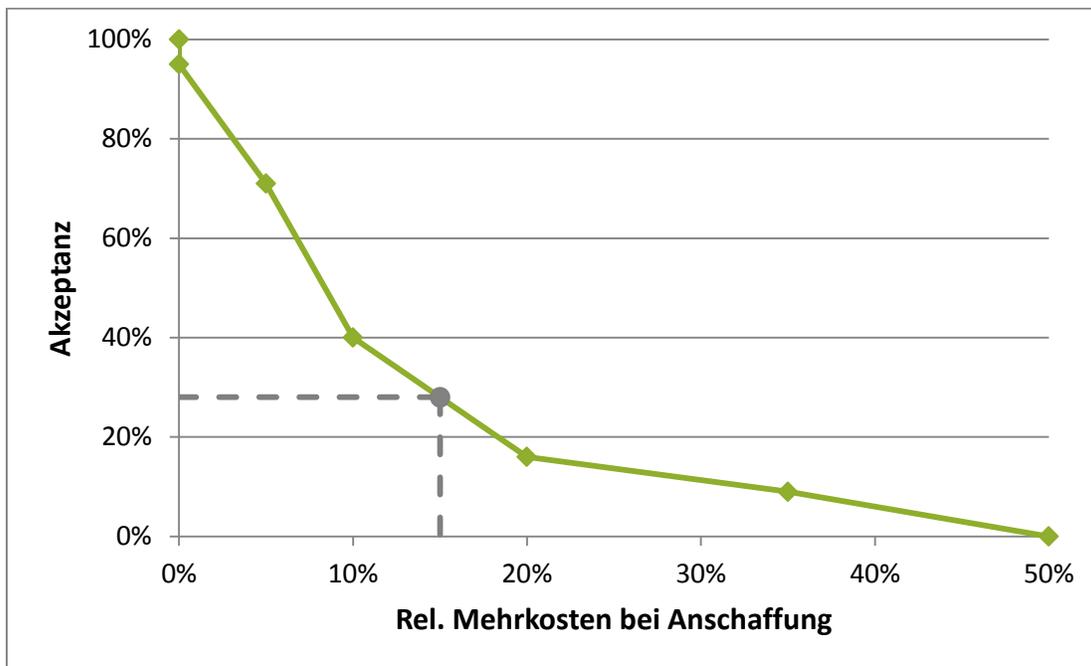


Abbildung 16: Illustration der Bestimmung der Akzeptanz (Bsp. Relative Mehrkosten bei der Beschaffung)

In den Szenarien werden jeweils zwei Arten der Kostenbetrachtung berücksichtigt. Einerseits werden die Mehrkosten beim Erwerb eines Dienstwagens über den Vergleich der Anschaffungspreise von elektrischen und konventionellen Fahrzeugen abgeleitet. Da die Mehrkosten von elektrischen Fahrzeugen allerdings enorm sind, ist andererseits denkbar, dass Unternehmen in der Zukunft die Kosten für den Erwerb eines Dienstwagens über eine Gesamtkostenberechnung der Fahrzeugnutzung bestimmen. Um dies abbilden zu können, wurde das in Abschnitt 4.2 vorgestellte TCO-Modell entwickelt.

Da die Ergebnisse zu den Mindestanforderungen an Elektrofahrzeuge auch an dieser Stelle nur in aggregierter Form vorliegen, ist eine Analyse auf Einzelpersonenebene nicht möglich. Daher wird so vorgegangen, dass der niedrigste Akzeptanzwert der untersuchten Mindestanforderungen die Akzeptanz für die untersuchten Kategorien darstellt. Dieser Wert wird darauf folgend auf die 80 % der Feldtestteilnehmer angewendet, die sich generell vorstellen können ein Elektrofahrzeug zu erwerben. So kann bei den gegebenen Rahmenbedingungen für Elektromobilität die Akzeptanz für den Erwerb eines elektrischen Fahrzeugs als Dienstwagen bestimmt werden.

4.3.4 Bestandsentwicklung und Emissionsbilanz

Die mit dem bereits beschriebenen Vorgehen bestimmten Werte für das Maximalpotenzial und die Akzeptanz von elektrischen Fahrzeugen wird auf dieselbe Art und Weise für die Ableitung der möglichen zukünftigen Fahrzeugstruktur des Unternehmens SAP und der Dienstwagenflotte in Deutschland eingesetzt. Die Zustimmung für eine Technologie ist entscheidend für deren

Marktentwicklung. Das Maximalpotenzial soll dagegen unter Berücksichtigung des heutigen Mobilitätsverhaltens und der angenommenen Rahmenbedingungen nur eine Obergrenze für die Entwicklungsmöglichkeiten von Elektromobilität darstellen. Daher wird für die Bestimmung der Struktur des Fahrzeugbestandes als mögliches Potenzial für elektrische Fahrzeuge der geringere Potenzialwert aus Maximalpotenzial und Akzeptanz ausgewählt.

Zur Bestimmung der zukünftigen Struktur des Fahrzeugbestands dient in beiden Betrachtungen der heutige Fahrzeugbestand als Grundlage. In der Szenarienentwicklung wird davon ausgegangen, dass die Größenklassen- und Antriebstopstruktur in den Jahren 2020 und 2030 der heutigen Struktur entspricht und somit elektrische Fahrzeuge nur konventionelle Fahrzeuge derselben Größenklasse ersetzen.

In der Betrachtung für das Unternehmen SAP wird dieselbe Bestandstruktur wie für die CO₂-Bilanzierung des Flottenversuchs Future Fleet in Kapitel 3 angewendet. Die Struktur der Dienstwagenflotte in Deutschland (Tabelle 18) wurde dafür aus der Studie MiD 2008 abgeleitet, indem die Annahme getroffen wird, dass die dort aufgeführten gewerblich zugelassenen Fahrzeuge repräsentativ für die Dienstwagenflotte in Deutschland sind.

Tabelle 18: Struktur der Dienstwagenflotte in Deutschland

Segment	Otto-Motor	Diesel-Motor
klein	11 %	4 %
mittel	12 %	12 %
groß	17 %	46 %

Das mit Hilfe des Maximalpotenzials und der Akzeptanz von elektrischen Fahrzeugen bestimmte Potenzial wird zur Ableitung des Anteils elektrischer Fahrzeuge am Fahrzeugbestand verwendet, indem der bestimmte Potenzialwert auf alle Kategorien des Fahrzeugbestands angewendet wird. Dieses Vorgehen entspricht der Annahme, dass das Maximalpotenzial und die Akzeptanz für alle Größenklassen und Antriebstopstypen gleich groß sind. In diesem Schritt wird allerdings auch berücksichtigt, dass elektrische Fahrzeuge nicht in allen Größenklassen zur Verfügung stehen werden, so dass keine batterieelektrischen Fahrzeuge in höheren Segmenten als der Kompaktklasse in den Dienstwagenbestand aufgenommen werden.

Neben der Struktur des Fahrzeugbestands werden zur Emissionsberechnung der Energieverbrauch der einzelnen Fahrzeugtypen sowie die Emissionsfaktoren zur Energiebereitstellung benötigt. Die Bestimmung der Emissionsfaktoren für die Bereitstellung von Strom für elektrische Fahrzeuge (Tabelle 14) ist in Kapitel 314.1 ausführlich diskutiert. Annahmen zur zukünftigen Entwicklung von konventionellen und elektrischen Fahrzeugen sind in Tabelle 19 und Tabelle 20 aufgeführt.

Tabelle 19: Verbrauch in CO₂-Intensität konventioneller Fahrzeuge - Annahmen für 2020 / 2030

Segment	Jahr	Otto-Motor			Diesel-Motor		
		Verbrauch [l/100 km]	CO ₂ -Intensität [g CO ₂ /l]	Emissionsfaktor [g CO ₂ /km]	Verbrauch [l/100 km]	CO ₂ -Intensität [g CO ₂ /l]	Emissionsfaktor [g CO ₂ /km]
klein	2020	4,4	2.573	113	2,9	2.772	80
mittel	2020	5,4	2.573	139	3,9	2.772	109
groß	2020	7,5	2.573	192	5,4	2.772	149
klein	2030	3,9	2.573	100	2,5	2.772	70
mittel	2030	4,7	2.573	122	3,5	2.772	96
groß	2030	6,6	2.573	169	4,7	2.772	131

Die Verbrauchsdaten leiten sich aus heutigen Kraftstoffverbrauchsdaten und entsprechend der geplanten Fortschreibung der Pkw-Grenzwerte bis 2020 (95 g/km) in Anlehnung an TREMOD ab. Auf Deutschlandniveau bedeutet dies dann für neu zugelassene Pkw einen mittleren Emissionsfaktor von 108 g CO₂ / km im Jahr 2020 und von 95 g CO₂ / km im Jahr 2030. Die angenommenen CO₂-Emissionen der konventionellen Fahrzeuge wurden dabei aus Annahmen in [10] abgeleitet. Berücksichtigt sind dabei eine 10-prozentige Beimischung von Ethanol zu Benzin und eine 13-prozentige Beimischung von Biodiesel zum Dieselmotorkraftstoff. Für den elektrischen Energieverbrauch ist zudem noch anzumerken, dass die Werte den Energieverbrauch während der Fahrt eines Fahrzeugs darstellen. Zusätzlich wird für 2020 und 2030 ein Ladewirkungsgrad von 90 % für alle elektrischen Fahrzeuge angenommen.

Tabelle 20: Elektrischer Energieverbrauch von batterieelektrischen (BEV) und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen (PHEV) – Annahmen für 2020/2030

Größenklasse	Energieverbrauch 2020 [kWh _{el} / km]		Energieverbrauch 2030 [kWh _{el} / km]	
	BEV	PHEV*	BEV	PHEV*
klein	0,154	0,165	0,143	0,154
mittel	0,187	0,198	0,176	0,187
groß	-	0,231	-	0,220

* Werden PHEV verbrennungsmotorisch angetrieben, werden dieselben Emissionsfaktoren wie bei entsprechenden konventionellen Pkw verwendet.

Die Energieverbräuche der Fahrzeuge hängen zudem von der jährlichen Fahrleistung der Fahrzeuge ab. Da diese für beide Betrachtungen unterschiedlich ermittelt wurden und abhängig von den Szenarioannahmen sind, wird darauf direkt in der Ergebnisdarstellung in den Kapiteln 4.4 und 4.5 eingegangen.

Anzumerken ist, dass durch das vorgestellte Vorgehen für die Bestimmung der Bestandsstruktur keine Bestandsentwicklung mit Berücksichtigung von Lebensdauern der Fahrzeuge und dem Jahr der Neuzulassung modelliert wird, was eine gewisse Ungenauigkeit bei der darauf folgenden Emissionsbetrachtung mit sich bringt. Im Kontext der Analyse von Dienstwagen ist die Ungenauigkeit in der Emissionsbetrachtung allerdings gering, da Dienstwagen im Allgemeinen nach kurzer Haltedauer an den Gebrauchtwagenmarkt und somit an private Besitzer weitergegeben werden. Die Berechnung der Emissionen aller Fahrzeuge des Dienstwagenbestands mit den Emissionsfaktoren der Jahre 2020 und 2030 birgt somit nur geringe Ungenauigkeiten in der Berechnung der Emissionen.

Gleichermaßen wird bei der Bestimmung der Anzahl elektrischer Fahrzeuge davon ausgegangen, dass sich in den Jahren 2020 und 2030 ein vollständiger Markt für Elektrofahrzeuge im Dienstwagenbereich entwickelt hat. Für eine Potenzialabschätzung eines Teilbereichs des Fahrzeugmarktes ist dies eine gerechtfertigte Annahme. In einer vollständigen Marktsimulation wäre es zusätzlich notwendig gewesen, mittels einer Technologiediffusion Abschätzungen den Effekt beim Entstehen eines Marktes für Elektrofahrzeuge abzubilden.

4.4 Mögliche Entwicklungspfade von Elektromobilität für das Unternehmen SAP

In diesem Abschnitt werden mögliche Entwicklungspfade für den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen im Unternehmen SAP diskutiert. Das Vorgehen zur Bestimmung möglicher Potenziale für den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in der Dienstwagenflotte sowie die Annahmen zur Bestimmung möglicher Einsparungen von CO₂-Emissionen wurden in Abschnitt 4.3.4 beschrieben, so dass hier vor allem auf die Szenarienentwicklung und Ergebnisse der Analyse eingegangen wird.

Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt wurde, wird in allen Szenarien davon ausgegangen, dass sich die Struktur der Dienstwagenflotte von SAP für die betrachteten Jahre 2020 und 2030 nicht grundlegend verändert. Gleichermaßen wird angenommen, dass sich das Verhältnis der Firmenwagenberechtigungen zu Anzahl der Mitarbeiter genauso wenig ändert wie der Anteil der Firmenwagenberechtigten, die einen Dienstwagen besitzen. Da allerdings von einem Anwachsen der Beschäftigtenzahl um 20 % bis zum Jahr 2020 und von einem weiteren Wachstum von 20 % zwischen den Jahren 2020 und 2030 ausgegangen wird, steigt die Anzahl der Dienstwagen im Unternehmen bis zum Jahr 2030 kontinuierlich.

