

## Innovative Antriebe und Fahrzeuge - Elektro-Pkw und Nutzfahrzeuge



# >> ABSCHLUSSBERICHT: BEWERTUNG DER PRAXISTAUGLICHKEIT UND UMWELTWIRKUNGEN VON ELEKTROFAHRZEUGEN

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

Koordiniert durch:



>> **ABSCHLUSSBERICHT:  
BEWERTUNG DER PRAXISTAUGLICHKEIT  
UND UMWELTWIRKUNGEN VON  
ELEKTROFAHRZEUGEN**

# >> INHALTSVERZEICHNIS

>> TABELLENVERZEICHNIS	6	>> 4 ANALYSE DER NUTZUNGSPROFILE	87
>> ABBILDUNGSVERZEICHNIS	7	4.1 PLANUNGSINDIKATOREN	87
>> KURZFASSUNG	8	4.2 BEISPIELHAFTES CHARAKTERISIEREN VON NUTZUNGSPROFILN	89
>> 1 EINLEITUNG	12	4.3 AUSGEWÄHLTE PROJEKTBEISPIELE	94
>> 2 ÜBERBLICK ÜBER METHODIK UND DATENBASIS	18	>> 5 SZENARIEN	100
2.1 METHODIK DER LANGZEITDATENERFASSUNG	18	5.1 ENTWICKLUNG DES ZUKÜNFTIGEN MIX BEI DER STROMERZEUGUNG IN DEUTSCHLAND	100
2.2 METHODIK DER ÖKOBILANZUNTERSUCHUNG	21	5.1.1 ANNAHMEN	100
2.3 DATENBASIS	25	5.1.2 ERGEBNISSE DER STROMMIX-SZENARIEN	101
2.3.1 DATENBASIS FAHRDATEN	26	5.1.3 ERGEBNISSE AUF FAHRZEUGEBENE 2015/2030	102
2.3.2 DATENBASIS LADEDATEN	29	5.1.4 EINSPARPOTENZIALE DURCH DEN MARKTHOCHLAUF DER ELEKTROFAHRZEUGE	104
>> 3 ERGEBNISSE	32	>> 6 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN	110
3.1 ÖKOBILANZIELLER VERGLEICH VON ELEKTRISCHEN UND KONVENTIONELLEN REFERENZFAHRZEUGEN	32	>> LITERATURVERZEICHNIS	116
3.1.1 EINFLUSS DER FAHRLEISTUNG UND BREAK-EVEN-PUNKTE IM VERGLEICH ZU KONVENTIONELLEN FAHRZEUGEN	37	>> NOMENKLATUR	119
3.2 BETRIEBSDATENAUSWERTUNG	44	>> ANHANG	121
3.2.1 FAHRLEISTUNG	44	>> IMPRESSUM	134
3.2.2 FAHRDISTANZ JE FAHRT	48		
3.2.3 SOC BEI FAHRTBEGINN	51		
3.2.4 SOC BEI LADEBEGINN	53		
3.2.5 ENERGIEVERBRAUCH	54		
3.2.6 LADEENERGIE JE LADUNG	58		
3.2.7 WOCHENGANG DER FAHRTEN	61		
3.2.8 EINFLÜSSE AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH	62		
3.2.9 LADEVERLUSTE	68		
3.3 ÖKOBILANZAUSWERTUNG DER BETRIEBSDATEN	71		
3.3.1 FAHRENERGIEVERBRAUCH	72		
3.3.2 AUSWERTUNG DES FAHRZEUGLEBENSZYKLUS	74		
3.3.3 BANDBREITEN DURCH EINSATZKONTEXTSPEZIFISCHE FAHRENERGIEVERBRAUCHSWERTE	78		
3.3.4 EINFLUSS DER FAHRLEISTUNG	81		