Um verschiedene Möglichkeiten der Integration von elektrischen Fahrzeugen in die Dienstwagenflotte abbilden zu können, werden in Folge mehrere Szenarien mit sich ändernden Rahmenbedingungen untersucht. Die Kosten für den Erwerb eines Elektrofahrzeugs sind ein

entscheidender Faktor für die Akzeptanz von elektrischen Fahrzeugen, so dass in allen Szenarien bei Betrachtung der Mehrkosten für den Erwerb eines elektrischen Dienstwagens sowohl mit den Anschaffungskosten als auch mit einer TCO-Betrachtung gerechnet wird. Heutzutage ist der Anschaffungspreis in der Regel der entscheidende Faktor für die Kostenbeteiligung des Mitarbeiters beim Erwerb eines Dienstwagens. Gerade durch die Einführung von elektrischen Fahrzeugen und deren im Vergleich niedrigeren Betriebskosten könnte eine Gesamtkostenbetrachtung für Unternehmen bei Bestimmung der Kostenbeteiligung der Mitarbeiter am Erwerb eines Dienstwagens interessant werden, so dass entschieden wurde, beide Kostenbetrachtungen zu untersuchen. In allen TCO-Betrachtungen wird dabei von einer Haltedauer des Dienstwagens von vier Jahren ausgegangen, wobei die Fahrzeuge nach zehn Jahren das Ende ihrer Nutzung erreichen und zu diesem Zeitpunkt den Restwert Null besitzen.

Da im Flottenversuch Future Fleet batterieelektrische Fahrzeuge eingesetzt wurden, beziehen sich bis auf ein Szenario alle Szenarien auf batterieelektrische Fahrzeuge. Da aber angenommen wird, dass diese nur in den Größenklassen klein und mittel zur Verfügung stehen werden, die Mehrzahl der Dienstwagen bei SAP aber aus der Größenklasse groß stammt, ist das Potenzial für elektrische Dienstwagen in diesen Szenarien limitiert.

Die in Abschnitt 4.3 angegebenen Werte des Maximalpotenzials und der Akzeptanz beziehen sich auf das Basisszenario (BAU¹¹). In diesem Szenario wird die Menge an batterieelektrischen Fahrzeugen vor allem durch drei Faktoren begrenzt: die hohe Anzahl an Reichweitenüberschreitungen (Begrenzung für das Maximalpotenzial), die Mehrkosten (zumindest bei Berücksichtigung der Anschaffungskosten) und die geringe Akzeptanz für die angenommene Reichweite der batterieelektrischen Fahrzeuge.

Die Beschränkung durch die hohen Mehrkosten beim Erwerb eines elektrischen Fahrzeugs reduziert sich erheblich, wenn eine Gesamtkostenbetrachtung durchgeführt wird. Selbst im Jahr 2020 kann sich die Gesamtkostenbetrachtung für rein elektrische Fahrzeuge bei hohen Fahrleistungen positiv gestalten.

Die Problematik der beschränkten Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge kann sowohl über die Einführung von Mobilitätskonzepten als auch durch den Einsatz von Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen reduziert werden. Daher wird in drei Szenarien der Effekt bei Einführung eines Mobilitätskonzepts untersucht, in dem für lange Fahrten ein konventionelles Fahrzeug aus einem Fahrzeugpool der SAP zur Verfügung gestellt wird. Somit entfällt für die Untersuchung der Akzeptanz die Mindestanforderung an die Reichweite des elektrischen Fahrzeugs. Die Grenze für die akzeptierte Anzahl an langen Fahrten erhöht sich, so dass angenommen wird, dass sich das Maximalpotenzial bis zu den Mitarbeitern ausdehnt, die angegeben haben, zwei bis drei Fahrten pro Monat über einer Länge von 200 km zurück zu legen.

In der Emissionsbilanzierung wird bei Betrachtung des Mobilitätskonzepts unterschieden, mit welchem Verkehrsmittel die Fahrten über der Reichweite der elektrischen Pkw substituiert werden. Im Szenario „Pool“ werden alle langen Fahrten mit einem konventionellen Fahrzeug

¹¹ BAU: business as usual

gleicher Größenklasse zurückgelegt. Im Szenario „Pool+“ wird für alle, langen Dienstfahrten die Bahn, für lange Privatfahrten ein konventionelles Fahrzeug aus dem Pool genutzt. Da die Akzeptanz aufgrund der Mindestanforderung an die Ladedauer weiterhin recht limitiert ist, wird zudem ein Szenario mit einer schnelleren Ladeinfrastruktur untersucht (Szenario „Pool + Schnellladung“), in der die Ladeleistung der öffentlichen Ladestationen die doppelte Ladeleistung im Vergleich zum Basisszenario besitzt.

Im Gegensatz zu batterieelektrischen Fahrzeugen kann bei Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen davon ausgegangen werden, dass sie in allen Größenklassen zur Verfügung stehen werden und sich somit das Potenzial für die Integration von elektrischen Fahrzeugen erhöht. Da ein Plug-In-Hybrid-Pkw nur wenige Restriktionen in der Nutzung besitzt, werden in der Potenzialanalyse alleine die Mehrkosten und die Verfügbarkeit eines Ladeplatzes als Beschränkung berücksichtigt (Szenario „PHEV“). Aufgrund der ähnlichen Nutzungsmöglichkeiten wie bei einem konventionellem Pkw bleibt dabei auch die Frage, ob sich die Feldtestteilnehmer den Erwerb eines elektrischen Fahrzeugs vorstellen könnten, unberücksichtigt.

Die in der Analyse berücksichtigte Fahrleistung wird in allen Szenarien aus der empirischen Untersuchung des Flottenversuchs [9] abgeleitet. Während der Teilnahme am Flottenversuch wurden die SAP-Mitarbeiter zu der Jahresfahrleistung ihrer Dienstwagen befragt. Da die Ergebnisse der TCO-Betrachtung bei unterschiedlichen Fahrleistungen stark voneinander abweichen, wurden die Dienstwagennutzer für die weitere Analyse in drei Gruppen eingeteilt. Die für diese Gruppen bestimmte mittlere Jahresfahrleistung lieferte die Grundlage für die folgenden TCO-Betrachtungen und Emissionsberechnungen.

Tabelle 21: Jahresfahrleistung aus empirischer Untersuchung im Projekt Future Fleet

Gruppe	Anteil [%]	Mittlere Jahresfahrleistung [km]	Ei. Fahranteil PHEV [%]*
< 15.000 km	13	12.741	80
15.000 km – 25.000 km	45	22.184	67
> 25.000 km	42	34.750	50

* Für die Betrachtung der Kosten (TCO) und der Emissionen wird bei Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen der elektrische Fahranteil benötigt. Die aufgeführten Werte sind rein Annahmen basiert.

Bei Betrachtung der Fahrleistung (Tabelle 21) fällt auf, dass ein hoher Anteil der befragten SAP-Mitarbeiter eine sehr hohe Jahresfahrleistung aufweist. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob eine solche Fahrleistung mit einem batterieelektrischen Fahrzeug überhaupt erreicht werden kann. Da es rechnerisch möglich ist und das Mobilitätsverhalten über das Maximalpotenzial bereits berücksichtigt ist, wird das Potenzial an elektrischen Fahrzeugen an dieser Stelle nicht reduziert. Vielmehr wird die Fahrleistung gemäß der Verteilung in Tabelle 21 auf die

Dienstwagenflotte von SAP angewendet.

Für die Szenarien, in denen das vorgestellte Mobilitätskonzept berücksichtigt ist, muss zudem die Fahrleistung bestimmt werden, die nicht mit dem batterieelektrischen Fahrzeug zurückgelegt werden kann, wofür Daten aus dem vor dem Feldversuch aufgenommenen Mobilitätstagebuch verwendet wurden. Aus diesen Daten wurde für jede in Tabelle 21 aufgeführte Gruppe die Fahrleistung der Touren bestimmt, die höher ist als die doppelte Distanz der maximalen Reichweite der batterieelektrischen Fahrzeuge. Für das Szenario „Pool+“ wurden solche Touren, die an einem Werktag durchgeführt wurden, als Dienstfahrten deklariert, die restlichen langen Touren dagegen als lange Privatfahrten.

Tabelle 22: Jahresfahrleistung in Szenarien mit Mobilitätskonzept (Betrachtung für das Unternehmen SAP)

Gruppe	Jahresfahrleistung E-Pkw [km]	Jahresfahrleistung Pool / Bahn [km]	
	BEV	Dienstfahrt	Privatfahrt
< 15.000 km	11.450	0	1.291
15.000 km – 25.000 km	18.081	2.107	1.996
> 25.000 km	28.111	2.083	4.556

4.4.1 Ergebnisse der Szenariobetrachtung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Potenzialbestimmung sowie der Emissionsbetrachtung für die unterschiedlichen Szenarien vorgestellt. Zunächst wird dabei allerdings kurz auf die Ergebnisse der TCO-Analyse eingegangen. Da die Ergebnisse der TCO-Analyse zwischen den Szenarien mit und ohne Mobilitätskonzept ähnlich sind und diese ohnehin zusammenfassend präsentiert werden, wird darauf verzichtet genauer auf die Ergebnisse für die Szenarien mit Mobilitätskonzept einzugehen. Die generellen Aussagen zu den Ergebnissen der TCO-Betrachtung sind allerdings für alle untersuchten Szenarien gültig.

Im Jahr 2020 ist im Vergleich zu 2030 aufgrund höherer Batteriepreise mit höheren Mehrkosten in der Anschaffung eines elektrischen Fahrzeugs zu rechnen. Zudem bewegt sich die Betriebskostensparnis beim Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in den beiden betrachteten Jahren in einem ähnlichem Bereich. Da zu diesem Zeitpunkt somit das Spannungsverhältnis von hohen Anschaffungskosten und niedrigen Betriebskosten für die betrachteten TCO-Rechnungen am höchsten ist, werden an dieser Stelle Ergebnisse der TCO-Analyse für das Jahr 2020 präsentiert. Weiterhin wird sich dabei auf die Größenklasse klein bezogen, da die Entwicklung eines Marktes für Elektrofahrzeuge dort am wahrscheinlichsten ist.

In Abbildung 17 und Abbildung 18 ist die Total Cost of Ownership für Fahrzeuge mit niedriger

und hoher Fahrleistung dargestellt. Anzumerken ist dabei, dass in den Szenarien jeweils nur zwei der fünf dargestellten Fahrzeuge für die Ermittlung der Mehrkosten beim Erwerb eines elektrischen Fahrzeugs miteinander verglichen werden. In Szenarien mit batterieelektrischen Fahrzeugen bleiben Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge unberücksichtigt, der umgekehrte Fall tritt bei Betrachtung von Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen ein. Werden zudem die Mehrkosten für die Substitution eines Fahrzeugs mit Otto-Motor bestimmt, wird für den Kostenvergleich das konventionelle Otto-Fahrzeug herangezogen.