## &gt;&gt; TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Beschreibung der untersuchten Fahrzeugsegmente und Einsatzkontexte	19
Tabelle 2.2:	Vorgehensweisen für die Fahrzeuganalyse	22
Tabelle 2.3:	Betrachtete Umweltwirkungskategorien	23
Tabelle 2.4:	Allgemeine Rahmenbedingungen für die ökobilanzielle Betrachtung	24
Tabelle 2.5:	Datenbestand Fahrdaten (Segmente)	27
Tabelle 2.6:	Datenbestand Fahrdaten (Minis BEV und Kompakt PHEV, Einsatzkontexte)	28
Tabelle 2.7:	Datenbestand Ladedaten (Segmente)	30
Tabelle 2.8:	Datenbestand Ladedaten (Minis, Einsatzkontexte)	31
Tabelle 3.1:	Energieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Abgasemissionen der ermittelten Referenzfahrzeuge	33
Tabelle 3.2:	Zusammenfassung, Break-Even-Punkte der Referenzfahrzeuge im Kompaktwagen-Segment	43
Tabelle 3.3:	Jahresfahrleistung (Segmente) im Vergleich mit der Studie „Mobilität in Deutschland“ [17]	47
Tabelle 3.4:	Energieverbrauch kombiniert (Vergleich: Modellregionen der Phase I, Modellregionen Phase II mit Zwischenbericht und abschließenden Ergebnissen)	57
Tabelle 3.5:	Kenndaten der ermittelten virtuellen Fahrzeuge (Auszug)	72
Tabelle 3.6:	Segment- und einsatzkontextspezifischer Fahrenergieverbrauch (Langzeitdatenerfassung)	73
Tabelle 3.7:	Treibhauspotenzial je Fahrkilometer (Gesamtfahrleistung: 150.000 km)	81
Tabelle 3.8:	Segment- und einsatzkontextspezifische Fahrleistungen (Langzeitdatenerfassung))	82
Tabelle 3.9:	Treibhauspotenzial je Fahrkilometer (unter Annahme von Realfahrleistungen)	86
Tabelle 4.1:	Planungsindikatoren für den Einsatz von Elektrofahrzeugen	88
Tabelle 4.2:	Charakterisierung von Nutzungsprofilen durch Planungsindikatoren	90
Tabelle 5.1:	Annahmen der Szenarien zur Berechnung der Einsparpotenziale durch den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen	105
Tabelle 6.1:	Beschreibung der betrachteten Umweltwirkungskategorien	121
Tabelle 6.2:	Minimaldatenset Fahrt	122
Tabelle 6.3:	Minimaldatenset Ladung	123
Tabelle 6.4:	Nutzungsübersicht der Segmente nach Einsatzkontext (Fahrdaten)	124
Tabelle 6.5:	Nutzungsübersicht der Segmente nach Einsatzkontext (Ladedaten)	126
Tabelle 6.6:	Datengrundlage für die Auswertungen zum SOC bei Fahrtbeginn (Segmente)	130
Tabelle 6.7:	Datengrundlage für die Auswertungen zum SOC bei Ladebeginn (Segmente)	130
Tabelle 6.8:	Datengrundlage für die Auswertungen zum Energieverbrauch (Segmente)	131
Tabelle 6.9:	Übersicht Wirkungskategorien und Emissionsprofile je Fahrkilometer (Gesamtfahrleistung: 150.000 km)	132
Tabelle 6.10:	Übersicht Wirkungskategorien und Emissionsprofile je Fahrkilometer (Realfahrleistung)	133