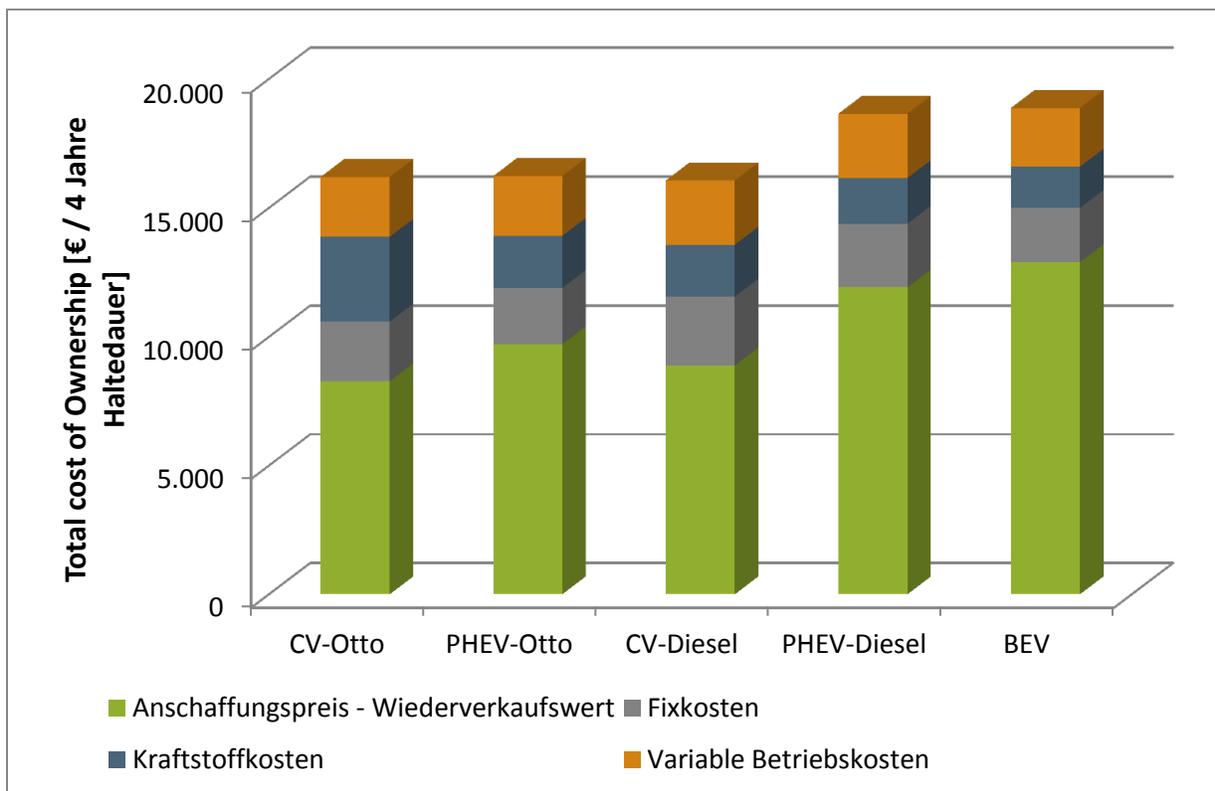


Abbildung 17: Total Cost of Ownership – Jahr: 2020, Größenklasse: klein, Fahrleistung: 12.741 km

Beim Vergleich von Fahrzeugen mit niedriger Fahrleistung ist deutlich erkennbar, dass konventionelle Fahrzeuge auch in der Gesamtkostenbetrachtung preisgünstiger sind als elektrische Fahrzeuge. Dennoch verringern sich die Mehrkosten im Vergleich zur Betrachtung mit dem Anschaffungspreis außer für Plug-In-Hybrid-Diesel-Fahrzeuge erheblich. Bei Plug-In-Hybrid-Diesel-Fahrzeugen kommt die Tatsache zum Tragen, dass die Kosten in der Anschaffung im Vergleich zum konventionellen Diesel-Fahrzeug höher sind, die Betriebskostensparnis dazu im Vergleich allerdings recht niedrig ist. Dadurch ergibt sich gemäß der Modellierung ein im Vergleich zu den Anschaffungskosten niedriger Restwert des Fahrzeugs, so dass die Differenz aus Anschaffungskosten und Wiederverkaufswert für ein solches Fahrzeug im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen ziemlich hoch ist.

Die höchsten Vollkosten ergeben sich für batterieelektrische Fahrzeuge. Aufgrund der hohen Anfangsinvestition ist dies verständlich. Der Kostenvorteil bezüglich der Kraftstoffkosten ist jedoch bereits bei niedrigen Fahrleistungen deutlich erkennbar. Im Vergleich zu einem konventionellen Kleinwagen mit Otto-Motor reduzieren sich die Kraftstoffkosten in der Betrachtung um mehr als 50 %.

Erwähnenswert ist zudem die Kostenverteilung in der TCO-Betrachtung. Während bei konventionellen Fahrzeugen mit Otto-Motor nur rund 50 % der Kosten auf die Kategorie der Differenz aus Anschaffungspreis und Wiederverkaufswert fallen, beträgt der Anteil dieser Kostenkategorie bei batterieelektrischen Fahrzeugen 80 %. Das Verhältnis kehrt sich bei Betrachtung der Kraftstoffkosten um. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen machen die Kraftstoffkosten nur 10 % der Vollkosten aus, bei konventionellen Fahrzeugen mit Otto-Motor dagegen bereits 20 %.

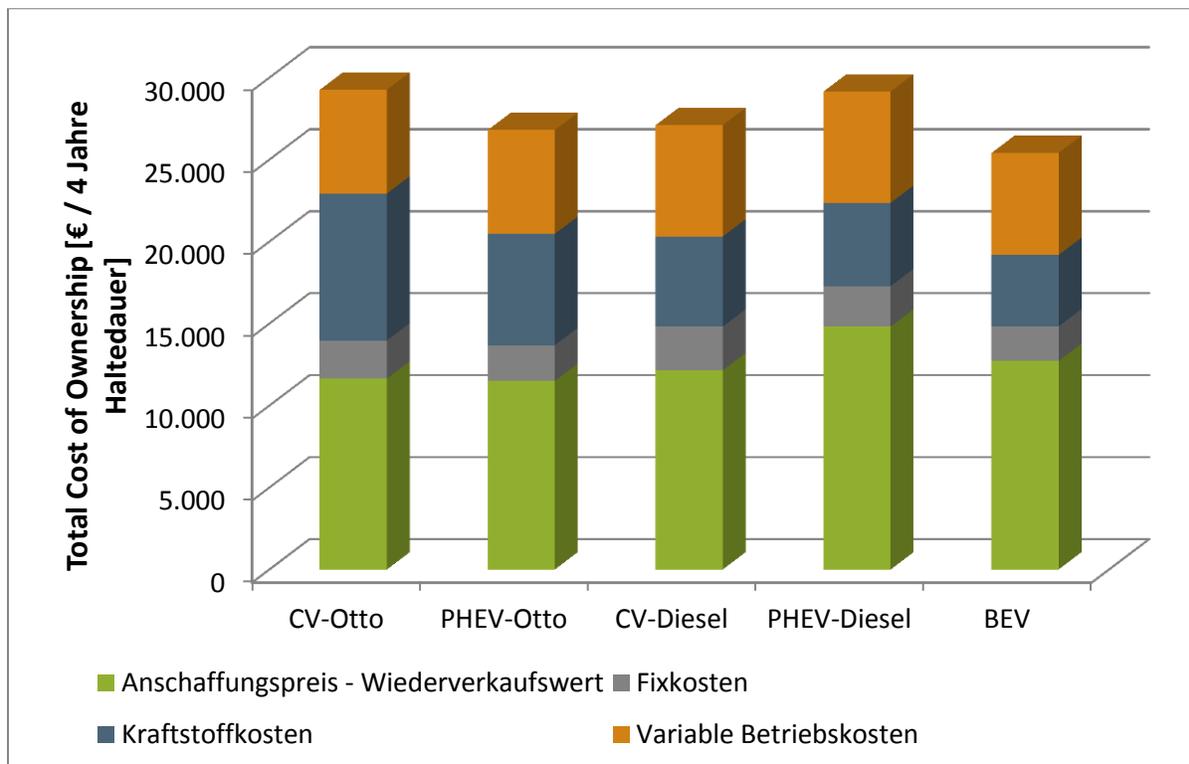


Abbildung 18: Total Cost of Ownership – Jahr: 2020, Größenklasse: klein, Fahrleistung: 34.750 km

Ein anderes Bild ergibt sich bei Betrachtung derselben Fahrzeuge mit hoher Fahrleistung. Batterieelektrische Fahrzeuge weisen bei der betrachteten Fahrleistung mit Abstand die geringsten Vollkosten auf. Entscheidend für die Änderung der Kostenreihenfolge sind bei dieser Fahrleistung die geringeren Kraftstoffkosten bei batterieelektrischen Fahrzeugen. Sie stellen selbst bei dieser Fahrleistung nur 15 % der Kosten, bei konventionellen Fahrzeugen mit Otto-

Motor tragen sie jedoch zu mehr als 30 % zu der berechneten Total Cost of Ownership bei.

Bemerkenswert ist der geringe Kostenunterschied zwischen batterieelektrischen und konventionellen Fahrzeugen in der Kostenkategorie der Differenz von Anschaffungspreis und Wiederverkaufswert. Dies ist durch das Vorgehen in der Modellierung des Restwerts von elektrischen Fahrzeugen begünstigt, da dabei für den Zweitnutzer dieselbe Fahrleistung angesetzt wird wie für den Neuwagenkäufer. Somit erhöht sich der Betriebskostenvorteil des Zweitnutzers bei rein elektrischen Fahrzeugen erheblich, so dass der Wiederverkaufswert von batterieelektrischen Fahrzeugen gemäß der Modellierung des Restwerts hoch eingeschätzt wird.

Der Betriebskostenvorteil beim elektrischen Fahren ist im Vergleich zu Diesel-Fahrzeugen geringer als im Vergleich zu Otto-Fahrzeugen. Begründet liegt dies im geringeren Verbrauch von Diesel-Fahrzeugen. Daher nimmt der Plug-In-Hybrid-Diesel in der Vollkostenbetrachtung auch bei hohen Fahrleistungen eine Sonderstellung ein. In der Modellierung ist der Betriebskostenvorteil des Zweitnutzers aufgrund der geringen elektrischen Fahrleistung und der geringen Kraftstoffkostendifferenz im Vergleich zum konventionellen Diesel-Fahrzeug niedrig, so dass sich der Restwert eines Plug-In-Hybrid-Diesel-Fahrzeugs nur wenig von dem eines konventionellen Diesels unterscheidet.

Mit den gezeigten Abbildungen für die TCO-Analyse innerhalb der betrachteten Szenarien sollen die generellen Effekte bei Berücksichtigung der Vollkostenbetrachtung illustriert werden. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass sich die Mehrkosten für den Erwerb eines Elektrofahrzeugs deutlich verringern, wenn statt der Anschaffungskosten eine Gesamtbetriebskostenanalyse für die Mehrkosten angesetzt wird. Dieser Effekt verstärkt sich für die Annahmen im Jahr 2030, da für dieses Jahr geringere Batteriekosten und somit im relativen Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen geringere Anschaffungskosten in der Modellierung angesetzt werden. In den meisten betrachteten Fällen ergibt sich für elektrische Fahrzeuge unter den für das Jahr 2030 angenommenen Annahmen eine geringere Total Cost of Ownership als für konventionelle Fahrzeuge. Derselbe Effekt tritt verständlicherweise bei hohen Fahrleistungen ein, so dass bereits 2020 in einigen Fällen für batterieelektrische Fahrleistungen eine niedrigere Total Cost of Ownership als für konventionelle Fahrzeuge berechnet wird. Wenn das Unternehmen eine Vollkostenbetrachtung als Referenz für die Kostenbeteiligung der Mitarbeiter am Erwerb des Dienstwagens ansetzt, stellt die Mindestanforderung an die Mehrkosten für den Erwerb eines elektrischen Fahrzeugs in den genannten Fällen keine Restriktion für die Akzeptanz von elektrischen Fahrzeugen dar. Andere Restriktionen für die Akzeptanz wie beispielsweise die Ladedauer der elektrischen Fahrzeuge fallen dann stärker ins Gewicht.

Die sich für alle Szenarien ergebenden Potenzialableitungen für elektrische Fahrzeuge sind für die Jahre 2020 und 2030 in Abbildung 19 und Abbildung 20 aufgeführt. In allen Betrachtungen bezüglich batterieelektrischer Fahrzeuge überragt das Maximalpotenzial die Akzeptanz für solche Fahrzeugtypen deutlich. Im Basisszenario wird das Maximalpotenzial durch die eingeschränkte Reichweite der Fahrzeuge und die damit auftretenden Nutzungskonflikte bei langen Fahrten limitiert. Da sich diese Problematik in den Szenarien mit Mobilitätskonzepten

reduziert, ist der limitierende Faktor des Maximalpotenzials in diesen Szenarien die Fahrzeugstruktur der Dienstwagenflotte von SAP. Da angenommen wird, dass konventionelle Fahrzeuge nur durch elektrische Fahrzeuge derselben Größenklasse ersetzt werden, zeigt sich im Maximalpotenzial in diesen Szenarien der maximal substituierbare Anteil der Dienstwagenflotte.