## &gt;&gt; ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Fahrzeugeinsatz in den Modellregionen	14
Abbildung 2.1:	Kumulierte Fahrdistanz (Segmente) - Zeitliche Entwicklung Datenbestand	26
Abbildung 2.2:	Kumulierte Ladeenergie (Segmente) - Zeitliche Entwicklung Datenbestand	29
Abbildung 3.1:	Vergleich der Referenzfahrzeuge im Kompaktsegment, Treibhauspotenzial	35
Abbildung 3.2:	Einfluss der Fahrleistung auf das Treibhauspotenzial (Referenzfahrzeuge Kompaktsegment)	39
Abbildung 3.3:	Vergleich der Referenzfahrzeuge im Kompaktsegment, Versauerungspotenzial	41
Abbildung 3.4:	Mittlere Jahresfahrleistung je Fahrzeug (Segmente)	45
Abbildung 3.5:	Fahrdistanz je Fahrt (Segmente) - kumulierte Häufigkeit	49
Abbildung 3.6:	SOC bei Fahrtbeginn (Segmente) - kumulierte Häufigkeit	51
Abbildung 3.7:	SOC bei Ladebeginn (Segmente) - kumulierte Häufigkeit	53
Abbildung 3.8:	Energieverbrauch kombiniert (Segmente)	55
Abbildung 3.9:	Ladeenergie je Ladung (Segmente)	59
Abbildung 3.10:	Nutzung über die Woche anhand des Anteils an der Gesamtfahrdistanz (Segmente)	61
Abbildung 3.11:	Minimale Außentemperatur und Energieverbrauch im Zeitverlauf (Minis BEV, Modell A, Region 1)	64
Abbildung 3.12:	Minimale Außentemperatur und Energieverbrauch (Mini-Vans PHEV, Modell E, Region 3), Einzelfahrten (rein elektrisch)	65
Abbildung 3.13:	Minimale Außentemperatur und Energieverbrauch (Minis BEV, Modell A, Region 1), gruppierte x-Achse	66
Abbildung 3.14:	Fahrdistanz und Energieverbrauch (Kompaktklasse BEV, Modell C, Region 3), Einzelfahrten	67
Abbildung 3.15:	Energieflussdiagramm für das AC-Laden (vereinfachte Darstellung nach [26])	69
Abbildung 3.16:	Ladeverlustvergleich Modell A	70
Abbildung 3.17:	Ökobilanzergebnisse des Fahrzeuglebenszyklus des BEV der Kompaktklasse unter Berücksichtigung des ermittelten Fahrenergieverbrauchs der Langzeitdatenerfassung	75
Abbildung 3.18:	Ökobilanzergebnisse des Fahrzeuglebenszyklus des PHEV der Kompaktklasse unter Berücksichtigung des ermittelten Fahrenergieverbrauchs der Langzeitdatenerfassung	77
Abbildung 3.19:	Treibhauspotenzial der Mini-BEV unter Berücksichtigung der einsatzkontextspezifischen Fahrenergieverbräuche (je Fahrkilometer)	79
Abbildung 3.20:	Treibhauspotenzial der BEV und PHEV der Kompaktklasse unter Berücksichtigung der einsatzkontextspezifischen Fahrenergieverbräuche (je Fahrkilometer)	80
Abbildung 3.21:	Treibhauspotenzial des Mini-BEV unter Berücksichtigung der einsatzkontextspezifischen Fahrenergieverbräuche und Fahrleistungen (je km)	84
Abbildung 3.22:	Treibhauspotenzial der BEV und PHEV der Kompaktklasse unter Berücksichtigung der einsatzkontextspezifischen Fahrenergieverbräuche und Fahrleistungen (je km)	85
Abbildung 5.1:	Entwicklung Strommix DE und Ökostrommix 2015-2050 (Treibhauspotenzial)	101
Abbildung 5.2:	Einfluss der Strommix-Entwicklung auf das Treibhauspotenzial der BEV und PHEV im Kompaktwagensegment	103
Abbildung 5.3:	Einsparpotenzial durch Markthochlauf von Elektrofahrzeugen im Szenario 2020	107
Abbildung 5.4:	Einsparpotenzial durch Markthochlauf von Elektrofahrzeugen im Szenario 2030	107
Abbildung 5.5:	Anteil des Verkehrssektors an den Treibhausgas-Emissionen in Deutschland (2013)	108

## >> KURZFASSUNG

Seit 2009 fördert das BMVI die batterieelektrische Mobilität im Rahmen der „Modellregionen Elektromobilität“ und innerhalb der Ressortforschung als wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor. In diesem Zusammenhang werden deutschlandweit Forschungsprojekte realisiert, Fahrzeugflotten und Ladeinfrastrukturen aufgebaut, Geschäftsmodelle entwickelt und untersucht sowie Akteure vor Ort für die erfolgreiche Markteinführung der Elektromobilität miteinander vernetzt. Die projektübergreifende Begleitforschung des BMVI sichert dabei den Erfahrungsgewinn auf Programmebene. Innerhalb des Themenfelds „Innovative Antriebe und Fahrzeuge“ werden die Förderprojekte mit Blick auf den praktischen Fahrzeugeinsatz untersucht.

Die untergeordnete Arbeitsgruppe „PKW & Nutzfahrzeuge“ bewertet dabei die Praxistauglichkeit und die Einsatzreife von 1.286 batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und Plug-In-Hybriden (PHEV) innerhalb von realen Demonstrationsvorhaben anhand konkreter Einsatzkontexte und im Zusammenspiel mit der Ladeinfrastruktur. Der Schwerpunkt des vorliegenden Berichts liegt maßgeblich auf der anwendungsorientierten und ökologischen Bewertung der in den unterschiedlichen Kontexten verwendeten Fahrzeuge. Dabei sind die Bewertungskategorien Praxistauglichkeit, Leistungsprofil und Umweltwirkungen mit Hilfe der Betriebsdaten von insgesamt 735 Elektro-Fahrzeugen und den Ladedaten von 440 Fahrzeugen untersucht und interpretiert worden. Das hierfür abgeleitete Verfahren liefert mittels des eigens für diese Studie entwickelten Minimaldatensets der Modellregionen eine konsolidierte Basis für parallele und zukünftige Datenerfassungen im Mobilitätsbereich.