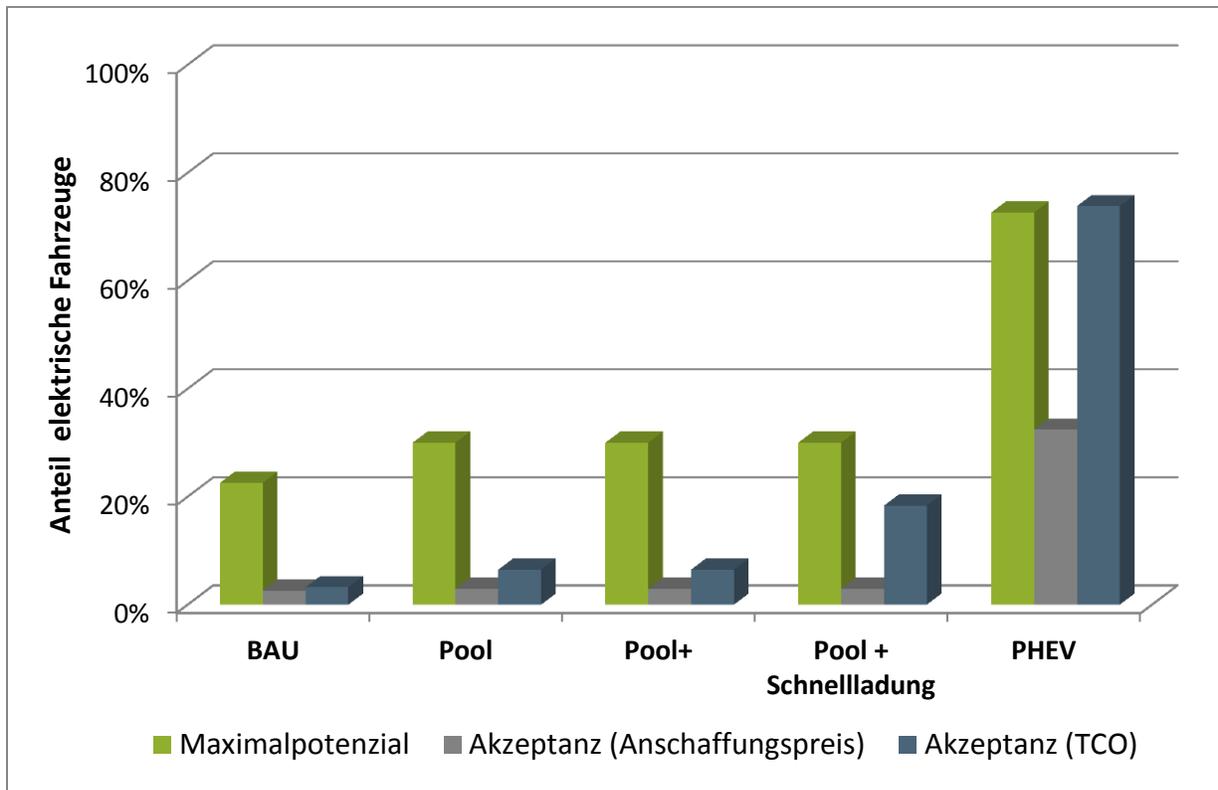


Abbildung 19: Potenzialabschätzung für elektrische Fahrzeuge im Unternehmen SAP – 2020

Werden Plug-In-Hybrid-Pkw in die Dienstwagenflotte integriert, können gemäß der Szenarioannahmen in allen Größenklassen konventionelle Fahrzeuge ersetzt werden. Die einzig verbleibende Restriktion für das Maximalpotenzial ist in diesem Fall die Verfügbarkeit einer Ladestation im (semi-)öffentlichen Raum. Da davon ausgegangen wird, dass im Jahr 2030 mehr Ladestationen als 2020 zur Verfügung stehen werden, steigt das Maximalpotenzial in der Modellierung für das Jahr 2030 leicht an.

Im Basisszenario wird die Akzeptanz durch die geringe Zustimmung zur Reichweite der Fahrzeuge und zu den Mehrkosten, die mit dem Erwerb eines batterieelektrischen Fahrzeugs verbunden sind, begrenzt. In den Betrachtungen, in denen der Anschaffungspreis als Basis für die Mehrkosten eines Elektrofahrzeugs angesetzt wird, bleibt die Akzeptanz auch bei den Szenarien mit Mobilitätskonzept gering, da die Mehrkosten als Restriktion für höhere Akzeptanz

bestehen bleiben. Wird allerdings die TCO-Analyse als Grundlage für die Bestimmung der Mehrkosten eines elektrischen Fahrzeugs herangezogen, steigt die Akzeptanz in den Szenarien mit Mobilitätskonzept erheblich.

Die limitierte Reichweite der batterieelektrischen Fahrzeuge verliert in diesen Szenarien an Bedeutung für die Akzeptanz. Teilweise stellen die Mehrkosten beim Kauf eines elektrischen Fahrzeugs in diesen Szenarien die Restriktion für die Akzeptanz elektrischer Fahrzeuge dar, vor allem ist aber die Zustimmung zu den in den Szenarioannahmen festgelegten Ladedauern der begrenzende Faktor für die Akzeptanz. Daher erhöht sich die Akzeptanz weiter, wenn von einer höheren Ladeleistung und damit kürzeren Standzeit an den Ladestationen ausgegangen wird.

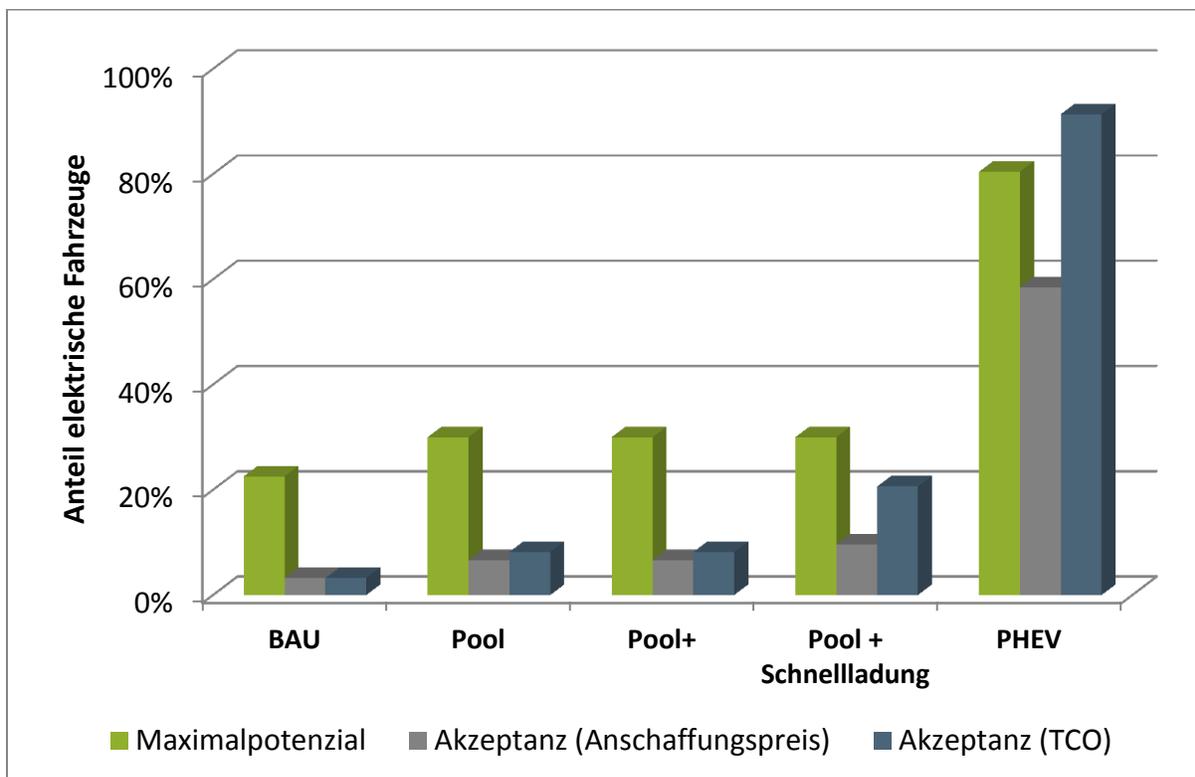


Abbildung 20: Potenzialabschätzung für elektrische Fahrzeuge im Unternehmen SAP – 2030

Bei Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen ist der einzig limitierende Faktor für die Akzeptanz die Kostenbetrachtung beim Erwerb des Fahrzeugs, so dass die Akzeptanz in beiden betrachteten Jahren bei Kostenbetrachtung mit der TCO-Analyse über dem Maximalpotenzial von Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen liegt. Wie bereits erwähnt, ist das Maximalpotenzial bei Plug-Hybrid-Fahrzeugen durch die Verfügbarkeit eines Ladeplatzes begrenzt. Wird eine weiter verbreiterte Ladeinfrastruktur angenommen – beispielsweise durch spezielle Park-/Ladeplätze für Mitarbeiter ohne eigenen Stellplatz zuhause – kann das Potenzial für Plug-In-Hybrid-Pkw somit durchaus

noch erhöht werden.

Im Allgemeinen ist der Anteil der elektrischen Fahrzeuge im Dienstwagenbestand leicht höher als in der Modellierung für das Jahr 2020. Dies ergibt sich aus den veränderten Rahmenbedingungen für das Jahr 2030. Für dieses Jahr ist aufgrund von Effizienzsteigerungen und geringeren Batteriekosten mit günstigeren elektrischen Fahrzeugen zu rechnen. Zudem kann von einer verbesserten Infrastruktur ausgegangen werden.

Die Ergebnisse für die CO₂-Emissionseinsparung (Abbildung 21 und Abbildung 22) verhalten sich entsprechend der gerade vorgestellten Potenzialabschätzung. Da sich für das elektrische Fahren bei der Simulation mit einem Ausbau der erneuerbaren Energien gemäß der Leitstudie 2010 schlechtere Emissionsfaktoren als für konventionelle Fahrzeuge ergeben, wird in der Betrachtung mit diesem Kraftwerkspark durch die Strombereitstellung für elektrische Fahrzeuge mehr CO₂ emittiert als bei der Nutzung konventioneller Fahrzeuge. An dieser Stelle wird allerdings noch einmal darauf verwiesen, dass alle Emissionen, die sich aus der zusätzlichen Stromnachfrage für die Elektrofahrzeugnutzung ergeben, den Fahrzeugen zugesprochen werden. Um darzustellen, wie viel CO₂ zusätzlich für die Elektrofahrzeuge erzeugt wird, wird damit in der Bilanzierung anders verfahren als mit sonstigen Stromverbrauchern.

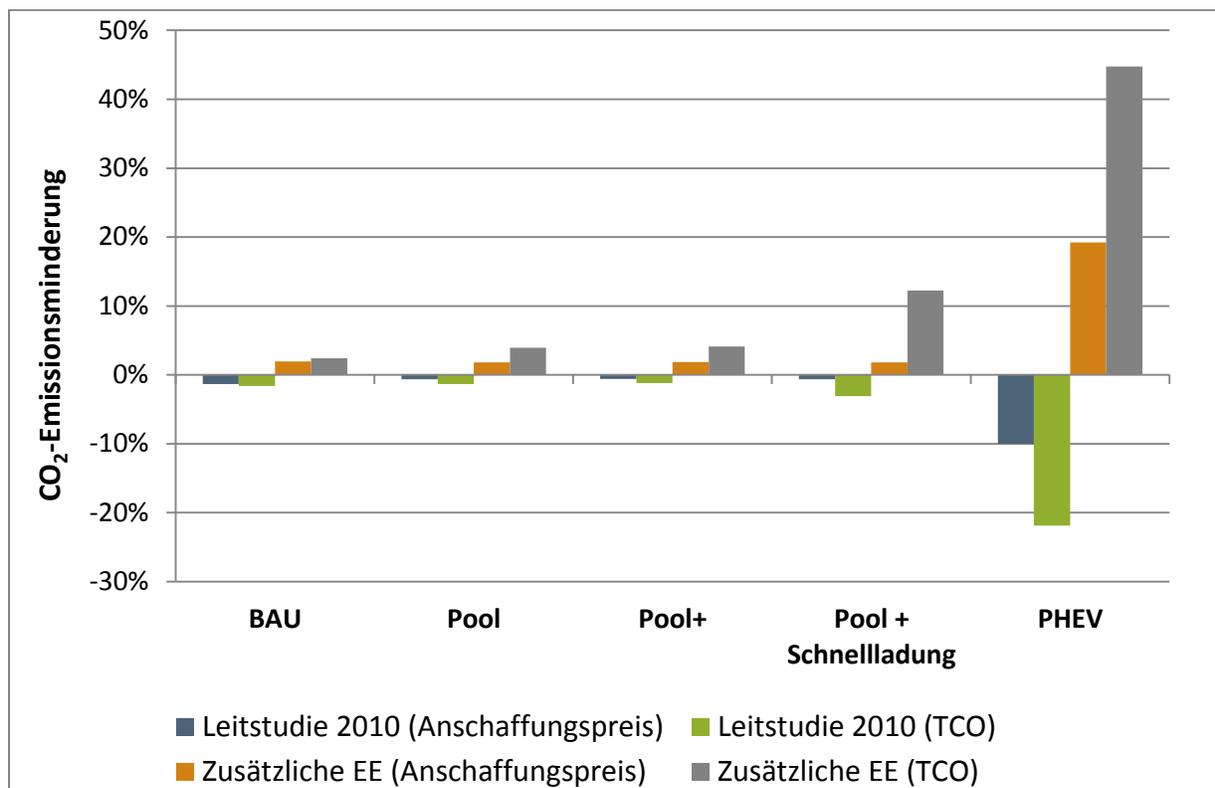


Abbildung 21: Relative CO₂-Einsparung durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen für das Unternehmen SAP - 2020

Werden, wie in Abschnitt 314.1 dargestellt, zusätzliche erneuerbare Energien für die Nutzung der elektrischen Fahrzeuge zugebaut, zeigen sich in allen Szenarien Potenziale zur Emissionsminderung in der Dienstwagenflotte von SAP. Unter Berücksichtigung der Vollkosten bei Bestimmung der Mitarbeiterbeteiligung für die Kosten des Dienstwagens sowie mit Hilfe eines Mobilitätskonzepts mit der Bereitstellung eines konventionellen Fahrzeugpools für lange Fahrten können die CO₂-Emissionen für die Dienstwagenflotte gemäß der vorgestellten Modellierung im Vergleich zu einer rein konventionellen Dienstwagenflotte um 12 % reduziert werden. Werden allerdings auch Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge als Dienstwagen angeboten, erhöht sich die potenzielle Emissionsreduktion, da davon ausgegangen wird, dass Plug-In-Hybrid-Pkw in allen Größenklassen zur Verfügung stehen werden. Bei einer Vollkostenbetrachtung kann durch den Einsatz von Plug-In-Hybrid-Pkw laut der Modellierung im Jahr 2030 die CO₂-Emissionen um fast 50 % gegenüber einer rein konventionellen Dienstwagenflotte reduziert werden.