Je nach Einsatzkontext (Privatnutzung, Dienstwagen, kommunale und gewerbliche Fahrzeugflotten, Carsharing u. a.) konnten Jahresfahrleistungen von etwa 4.600 bis 11.900 km/a erreicht werden. Die ermittelten Nutzungsdaten ermöglichen es zudem, den Energieverbrauch der Fahrzeuge unter realen Nutzungsbedingungen zu analysieren und die wichtigen Einflussfaktoren abzuleiten. Im Durchschnitt lag der Energieverbrauch bei den PKW zwischen 14,2 (Minis BEV) und 20,5 kWh/100 km (Mini-Vans PHEV) bzw. bei den Nutzfahrzeugen zwischen 23 (Kastenwagen) und 32 kWh/100 km (LKW). Daraus ergeben sich in manchen Segmenten Abweichungen von über 50 % im Vergleich zu den gemittelten NEFZ-Normverbrauchswerten, womit Elektrofahrzeuge in etwa vergleichbare Abweichungen zwischen Real- und Normverbrauch wie konventionell angetriebene Fahrzeuge aufweisen.

Der Energieverbrauch der Fahrzeuge ist neben der Fahrweise stark von den Außentemperaturen abhängig und nimmt vor allem bei sehr niedrigen und sehr hohen Temperaturen infolge der dann notwendigen Heizung und Klimatisierung der Fahrzeuge merklich zu. Unter Extrembedingungen (etwa bei starken Minusgraden) können Reichweiteneinbußen von über 50 % auftreten. Um diesem Umstand entgegenzuwirken, wären eine angepasste und effiziente Fahrweise und vor allem im Winter eine Vorkonditionierung der Fahrzeuge kurz vor der Abfahrt mögliche Handlungsoptionen. Die Ladeverluste zwischen Ladeinfrastruktur und Fahrzeug stellen ein weiteres Kriterium für die Effizienz der Gesamtnutzung dar. Die im Bearbeitungszeitraum ermittelten Ladeverluste vom Ladepunkt bis zum Antriebsstrang liegen bei rund 13 %. Dabei korrigieren die ermittelten Werte die bisherigen Literaturwerte im Bereich von 20 % deutlich nach unten.

In der Gesamtbetrachtung der Daten stellte sich heraus, dass die elektrischen Reichweiten der Fahrzeuge im Alltagsbetrieb der Flottenversuche bei Weitem nicht ausgereizt werden. Dies zeigt sich maßgeblich an regelmäßig hohen SOC-Ständen bei BEV zu Ladebeginn, was auf einen hohen Anteil an Ladevorgängen bei hohem Ladestand der Batterien hinweist. Damit bietet sich für Elektrofahrzeuge noch ein erheblicher Spielraum zur Bewältigung von längeren Fahrdistanzen. Eine intensivierte Nutzung von Elektrofahrzeugen und eine verstärkte Marktdurchdringung sind unter Berücksichtigung dieser Umstände durchaus bereits mit den heute verfügbaren Fahrzeugmodellen möglich.

Die Ergebnisse der Langzeitdatenerfassung zeigen ein dynamisches Zusammenspiel zwischen einer Vielzahl von Einflussfaktoren, was zu einer großen Bandbreite der Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen führt. Das Treibhauspotential als Messgröße für den Klimawandel hängt hierbei vor allem von der Batteriekapazität, der tatsächlich erreichten Lebenslaufleistung, dem elektrischen Fahranteil (bei PHEV) und dem verwendeten Strom-Mix beim Ladestrom ab. Die Analysen der Umweltwirkungen über den gesamten Fahrzeuglebenszyklus zeigen einerseits, dass Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen zwar höhere Umweltwirkungen in der Phase der Fahrzeugherstellung aufweisen, sie zeigen andererseits aber auch, dass diese bei einem Großteil der untersuchten Wirkungskategorien über die Fahrzeugnutzung kompensiert werden können.

Ab welcher Laufleistung dieser Break-Even-Punkt erreicht wird, hängt dabei stark vom Umweltprofil des bezogenen Ladestroms der Fahrzeuge ab. Im Falle des Treibhauspotentials erreichen Kompaktwagen BEV mit Ladestrom aus dem deutschen Netzstrom-Mix

den Break-Even-Punkt im Vergleich zu Benzinfahrzeugen bereits nach einer Gesamtfahrleistung von etwa 60.000 km und von etwa 125.000 km im Vergleich mit Dieselfahrzeugen. Bei PHEV liegen die Break-Even-Punkte schon bei etwa 25.000 km und 55.000 km. Dies entspricht bei der angenommenen Fahrzeugnutzungsdauer von 12 Jahren einer Jahreslaufleistung von 5.000 bzw. 10.000 km für BEV, also rund 15 bis 30 km täglicher Fahrstrecke. Wenn Ökostrom als Ladestrom genutzt wird, reichen bereits Fahrleistungen von 4 bis 10 km pro Tag bzw. Jahreslaufleistungen zwischen 1.250 km und 3.500 km für eine positivere Klimabilanz als bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen aus. Da Literaturwerte zum Mobilitätsverhalten durchaus höhere durchschnittliche Jahresfahrleistungen in Deutschland angeben, kann für das Treibhauspotential potentiell auf ein Erreichen der Break-Even-Punkte geschlossen werden.

Die zukünftige Entwicklung des deutschen Netzstrom-Mix lässt die Voraussage zu, dass sich die Umweltwirkungen der Stromerzeugung durch die fortschreitende Energiewende verringern werden und dass sich somit auch die Klimawirkungen von Elektrofahrzeugen weiter reduzieren werden. Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende hat also einen wichtigen Anteil am langfristigen Erfolg der Elektromobilität als klimafreundliche Mobilitätslösung für den Verkehr. Mittelfristig wird der größte ökologische Mehrwert von Elektrofahrzeugen durch den gezielten Einsatz von Ladestrom aus zusätzlich installierten Kapazitäten an erneuerbaren Energien erreicht werden.

Darüber hinaus müssen geeignete Rahmenbedingungen für den effizienten Einsatz von Elektrofahrzeugen im Flottenbetrieb beachtet bzw. neu geschaffen werden. So ist etwa durch den hohen Anteil des Batteriesystems an der Umweltbilanz die optimale Dimensionierung der E-Fahrzeuge in Bezug auf die Reichweitenanforderungen sinnvoll. Bei der Planung und Zusammenstellung von Fahrzeugflotten sollte künftig vermehrt auf die nutzungskontextgerechte Auslegung bzw. Auswahl der Fahrzeuge geachtet werden. Ein Einsatz von Fahrzeugen mit geringer Batteriekapazität im urbanen Liefer- und Verteilverkehr erscheint dabei insbesondere bei definierten Standzeiten und der damit verbundenen Option zur Nachladung zielführend. Elektrofahrzeuge sollten generell Nutzungskontexten mit einer möglichst hohen Auslastung zugeführt werden. Dabei kann der kombinierte Einsatz von Fahrzeugen oder Flotten in unterschiedlichen Einsatzkontexten ein weiteres Mittel zur Erhöhung der Fahrzeugauslastung sein. Im Zusammenhang mit individueller Mobilität sollten zudem die großen Potentiale intermodaler Mobilitätskonzepte weiter in den Fokus gerückt werden. Dazu müssen diese in ihrer Nutzerfreundlichkeit und Anwendbarkeit weiter gesteigert werden.

Bezogen auf die Fortführung der Begleitforschung kann zukünftig die Erweiterung der Datenbasis um reale Betriebsdaten konventionell angetriebener Fahrzeuge zu einem noch aussagekräftigeren und ganzheitlicheren Bild führen. Durch eine weitere Schärfung der Datenpunkte sollte zudem die Abbildung der Potentiale der Elektrofahrzeuge in Smart-Grid-Betrachtungen noch weiter herausgearbeitet werden. Für eine optimale Dimensionierung, Auswahl und Auslastung von Elektrofahrzeugen ist es aus ökologischer Sicht zukünftig wichtig, die Abhängigkeiten von Nutzerpräferenzen besser zu verstehen. Dies gilt insbesondere im Zusammenspiel mit der vorhandenen Ladeinfrastruktur. In der Umweltbegleitforschung der Modellregionen Elektromobilität des BMVI wurde der Grundstein für die dazu benötigte Datenbasis gelegt. Darauf aufbauend konnte mit dieser Untersuchung die Praxistauglichkeit und Leistungsfähigkeit von Elektrofahrzeugen für ein breites Spektrum von Einsatzkontexten und Nutzungsfeldern nachgewiesen sowie der klimabilanzielle Vorteil ihres Einsatzes herausgearbeitet werden.