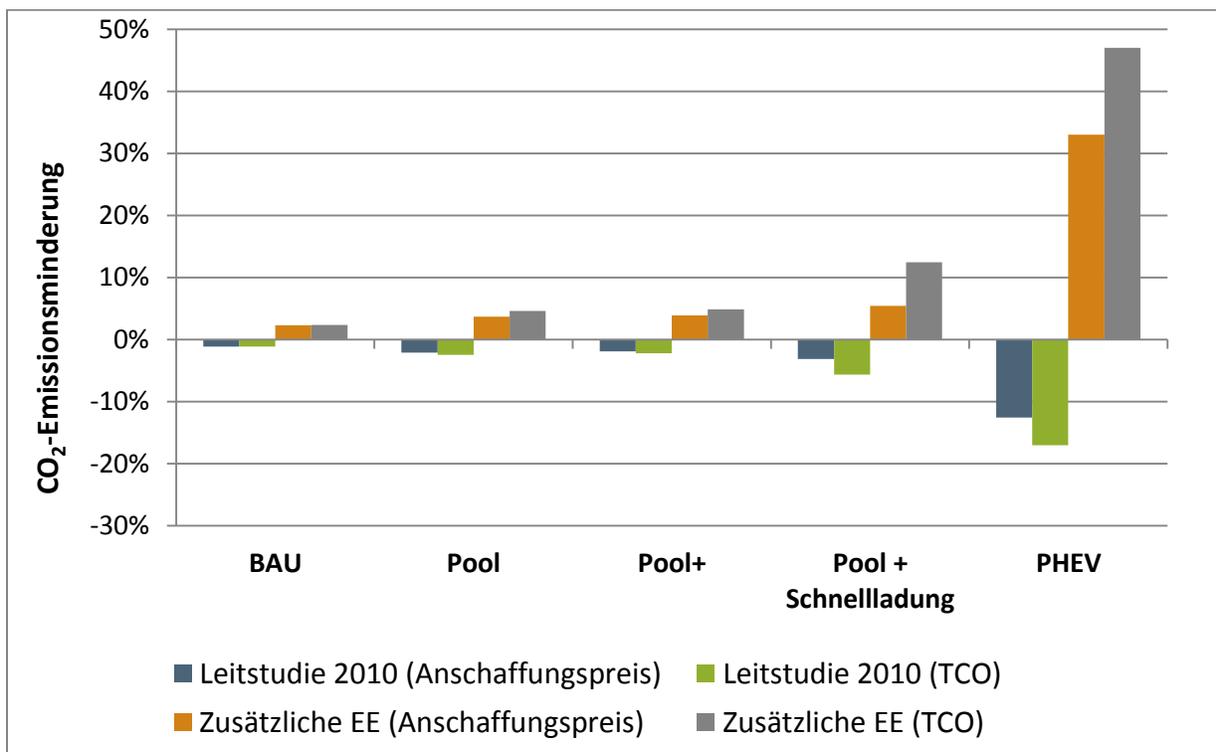


Abbildung 22: Relative CO₂-Einsparung durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen für das Unternehmen SAP - 2030

4.5 Mögliche Entwicklungspfade von Elektromobilität für Dienstwagenflotten in Deutschland

In diesem Abschnitt sollen mögliche Entwicklungen von Elektromobilität bezüglich der gesamten Dienstwagenflotte in Deutschland vorgestellt und diskutiert werden. Das Vorgehen, welches zur Bestimmung der Bestandsentwicklung von Dienstwagen in Deutschland und zur Emissionsberechnung gewählt wurde, wurde bereits in Kapitel 4.3 beschrieben. Gleichzeitig werden dieselben Szenarien abgebildet wie in der Betrachtung für das Unternehmen SAP (Abschnitt 4.4). Einzig auf die Berechnung des Szenarios „Pool+“ wird verzichtet, da sich gezeigt hat, dass nur geringe Unterschiede zu dem Szenario „Pool“ auftreten.

Für die Bestimmung der Fahrleistung der Dienstwagen wird wie zuvor die Annahme getroffen, dass die in der Studie MiD 2008 aufgeführten gewerblichen Fahrzeuge repräsentativ für die Dienstwagenflotte Deutschlands sind. Somit kann die Fahrleistung der konventionellen Fahrzeuge differenziert nach Größenklassen und Antriebstyp abgeleitet werden (Tabelle 23). Für die batterieelektrischen Fahrzeuge wird die Fahrleistung aus einer gewichteten Mittelung (Gewichtungsfaktor: Verteilung Antriebstyp) der Fahrleistung der konventionellen Fahrzeuge der entsprechenden Größenklasse bestimmt. Diese Fahrleistung wird auch für die Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge angenommen, deren elektrischer Fahranteil wie bereits in der Betrachtung für SAP gemäß der Jahresfahrleistung variiert¹².

Tabelle 23: Jahresfahrleistung von Dienstwagen in Deutschland – abgeleitet aus MiD 2008

Größenklasse	Jahresfahrleistung Otto-Motor [km]	Jahresfahrleistung Diesel-Motor [km]	Jahresfahrleistung BEV [km]
klein	13.077	26.645	17.174
mittel	15.905	31.687	23.951
groß	16.947	32.173	-

Da auch in diesem Abschnitt Szenarien mit Mobilitätskonzepten analysiert werden, wird die Fahrleistung der Fahrten benötigt, die nicht mit einem batterieelektrischen Fahrzeug zurückgelegt werden können. Diese Fahrleistung wird ebenfalls über die in der MiD 2008 aufgeführten, gewerblich zugelassenen Fahrzeuge abgeleitet, indem Fahrten über der angenommenen, maximalen Reichweite der batterieelektrischen Fahrzeuge als Fahrten mit einem Fahrzeug aus dem konventionellen Fahrzeugpool deklariert werden (Tabelle 24). Dabei sind Fahrzeuge großer Fahrzeugklassen nicht berücksichtigt, da für große Fahrzeugklassen angenommen wird, dass keine batterieelektrischen Fahrzeugen in den Jahren 2020 und 2030 zur Verfügung stehen werden.

¹² Elektrischer Fahranteil Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge: Jahresfahrleistung < 15.000 km: 0,8; Jahresfahrleistung 15.000 km – 25.000 km: 0,67; Jahresfahrleistung > 25.000 km: 0,5

Tabelle 24: Jahresfahrleistung in Szenarien mit Mobilitätskonzept (Betrachtung Dienstwagenflotte in Deutschland)

Größenklasse	Jahresfahrleistung BEV [km]	Jahresfahrleistung Poolfahrzeug [km]
klein	11.782	5.392
mittel	16.432	7.519

4.5.1 Ergebnisse der Szenariobetrachtung

Auf die Darstellung der Ergebnisse der TCO-Analyse wird an dieser Stelle verzichtet, da die generellen Aussagen denen in Kapitel 4.4.1 entsprechen. Die Ergebnisse des Potenzials für elektrische Fahrzeuge ähneln den Ergebnissen der Potenzialbetrachtung für das Unternehmen SAP. Das geringste Maximalpotenzial weist die Betrachtung des Basisszenarios auf. Dieses wird in dieser Betrachtung durch die hohe Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fahrten über der maximalen Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge begrenzt (Abbildung 23 und Abbildung 24).

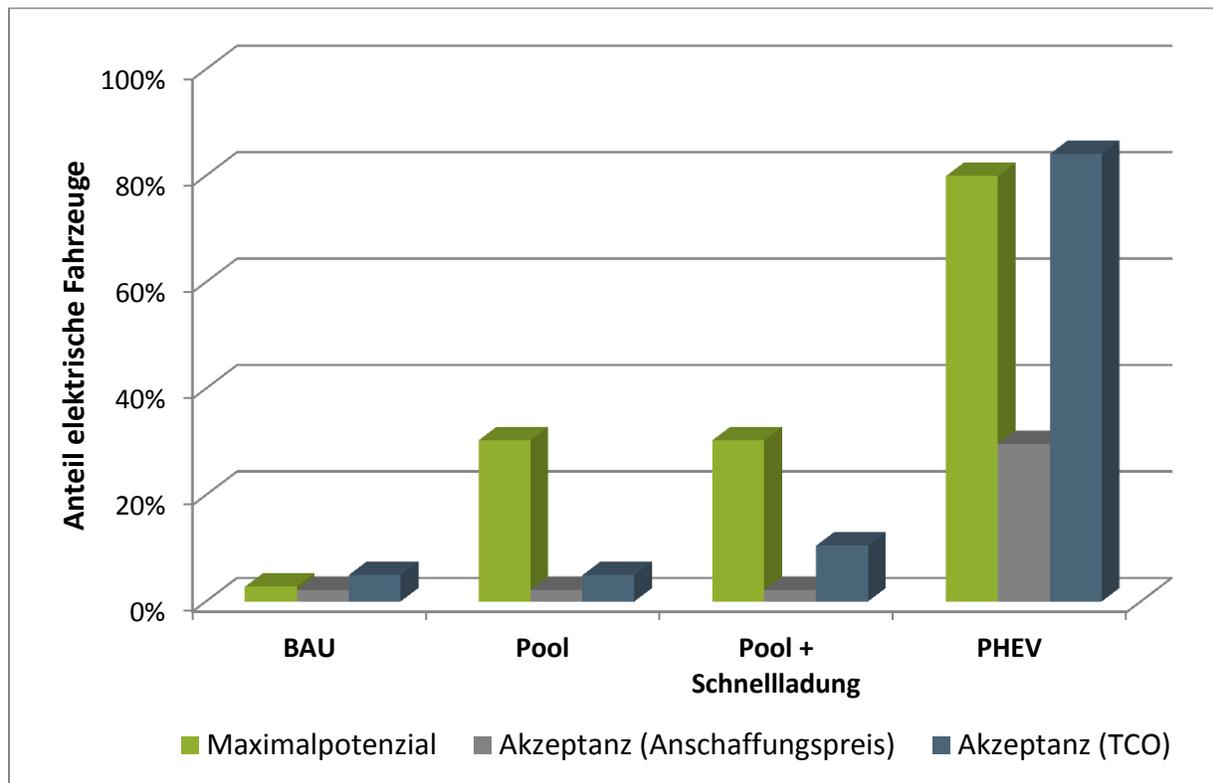


Abbildung 23: Potenzialabschätzung für elektrische Fahrzeuge in der Dienstwagenflotte in Deutschland – 2020

In den Szenarien mit Mobilitätskonzept wird angenommen, dass die Fahrzeugnutzer 20 Reichweitenüberschreitungen pro Jahr akzeptieren¹³, da ihnen ein konventionelles Fahrzeug aus dem Fahrzeugpool für lange Fahrten zur Verfügung steht. Dadurch verringert sich die Wahrscheinlichkeit an Nutzungskonflikten, so dass das Maximalpotenzial einerseits durch die Verfügbarkeit an Stellplätzen mit Lademöglichkeit, andererseits aber auch durch die Größenklassenstruktur des Dienstwagenbestandes limitiert ist. Werden Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge betrachtet, wird als einzige Restriktion für das Maximalpotenzial die Verfügbarkeit eines Stellplatzes mit einer Ladestation betrachtet, so dass sich das Maximalpotenzial im Vergleich zu den restlichen Szenarien erheblich erhöht.

Werden die Anschaffungskosten als Grundlage für die Mitarbeiterbeteiligung an den Kosten des Dienstwagens angesetzt, stellen die Mehrkosten für den Erwerb eines elektrischen Fahrzeugs in den meisten Fällen die Restriktion für die Akzeptanz dar. In den Szenarien mit Berücksichtigung der Vollkostenbetrachtung reduziert sich die Bedeutung der Mehrkosten von elektrischen Fahrzeugen erheblich. Im Basisszenario ist dann die geringe Zustimmung zur reduzierten Reichweite der batterieelektrischen Fahrzeuge der entscheidende Faktor für die Akzeptanz.

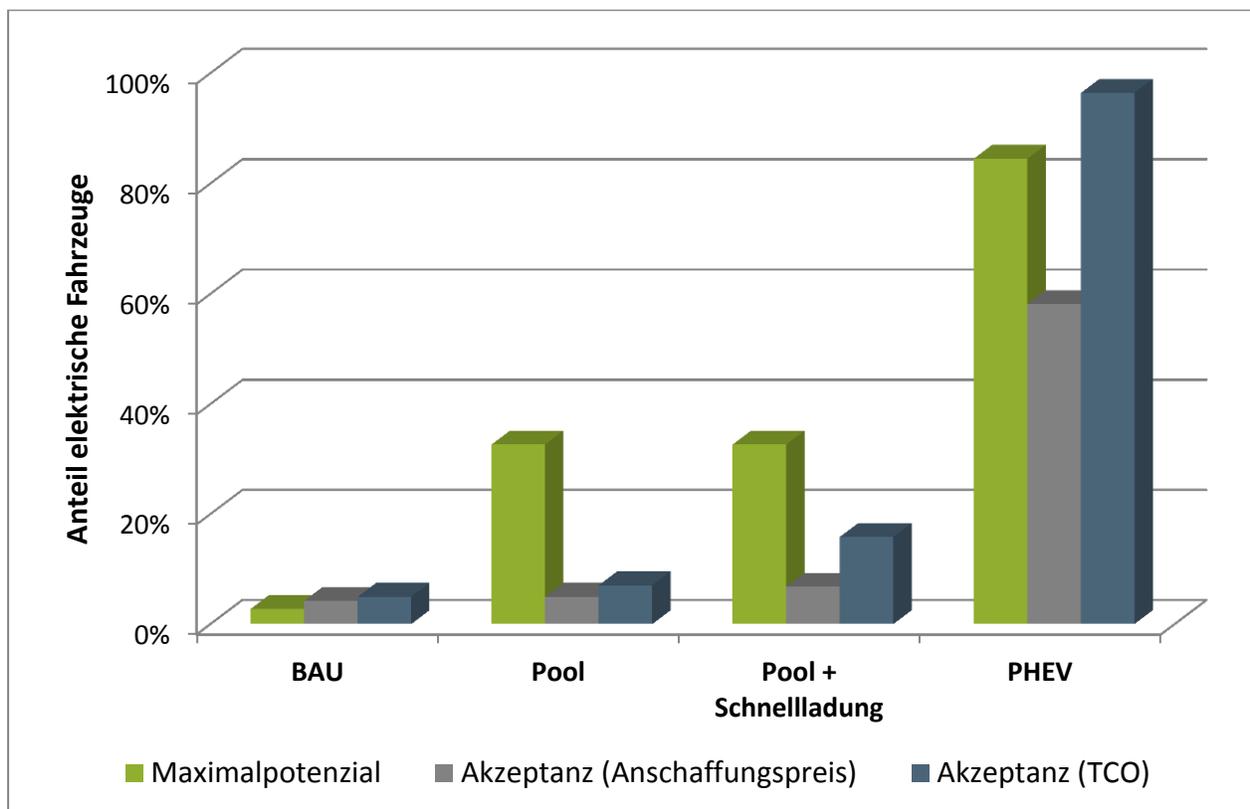


Abbildung 24: Potenzialabschätzung für elektrische Fahrzeuge in der Dienstwagenflotte in Deutschland – 2030

¹³ Im Basisszenario wird angenommen, dass die Besitzer eines batterieelektrischen Pkw acht Reichweitenüberschreitungen pro Jahr akzeptieren.

Da die geringe Reichweite der batterieelektrischen Fahrzeuge in den Szenarien mit Mobilitätskonzept für die Akzeptanzbestimmung keine Rolle spielt, ist im Szenario „Pool“ die Zustimmung zu den angenommenen Ladedauern die begrenzende Mindestanforderung für die Akzeptanz von elektrischen Fahrzeugen. Wird allerdings eine höhere Ladeleistung an den Ladestationen angenommen, sind selbst bei einer Vollkostenbetrachtung die Mehrkosten für den Erwerb der elektrischen Fahrzeuge der limitierende Faktor für die Akzeptanz.

In den Szenarien für Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge sind die Kosten der einzige untersuchte Faktor. Wie bereits in der Betrachtung für das Unternehmen SAP, liegt die Akzeptanz bei einer Vollkostenbetrachtung für Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge über dem Maximalpotenzial, in das die Verfügbarkeit von Ladeplätzen als entscheidendes Kriterium mit einfließt.

Die CO₂-Minderungspotenziale für die betrachteten Szenarien sind in Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellt und orientieren sich stark an der vorgestellten Bestandsentwicklung der Dienstwagenflotte in Deutschland. Wird für die Strombereitstellung ein Kraftwerkspark gemäß der Leitstudie 2010 der Strommarktmodellierung zu Grunde gelegt, ergeben sich in Verbindung mit den Energieverbräuchen der elektrischen Fahrzeuge im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen höhere Emissionsfaktoren.

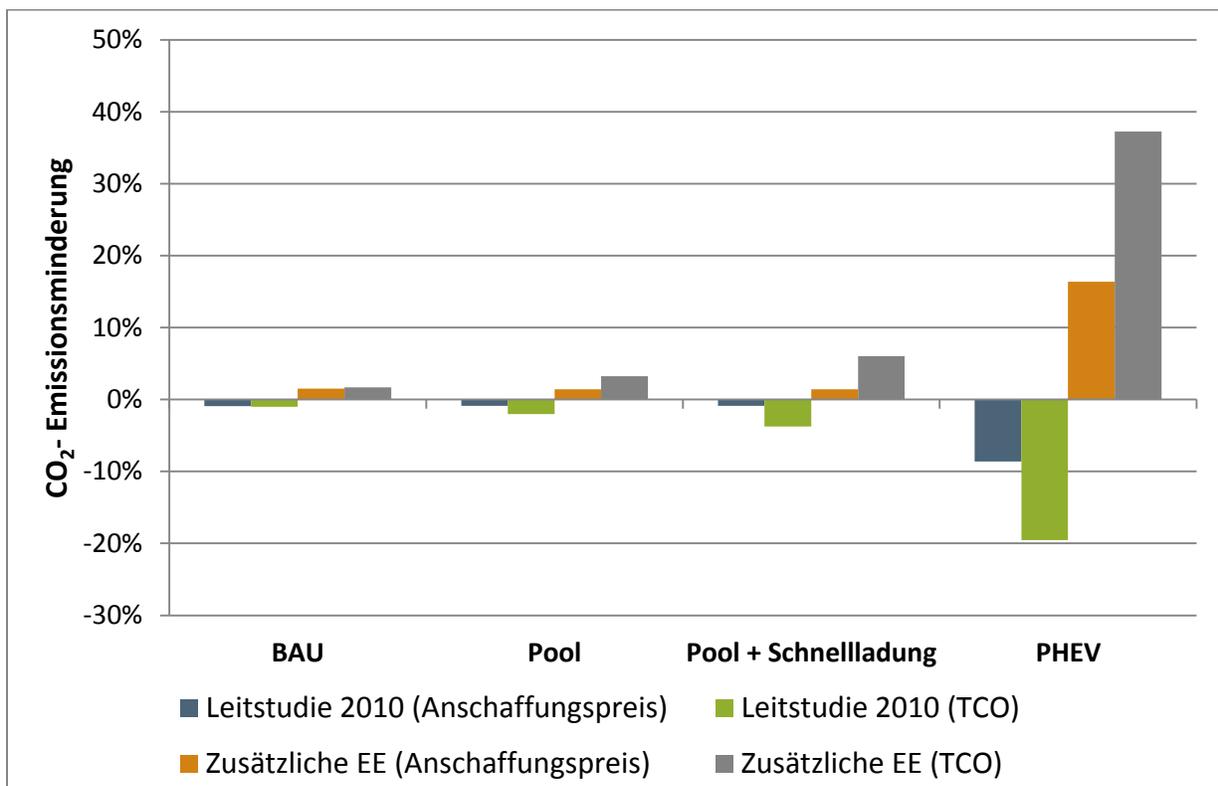


Abbildung 25: Relative CO₂-Einsparung durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen für die Dienstwagenflotte in Deutschland - 2020

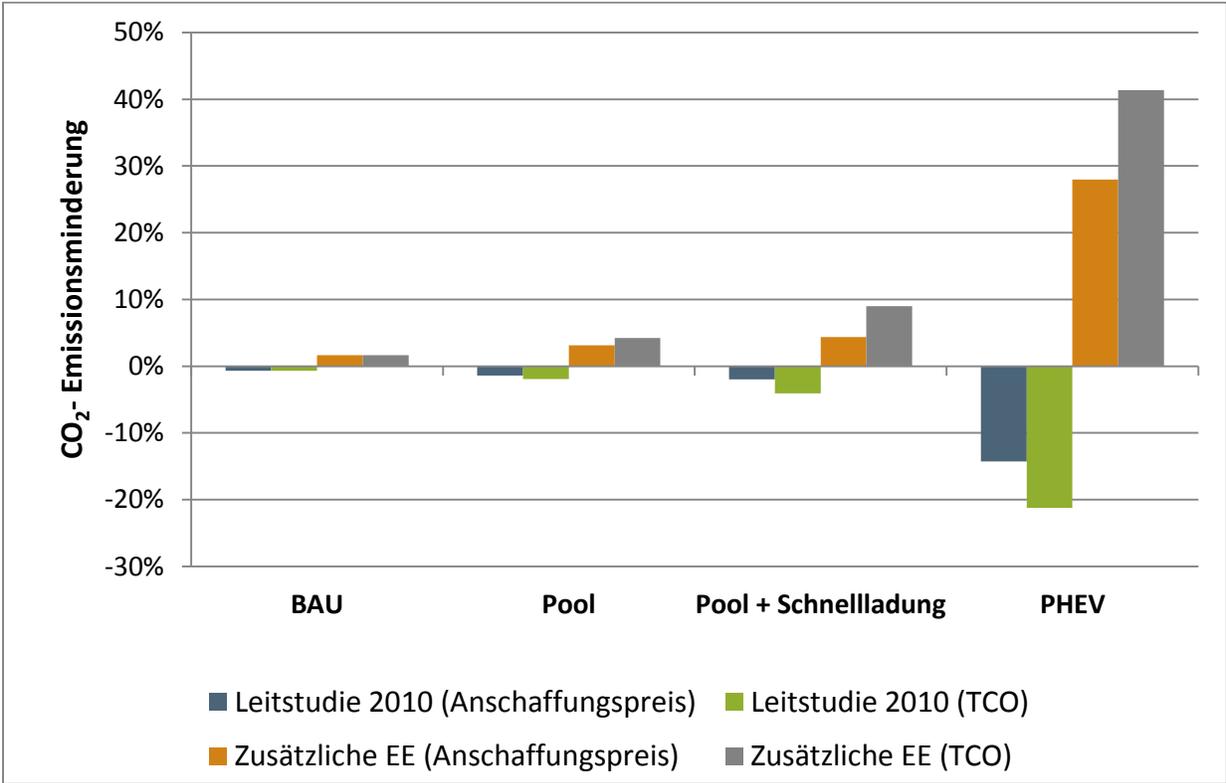


Abbildung 26: Relative CO₂-Einsparung durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen für die Dienstwagenflotte in Deutschland – 2030

Aus diesem Grund zeigen sich in der CO₂-Bilanzierung bei der Nutzung elektrischer Fahrzeuge mehr Emissionen als in einer rein konventionellen Dienstwagenflotte. Werden allerdings die Emissionsfaktoren, die sich bei dem Zubau zusätzlicher erneuerbarer Energien ergeben, für die Nutzung elektrischer Fahrzeuge angesetzt, zeigt sich ein erhebliches Potenzial der Emissionsminderung.

Unter Berücksichtigung eines möglichen Mobilitätskonzepts und einer starken Verbreitung von Ladestationen mit hoher Ladeleistung ergibt sich bei der Integration von batterieelektrischen Fahrzeugen im Jahr 2030 ein CO₂-Minderungspotenzial von annähernd 10 %. Werden allerdings Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge in den Szenarien betrachtet, wird mittels der vorgestellten Systematik unter der Annahme einer Vollkostenbetrachtung eine CO₂-Minderung von über 40 % im Jahr 2030 ermittelt.