## >> 1 EINLEITUNG

### **Klima- und energiepolitische Zielsetzung**

Der Klimaschutz und die Energiewende zählen in Deutschland mit zu den wichtigsten gesamtpolitischen Aufgaben der kommenden Jahrzehnte. Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, die Treibhausgas-Emissionen im Vergleich zu 1990 bis zum Jahr 2020 um 40 % und bis zum Jahr 2050 um mindestens 80 % zu senken. Um dies zu erreichen, muss auch der Verkehrssektor seinen Beitrag leisten. Er steuert etwa 20 % zu den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland bei. Davon entfallen etwa 57 % auf das Segment des motorisierten Individualverkehrs (Bezugsjahr 2010).

Elektrische Antriebe haben gegenüber konventionellen Antrieben deutliche Effizienzvorteile. Sie können durch den Einsatz von Energie aus erneuerbaren Quellen einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor leisten – vor allem im motorisierten Individualverkehr. Darum ist die Förderung der Elektromobilität ein zentraler Bestandteil der Anstrengungen der Bundesregierung auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energie- und Verkehrspolitik.

Vor diesem Hintergrund fördert das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) die batterieelektrische Mobilität seit 2009 im Rahmen der „Modellregionen Elektromobilität“ und seit 2012 zusammen mit weiteren Ministerien innerhalb des ressortübergreifenden Bundesprogramms „Schaufenster Elektromobilität“. Eingebettet sind beide Programme in den „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“, welcher Ziele bezüglich Fahrzeugzahlen und Marktentwicklung in Deutschland vorgibt. Darüber hinaus bündelt das „Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)“ seit 2007 vergleichbare Aktivitäten zu Wasserstofftechnologien im Verkehrsbereich.

Das BMVI unterstützt mit diesen Maßnahmen eine technologieoffene Weiterentwicklung in den Segmenten Straße, Schiene, Luftverkehr und Schifffahrt. Einbezogen werden hierbei Batterie-, Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge. Im Fokus der Förderung stehen aktuell vor allem Demonstrationsvorhaben zum Nachweis der technischen Realisierbarkeit und Praxistauglichkeit sowie regionale Modell- und Technologieprojekte.

### **Die Modellregionen Elektromobilität des BMVI**

In den verschiedenen Modellregionen Elektromobilität werden seit 2009 deutschlandweit Fahrzeugflotten und Ladeinfrastrukturen aufgebaut, Geschäftsmodelle entwickelt und Akteure vor Ort für die erfolgreiche Entwicklung der Elektromobilität miteinander

vernetzt. Diese Vernetzung erfolgt insbesondere über die programmatische Begleitforschung des BMVI (koordiniert durch die NOW GmbH), welche sich in den letzten Jahren in sieben Themengebieten organisierte: Innovative Antriebe und Fahrzeuge; Nutzerperspektive; Flottenmanagement; Sicherheit, mit Fokus Batterie; Infrastruktur; Stadt und Verkehr sowie Ordnungsrecht.

Ziel dieser wissenschaftlichen Kooperation ist es, konkrete Handlungsempfehlungen aus den Erfahrungen der Einzelprojekte in den Modellregionen abzuleiten und diese einem größeren Kreis von Akteuren zielgruppenorientiert zur Verfügung zu stellen, um so den Markthochlauf im Sinne des Nationalen Entwicklungsplans in Deutschland weiter voranzutreiben. Der Schwerpunkt des vorliegenden Berichts liegt auf der technischen und ökologischen Bewertung der in den Regionen eingesetzten PKW und Nutzfahrzeuge mit Blick auf die Bewertungskategorien Praxistauglichkeit, Leistungsprofil und Umweltwirkungen. Dieser Bericht ist als Fortsetzung des Zwischenberichts von Anfang 2015 zu verstehen, der aufgrund der wachsenden Datenbasis detailliertere Untersuchungen zum Einsatzkontext und eine bessere Interpretation der Daten zulässt. Beide Berichte bauen auf den ersten Forschungsaktivitäten der Jahre 2009 bis 2011 auf. Die Arbeiten sind eingebettet in das Themenfeld „Innovative Antriebe und Fahrzeuge“ als eine Säule der Gesamtbegleitforschung.

### **Überblick über das Fahrzeugportfolio**

Seit dem Zwischenbericht konnte eine nennenswerte Anzahl an zusätzlichen Fahrzeugen der Datenerfassung zugeführt werden. Zwar blieb das Gesamtportfolio an Fahrzeugen infolge auslaufender Projekte, Datenabschlüssen in den regionalen Einzelprojekten und ersten Stilllegungen früherer Phasen in etwa gleich groß, allerdings nahmen die mit elektronischen Datenloggern ausgestatteten Fahrzeuge in Summe zu. Bis zum Abschluss der Datenerfassung im September 2015 konnten mehr als 50 % der zur Verfügung stehenden PKW und Nutzfahrzeuge in die Datenerfassung integriert werden. Gegenüber dem Erfassungstatus vor einem Jahr (Sep. 2014) bedeutet dies eine Erhöhung um 47 % (vgl. 500 Fahrzeuge in 2014 und 735 Fahrzeuge in 2015).