5 Zusammenfassung

Dienstwagen beeinflussen durch ihren hohen Anteil an den Neuzulassungen von derzeit rund 60 % deutlich den Fahrzeugbestand und damit die CO₂-Emissionen der Pkw in Deutschland, die im Jahr 2009 für rund 60 % des Verkehrssektors verantwortlich waren. Die Reduktion der Emissionen von Dienstwagen kann damit einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Neben der Anschaffung besonders effizienter und kleinerer Pkw können hier alternative Antriebe wie der Elektromotor eine Möglichkeit darstellen. Genau dort setzt das Projekt Future Fleet an: Es wurden batterieelektrische Fahrzeuge in die Firmenwagenflotte der SAP AG integriert. Der Flottenversuch hat damit die Gelegenheit geboten, auf Basis von realen Nutzungs- und Fahrzeugdaten das Umweltentlastungspotenzial für die Anwendung von batterieelektrischen Pkw als Dienstwagen und als Poolfahrzeuge von SAP zu quantifizieren und darauf aufbauend weitere zukünftige Potenziale abzuleiten.

5.1 Arbeitsschritte

Für eine fundierte Beurteilung des Umweltnutzens von Elektrofahrzeugen ist die Kenntnis über Energieverbräuche, die tatsächlich beim täglichen Betrieb anfallen, und auftretende Ladeverluste eine Grundvoraussetzung. Entsprechende Daten wurden im Rahmen des Flottenversuches unter Realbedingungen durch den Einsatz von 27 batterieelektrischen Fahrzeugen erhoben. Der Energieverbrauch der Fahrzeuge im Realbetrieb in Kopplung mit der durch Elektrofahrzeuge geleisteten Fahrleistung ermöglichte die Quantifizierung des Gesamtstrombedarfs der Flotte und kombiniert mit den Emissionen der Strombereitstellung die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen. Für eine Gesamtwirkungsabschätzung wurden dann die aus der Strombereitstellung resultierenden Emissionen den Emissionen konventioneller verbrennungsmotorischer Fahrzeuge gegenübergestellt. Aus der Differenz konnte so der Netto-Emissionsvorteil der teilweise elektrisch betriebenen Fahrzeugflotte berechnet werden. Aufbauend auf den Ergebnissen der Akzeptanz- und Nutzungsanalysen wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens des Weiteren in verschiedenen Szenarien untersucht, welchen Umweltnutzen eine Ausdehnung des Flottenversuchs auf die gesamte Fahrzeugflotte von SAP haben würde. Zum anderen wurde auf Basis der erfolgten Analysen das Gesamtpotenzial für betriebliche Fahrzeugflotten in Deutschland in Szenarien abgeleitet und auf seine Umweltentlastungspotenziale hin untersucht.

5.2 Wesentliche Erkenntnisse und Ergebnisse

Im Flottenversuch Future Fleet wurden die für das Projekt installierten Ladestationen mit einer Technologie ausgestattet, die es ermöglichte, neben der Fahrleistung der eingesetzten Fahrzeuge den Batterieladestand und die Stromentnahme aus dem Stromnetz aufzuzeichnen. Aus diesen Realdaten konnten wichtige Kenngrößen für den Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen bestimmt werden. Wesentliche Erkenntnisse des Flottenversuchs sind:

- Die Vollladung einer annähernd leeren Batterie dauert ca. 3 Stunden.

- Der Ladewirkungsgrad beträgt ca. 80 %.
- Der Gesamtwirkungsgrad des Flottenversuchs beträgt 55 %. Durch Erhaltungsladungen und elektrische Verbraucher im Fahrzeug wurde nach Vollauffüllung der Batterie weiter Strom aus dem Netz entnommen.
- Der mittlere spezifische Energieverbrauch während des Fahrens beträgt 17,7 kWh / km.
- Bis Anfang September 2011 wurden 88.231 km zurückgelegt.

5.2.1 CO₂-Bilanz Future Fleet

Die so gewonnenen Realdaten wurden in einer CO₂-Bilanzierung für den Flottenversuch Future Fleet verwendet. Vor Start der Ausgabe der elektrischen Fahrzeuge und während ihrer Nutzung wurden von den Teilnehmenden des Flottenversuchs Mobilitätstagebücher geführt. Die so gewonnenen Mobilitätsdaten konnten verwendet werden, um Veränderungen im Mobilitätsverhalten durch die Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen zu untersuchen.

- Während der Nutzung des Elektrofahrzeugs als Dienstwagen sank die Gesamtfahrleistung (Dienstwagen und Privatwagen) der Teilnehmenden um 15 %.
- Die Teilnehmenden verlagerten Fahrten von dem batterieelektrischen Dienstwagen auf den konventionellen Privatwagen. Der Anteil der Fahrleistung des Privatwagens stieg von 3 % auf 32 %.

Anzumerken ist dabei, dass die einwöchige Nutzung eines batterieelektrischen Fahrzeugs als Dienstwagen keine repräsentative, quantitative Bestimmung eines Verlagerungseffekts zulässt, da einerseits unterschiedliche Wochen des Jahres miteinander verglichen und von den Teilnehmenden andererseits teilweise untypische Fahrten mit dem elektrischen Fahrzeug zurückgelegt wurden. Dass eine Verlagerung auf andere Verkehrsträger zur Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse stattfindet, konnte allerdings eindeutig aufgezeigt werden.

Für die CO₂-Bilanz des Flottenversuchs wurde neben den real angefallenen Fahrleistungen vor und während der Nutzung des Elektrofahrzeugs ein Szenario mit angepasster Fahrleistung für die elektrischen Fahrzeuge berechnet, in dem die Gesamtfahrleistung der Fahrleistung des Mobilitätsverhaltens vor Besitz der Elektrofahrzeuge entspricht.

Für den Flottenversuch wurde Strom aus erneuerbaren Altanlagen und direkt vermarkteten EEG-Anlagen bereitgestellt. Dieser Strom wird in der CO₂-Bilanzierung mit dem Emissionsfaktor des Strommixes in Deutschland belegt. Um die Potenziale zur Emissionsminderung aufzuzeigen, wurden zudem Szenarien mit Strombezug aus erneuerbaren Neuanlagen berechnet.

- Durch den Flottenversuch Future Fleet wurden die CO₂-Emissionen der teilnehmenden SAP-Mitarbeiter aus der Pkw-Nutzung um fast 20 % reduziert.
- Bei Strombezug aus erneuerbaren Neuanlagen ergibt sich unter Berücksichtigung der Fahrleistungsanpassung eine potenzielle Emissionseinsparung von annähernd 70 %.

5.2.2 Szenariobetrachtungen

Für die Ableitung von zukünftigen Emissionsminderungspotenzialen wurde eine Strommarktmodellierung durchgeführt und Emissionsfaktoren für die zusätzliche Strombereitstellung ermittelt. Dabei wurden Simulationsläufe mit und ohne Beteiligung von Elektromobilität am Stromsystem berechnet. Die sich bei diesen Simulationsläufen ergebende Differenz der Stromerzeugung wurde ebenso wie die zusätzlich entstehenden Emissionen vollständig den elektrischen Fahrzeugen zugesprochen.

Zudem wurde ein Modell zur Berechnung der Gesamtbetriebskosten des Fahrzeugbesitzes von konventionellen und elektrischen Fahrzeugen entwickelt. Es ist denkbar, dass Unternehmen ihre Mitarbeiter in Zukunft gemäß einer solchen Total Cost of Ownership an den Kosten des Dienstwagens beteiligen. Heute ist in den meisten Unternehmen der Anschaffungspreis der Fahrzeuge maßgebend für die Kostenbeteiligung der Mitarbeiter.

Das heutige Mobilitätsverhalten diene in der Potenzialabschätzung als Grundlage für die Bestimmung des zukünftigen Maximalpotenzials elektrischer Fahrzeuge. Das Maximalpotenzial stellt in der vorgestellten Methodik der Potenzialabschätzung die Obergrenze für die Anzahl an elektrischen Fahrzeugen dar und verbindet das Mobilitätsverhalten mit den Rahmenbedingungen von Elektromobilität.

Die Akzeptanz für elektrische Fahrzeuge wurde aus den Ergebnissen der empirischen Untersuchung während des Projekts Future Fleet gewonnen. Als Restriktionen wurde die Zustimmung zu den möglichen Mehrkosten elektrischer Fahrzeuge, zu der begrenzten Reichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen und zu der Ladedauer von Fahrzeugbatterien untersucht.

Wesentliche Ergebnisse der Ableitung von zukünftigen Emissionsminderungspotenzialen durch die Integration von elektrischen Fahrzeugen in Dienstwagenflotten sind:

- Bei Berücksichtigung eines Kraftwerkparks gemäß der Leitstudie 2010 ergeben sich höhere Emissionsfaktoren für elektrische Fahrzeuge als für konventionelle Fahrzeuge. Werden zusätzliche erneuerbare Energieanlagen zugebaut, kann der zusätzliche Strombedarf durch Elektromobilität annähernd emissionsfrei gedeckt werden.
- Elektrische Fahrzeuge weisen bei Betrachtung der Vollkosten wesentlich geringere Mehrkosten auf als bei alleiniger Betrachtung der Anschaffungskosten. Für das Jahr 2030 wurde mit dem verwendeten Modell für batterieelektrische Fahrzeuge teilweise eine geringere Total Cost of Ownership berechnet als für vergleichbare konventionelle Fahrzeuge. Somit steigt bei Berücksichtigung der Vollkosten für die Mitarbeiterbeteiligung am Dienstwagenkauf die Akzeptanz für elektrische Fahrzeuge.
- Das Potenzial an batterieelektrischen Dienstwagen ist durch die Tatsache eingeschränkt, dass nicht davon auszugehen ist, dass große Größenklassen mit rein elektrischen Fahrzeugen bedient werden können. Findet keine Veränderung der Struktur der Dienstwagenflotte statt, kann ein großer Anteil der Dienstwagen alleine durch Plug-In-

Hybrid-Fahrzeuge bedient werden.

- Das Potenzial für die Integration batterieelektrischer Fahrzeuge in die Dienstwagenflotte steigt mit dem Angebot von Mobilitätskonzepten, da die Problematik der geringeren Reichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen somit abgemildert wird.
- Das Unternehmen SAP kann durch die Integration von batterieelektrischen Fahrzeugen in Verbindung mit dem Angebot eines Mobilitätskonzepts bis zu 12 % der CO₂-Emissionen der Dienstwagenflotte reduzieren. Auf die gesamte Dienstwagenflotte Deutschlands hochgerechnet, kann der CO₂-Ausstoß gemäß der vorgestellten Modellierung um annähernd 10 % reduziert werden.
- Wird die Integration von Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen in die Dienstwagenflotte untersucht, ergeben sich für die Dienstwagenflotte des Unternehmens SAP CO₂-Emissionsreduktionspotenziale von annähernd 50 %. Das Emissionsminderungspotenzial für die gesamte deutsche Dienstwagenflotte liegt bei über 40 %.

Durch den Flottenversuch Future Fleet ist offensichtlich geworden, dass für das Gesamtsystem Elektromobilität noch erhebliche Optimierungspotenziale bestehen. Diese Tatsache verwundert nicht, da sich die Entwicklung von Elektrofahrzeugen und des dazugehörigen Gesamtsystems an Ladeinfrastruktur und Fahrzeugmanagement noch in der Startphase befindet. Flottenversuche wie Future Fleet bieten daher die Möglichkeit, Erfahrungen im Umgang mit Elektrofahrzeugen zu sammeln und weitere Optimierungspotenziale aufzuzeigen.

Der Einsatz von elektrischen Fahrzeugen im Unternehmenskontext bildet einen Spezialfall der Fahrzeugnutzung ab, da Dienstwagen im Vergleich zu privat zugelassenen Fahrzeugen eine hohe Fahrleistung besitzen und dabei häufig lange Strecken zurückgelegt werden. Das Potenzial für die Integration von elektrischen Fahrzeugen in die Dienstwagenflotte erhöht sich deutlich durch das Angebot von Mobilitätskonzepten und dem Angebot an Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen. Elektromobilität bei Dienstwagen kann nur dann wirklich erfolgreich sein, wenn reine batterieelektrische mit Mobilitätskonzepten kombiniert werden oder Plug-In-Hybride eingesetzt werden.

Entscheidend für die Erschließung des Potenzials der CO₂-Emissionsreduzierung ist die Art der Strombereitstellung für Elektrofahrzeuge. Die Ergebnisse von Strommarktssimulationen zeigen, dass sich nur durch zusätzlichen Zubau erneuerbarer Energiequellen ein annähernd emissionsfreier Betrieb des elektrischen Fahrens realisieren lässt. Strom aus zusätzlichen erneuerbaren Energien ist damit eine Voraussetzung dafür, dass Elektromobilität einen Beitrag zum Klimaschutz leistet.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt, *Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2010. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2010*. Umweltbundesamt, 2011.
- [2] N. Richter, Persönliche Email vom 04.08.2011: Daten aus TREMOD 5.22. Umweltbundesamt, 2011.
- [3] H. Bär et al., *Wege zum Abbau umweltschädlicher Subventionen*. Friedrich-Ebert-Stiftung, Berlin, 2011.
- [4] L. Diekmann et al., *Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland*. Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln, 2011.
- [5] R. Follmer et al., *Mobilität in Deutschland 2008*. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2010.
- [6] German E-Cars GmbH, *Stromos City-Carrier*. German E-Cars GmbH, 2009.
- [7] Öko-Institut e.V., *GEMIS - Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme Version 4.6*. Öko-institut e.V., 2010.
- [8] Öko-Institut e.V., *GEMIS - Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme Version 4.7*. Öko-institut e.V., 2011.
- [9] J. Deffner et al., *Elektrofahrzeuge in betrieblichen Fahrzeugflotten – Akzeptanz, Attraktivität und Nutzungsverhalten (Anhang zum Schlussbericht zum Forschungsprojekt Future Fleet)*. Frankfurt a.M., 2011.
- [10] ifeu, *Fortschreibung und Erweiterung "Daten- und Rechenmodell : Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMOD , Version 5)"*. Heidelberg, 2010.
- [11] Öko-Institut e.V., Institut für sozial-ökologische Forschung, *OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft*. 2011.
- [12] J. Nitsch et al., *Leitstudie 2010. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*, 2010.
- [13] Öko-Institut e.V., *Politiksznarien für den Klimaschutz VI (unveröffentlicht; in*

Bearbeitung). 2011.

- [14] F. C. Matthes et al., *Politikszenerarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel*. 2009.
- [15] Entso-e, *Consumption Data 2008.*, <https://www.entsoe.eu/db-query/country-packages/production-consumption-exchange-package/>.
- [16] Öko-Institut e.V., *Betrachtung der Umweltentlastungspotenziale durch den verstärkten Einsatz von kleinen, batterieelektrischen Fahrzeugen im Rahmen von E-Mobility*. 2011.
- [17] M. Wermuth et al., *Kraftfahrzeugsverkehr in Deutschland - KiD 2002*. 2002.
- [18] infas and DLR, *Mobilität in Deutschland 2008*. 2010.
- [19] United States Environmental Protection Agency, *Light-Duty Automotive Technology - Carbon Dioxide Emissions and Fuel Economy Trends : 1975 Through 2010*. Washington, D.C., 2010.
- [20] Die Bundesregierung, *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität*. Berlin, August 2009.
- [21] W. Kiersdorf, *Wahrnehmung und Beurteilung der Nutzungskosten von Automobilen (Cost-of-Ownership)*, 11. Ausgabe. Berlin: AutoUni - Schriftenreihe, 2010, S. 441.
- [22] P. Mock, *Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21) - Simulation*. DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Fahrzeugkonzepte Stuttgart, 2010.
- [23] G. Stegmeier and B. Santer, *Die Neuwagen mit dem geringsten Wertverlust*. *Focus Online*, April 2011.
- [24] ADAC, *ADAC Autokosten 2011*. New Look electronic publishing GmbH, 2011.
- [25] Nationale Plattform Elektromobilität, *Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität - Anhang*. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, 2011.
- [26] Bundesministerium der Finanzen, *In drei Schritten zur neuen Kfz-Steuer*. 2011.
- [27] TÜV Nord, *PREISLISTE (Auszug) Technische Prüfstelle für den Kfz-Verkehr*. TÜV Nord, 2011.

- [28] Industrie und Handelskammer für München und Oberbayern, *Verbraucherpreisindex für Deutschland*. 2011.
- [29] I. Rüdener et al., *Costs and Benefits of Green Public Procurement in Europe - General Recommendations*. Öko-institut e.V. 2007.
- [30] Deutsche Bundesbank, *Abzinsungszinssätze gemäß § 253 Abs. 2 HGB*. Deutsche Bundesbank Eurosystem, 2011.
- [31] M. Schlesinger et al., *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2010.

Anhang A: Szenarioannahmen

Tabelle (Anhang) 1: Rahmenbedingungen für Elektromobilität

Kategorie	Annahme
Fahrzeugsegment batterieelektrische Fahrzeuge	Mini, Kleinwagen, Kompaktklasse, Mini-Van
Fahrzeugsegment Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge	alle
Nominelle elektrische Reichweite	BEV: 160 km / PHEV: 50 km
Mindestreserve Batterie	BEV: 20 km
Verbrauch Nebenaggregate	10 % von nominellen Energieverbrauch
Nutzbare Reichweite	BEV: 124 km / PHEV: keine Beschränkung
Ladeleistung BAU	Eigenes Grundstück: 2020: 3 kW / 2030: 7 kW Restliche Standorte: 2020 / 2030: 11 kW
Ladeleistung Schnellladung	Eigenes Grundstück: 2020: 3 kW / 2030: 7 kW Restliche Standorte: 2020 / 2030: 22 kW
Ladewirkungsgrad	90 %
Ladeinfrastrukturdichte	30 % (2020) / 50 % der Personen ohne Stellplatz auf dem eigenem Grundstück besitzen die Möglichkeit der Ladung im öffentlichen Raum
Batteriekosten	2020: 280 €/kWh / 2030: 230 €/kWh
Benzinpreis	2020: 1,52 €/l / 2030: 1,69 €/l
Dieselpreis	2020: 1,41 €/l / 2030: 1,61 €/l
Strompreis (Fahrzeugnutzung)	2020: 0,217 €/kWh / 2030: 0,222 €/kWh

Tabelle (Anhang) 2: Annahmen zu Anschaffungskosten elektrischer Fahrzeuge

Größenklasse	Anschaffungskosten 2020 [€]		Anschaffungskosten 2030 [€]	
	BEV	PHEV	BEV	PHEV
klein	23.090	19.075	22.080	19.310
mittel	33.920	29.550	32.660	29.740
groß	-	52.180	-	52.210

Tabelle (Anhang) 3 Annahmen zu Anschaffungskosten konventioneller Fahrzeuge

Größenklasse	Anschaffungskosten 2020 [€]		Anschaffungskosten 2030 [€]	
	Otto	Diesel	Otto	Diesel
klein	15.250	17.050	16.100	18.000
mittel	24.400	28.970	25.300	30.035
groß	44.700	45.680	45.600	46.600

Tabelle (Anhang) 4: Annahmen zu dem nominellen elektrischen Energieverbrauch von batterieelektrischen und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen

Größenklasse	Energieverbrauch 2020 [kWh _l / km]		Energieverbrauch 2030 [kWh _l / km]	
	BEV	PHEV*	BEV	PHEV*
klein	0,14	0,15	0,13	0,14
mittel	0,17	0,18	0,16	0,17
groß	-	0,21	-	0,20

* Werden PHEV verbrennungsmotorisch angetrieben, werden dieselben Emissionsfaktoren wie bei entsprechenden konventionellen Pkw verwendet.

Tabelle (Anhang) 5: Annahmen zu Verbrauch (real) und CO₂-Intensität konventioneller Fahrzeuge

		Otto-Motor			Diesel-Motor		
Segment	Jahr	Verbrauch [l/100 km]	CO ₂ - Intensität [g CO ₂ /l]	Emissions- faktor [g CO ₂ /km]	Verbrauch [l/100 km]	CO ₂ - Intensität [g CO ₂ /l]	Emissions- faktor [g CO ₂ /km]
klein	2020	4,4	2.573	113	2,9	2.772	80
mittel	2020	5,4	2.573	139	3,9	2.772	109
groß	2020	7,5	2.573	192	5,4	2.772	149
klein	2030	3,9	2.573	100	2,5	2.772	70
mittel	2030	4,7	2.573	122	3,5	2.772	96
groß	2030	6,6	2.573	169	4,7	2.772	131

Anhang B: Annahmen für TCO-Modell

In diesem Anhang wird die Bestimmung einiger in der TCO-Betrachtung verwendeten Größen vorgestellt. Annahmen zum Anschaffungspreis der Fahrzeuge und zu den Kraftstoffkosten entsprechen den Annahmen in Anhang A und sind dort aufgeführt. Die Restwertbestimmung ist detailliert in Kapitel 4.2 vorgestellt. Somit wird in an dieser Stelle vor allem auf die variablen Kosten und die Fixkosten der TCO-Betrachtung eingegangen

Variable Kosten

Für die Bestimmung der variablen Kosten werden wie für die Restwertbestimmung drei stellvertretende Pkw¹⁴ pro Segment und Fahrzeugtyp herangezogen und aus [24] die Kosten für die folgenden Kategorien ausgelesen.

Wartung & Pflege

Unter der Kategorie Wartung & Pflege finden sich Kosten für die Pflege und Wäsche der Pkw, für Reifenwechsel, Reparaturen und Inspektionen. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Kostenarten zwischen konventionellen und elektrischen Pkw nicht unterscheiden. Für batterieelektrische Pkw werden die Kosten des Ottofahrzeugs des gleichen Segments herangezogen.

Schmierstoffe

Die Kategorie Schmierstoffe bildet die Kosten für Ölwechsel bzw. –nachfüllung ab. Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge haben dabei die gleichen Kosten wie das konventionelle Pendant aus diesem Segment. Für batterieelektrische Pkw wird dagegen angenommen, dass keine relevanten Schmierstoffkosten entstehen.

Fixkosten

Für die Bestimmung der Fixkosten wurde – wenn möglich -ebenfalls oben genanntes Verfahren angewandt.

Versicherungen

Für die Bestimmung der Versicherungskosten wurde eine Vollkaskoversicherung angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass es bezüglich der Versicherung keine Unterschiede zwischen konventionellen und elektrischen Pkw gibt. Für Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge sind die Versicherungskosten identisch zu den konventionellen Pendants, für batterieelektrische Pkw werden die Versicherungskosten der entsprechenden Otto-Fahrzeuge herangezogen.

¹⁴ KBA Topseller 2010

Kfz-Steuer

Die Kfz-Steuern für konventionelle Fahrzeuge werden ebenfalls aus [24] ausgelesen. Für die elektrischen Pkw wird die Berechnung nach der Methodik des Bundesministeriums für Finanzen (Erstzulassung 1.7.2009 – 31.12.2011) [26] herangezogen.

Dabei wird davon ausgegangen, dass bei Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen der Hubraum des Verbrennungsmotors gegenüber konventionellen Pkw um 30 % reduziert ist. Die Berechnung der Kfz-Steuer erfolgt dann über Hubraumklassen (orientiert an den ausgewählten Vergleichsfahrzeugen) gemäß [26]. Für batterieelektrische Pkw wird abweichend von [26], in der eine Steuerbefreiung von 10 Jahren vorgesehen ist, von einer Steuerbefreiung über die gesamte Betriebszeit ausgegangen.

Es wird angenommen, dass sich die Höhe der Kfz-Steuer (CO₂-und hubraumbasiert) trotz Effizienzsteigerung bei den Verbrennungsmotoren zukünftig nicht ändert. Implizit wird durch das Vorgehen davon ausgegangen, dass sich die Kfz-Steuer den Effizienzsteigerungen bei konventionellen Pkw anpasst.

Hauptuntersuchung & Abgasuntersuchung

Die Kosten für Haupt- und Abgasuntersuchung sind aus [27], wobei batterieelektrische Pkw von der Abgasuntersuchung ausgenommen sind.

Inflationsrate & Diskontsatz

Inflationsrate

Die Inflationsrate bzw. Verbraucherpreisindex wurde aus einem Mittelwert der historischen Daten von 1990 bis 2010 in Deutschland ermittelt [28]. Die Inflationsrate bleibt über die Zeit konstant 1,48 % pro Jahr. Diese gilt für alle Kostenelemente außer den Kraftstoffen.

Abzinsungszinssatz¹⁵-Diskontierung

Der Abzinsungszinssatz zur Berechnung der Diskontierungsrate wurde an [29], [30] angelehnt und beträgt konstant 4,4 % pro Jahr.

Kraftstoffteuerungsrate

Die Kraftstoffe unterliegen neben der oben genannten allgemeinen Inflationsrate noch einer zusätzlichen spezifischen Kraftstoffteuerungsrate, welche je nach Kraftstoff und betrachtetem Zeitraum unterschiedlich ist. Zur Berechnung der Teuerungsrate wurden für die Stützjahre 2008, 2020 und 2030 aus [31] die Kraftstoffpreise entnommen, so dass über lineare Interpolation die Kraftstoffteuerungsrate für die in Tabelle (Anhang) 6 genannten Zeiträume bestimmt werden konnte.

¹⁵ Auch: Zinsfuß oder interest rate

Tabelle (Anhang) 6: Annahmen zu Kraftstoffteuerungsrate

Zeitraum	Kraftstoffteuerungsrate [%/a]		
	Strom	Benzin	Diesel
2010 - 2020	0,00	0,89	0,72
2020 - 2030	0,23	1,06	1,12
2030 - 2040	0,13	1,07	1,12