Die Abbildung 1.1 gibt einen Überblick über die Gesamtfahrzeugverteilung aller in den Modellregionen eingesetzten Fahrzeuge und verdeutlicht den Fokus der hier aufgeführten Begleitforschung. Im Sinne des avisierten Markthochlaufs nehmen die PKW und Nutzfahrzeuge etwa 78 % des Gesamtportfolios ein, davon sind 90 % rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV). Dies macht den technologischen Fokus des Gesamtprogramms nochmals

sehr deutlich. Darüber hinaus konnte jeweils eine nennenswerte Anzahl von Hybridfahrzeugen (PHEV) und von Fahrzeugen mit Range Extender (REEV) in die Betrachtungen miteinbezogen werden.

Bezogen auf die Fahrzeugsegmente des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) stellt sich das Portfolio so dar, dass mehrheitlich Fahrzeuge des Mini- und Kleinwagensegments in die Projekte integriert wurden (54%). Die Anteile der Kleinwagen- und Kompaktklasse beliefen sich auf 19 bis 23%. In reduzierter Stückzahl konnten Mini-Vans und Mittelklasse-Fahrzeuge integriert werden. Die Verteilung spiegelt in etwa die Fahrzeugverfügbarkeit am Markt wider, denn diese ist insbesondere im Bereich der Minis und Kleinwagen groß.

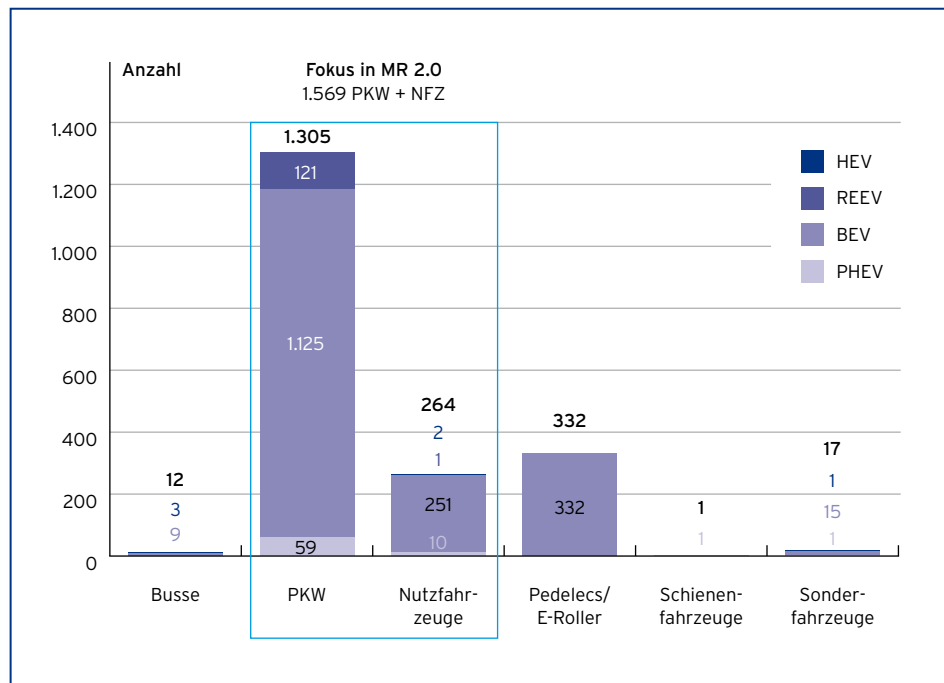


Abbildung 1.1: Fahrzeugportfolio in den Modellregionen (Planzahlen)

### Hintergrund der Begleitforschung

Eine aktuell wichtige Forschungsaufgabe ist die kritische Auseinandersetzung mit dem tatsächlich realisierbaren Beitrag, den die Elektromobilität zum Klimaschutz leisten kann. Die Abbildung der Umweltprofile des elektromobilen Fahrzeugeinsatzes unter Normbedingungen haben die Fahrzeughersteller in Form von Umweltprädikaten und -zertifikaten bereits auf Basis von Ökobilanzen übernommen. In der Phase des Markthochlaufs rücken nun neben den Umweltwirkungen im Realeinsatz vermehrt die Praxistauglichkeit und die Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge in den Fokus. Im Rahmen der Modellregionen Elektromobilität hat sich die gemeinsame Arbeitsgruppe (AG) „PKW und Nutzfahrzeuge“ im Themenfeld „Innovative Antriebe und Fahrzeuge“ mit dieser Zielsetzung gegründet. Durch den intensiven Fahrzeugeinsatz innerhalb der beteiligten Projekte und die diversen Forschungsschwerpunkte konnte innerhalb der Arbeitsgruppe bereits ein großer Erfahrungsschatz aus den praktischen Anwendungen zusammengetragen werden, welcher nun direkt in diesen Bericht integriert wurde.

Im Unterschied zu den bisherigen Betrachtungen zur Ökobilanz von alternativen Antriebskonzepten weist die vorliegende Studie ein Alleinstellungsmerkmal auf: Die wissenschaftliche Analyse und die ökologische Bilanzierung fußen auf einer umfassenden Datenbasis von 735 Fahrzeugen in realen bzw. realitätsnahen Einsatzkontexten. Bezogen auf das Gesamtfahrzeugportfolio war die Mehrheit der Fahrzeuge (72 %) dem Kontext der Flottennutzung (Firmen- und Kommunalflotten) zuzuordnen, gefolgt von Privatnutzungen (8 %), Carsharing-Ansätzen (14 %, ortsgebunden oder frei) sowie Dienstwagen (4 %). Auf den Fahrtzweck bezogen dominierten beim derzeitigen Einsatz von Elektrofahrzeugen in den Modellregionen die Dienstfahrten (47 %), gefolgt von einer Mischnutzung aus Dienst- und Privatfahrt (22 %) und anderweitigen Kombinationen (17 %, z. B. im Carsharing in der Verknüpfung mit dem ÖPNV). Der rein gewerbliche Verkehr in Form von Lieferfahrten lag im Bereich von 3 % und nimmt bisher noch eine eher reduzierte Rolle ein. Neben dem Fahrprofil stand die Betrachtung des Ladeverhaltens der Fahrzeugnutzer im Fokus der Untersuchungen. So wurden für 440 Fahrzeuge Ladedaten aufgenommen und für diese Studie ausgewertet.

Diese Datenverfügbarkeit erlaubt umfassende Analysen, aus denen Aussagen zur Leistungsfähigkeit und zur Praxistauglichkeit der Fahrzeuge abgeleitet werden können. Durch eine kontinuierliche Spiegelung der entstehenden Ergebnisse im Gruppenkontext der AG wurde dabei ein herausragender Qualitätsstandard erreicht. Zur Harmonisierung der Arbeiten mit anderen aktuellen Forschungsanstrengungen im Bereich der Ökobilanzierung der



Elektromobilität hat sich aus der AG heraus ein dedizierter Arbeitskreis zu dieser Thematik gegründet. Diesem gehören Vertreter von Fahrzeugherstellern sowie externe und interne Experten der Modellregionen Elektromobilität an. Der kontinuierliche Austausch und die Arbeitsergebnisse dieses Kreises sind maßgeblich in die methodischen Grundlagen sowie die Darstellungen dieser Studie eingeflossen.

Neben der technologischen und wissenschaftlichen Bewertung der Ergebnisse kommt der Studie außerdem eine besondere Rolle beim weiteren Ausbau elektromobiler Flotten in allen Einsatzkontexten zu. Denn der vorliegende Bericht bietet gerade Betreibern von gewerblichen und kommunalen Flotten (z.B. im städtischen Verteil- und Lieferverkehr) die Chance, realistische Planungen auf Basis des derzeitigen technologischen Standes der Elektromobilität vorzunehmen und passende Einsatzkontexte und Einsatzzwecke bereits bei der Beschaffung und Einsatzplanung der Fahrzeuge zu berücksichtigen. Außerdem erhalten die Hersteller von Fahrzeugen und Komponenten erhalten eine umfassende Analyse der derzeitigen Anforderungen an den Einsatz und den Betrieb von Elektrofahrzeugen im Zusammenspiel mit der Nutzung von Ladeinfrastruktur.

### Inhalte der Studie

Nach einer Übersicht über die verwendeten Methoden und der zugrundeliegenden Datenbasis bietet diese Studie einen Überblick über die Kenndaten des Einsatzes von Elektrofahrzeugen sowie der damit zusammenhängenden Umweltprofile. Im Kapitel 3.1 werden konventionelle und elektromobile Fahrzeugkonzepte aus ökologischer Sicht miteinander verglichen, um dem Leser die prinzipiellen Umweltwirkungen des jeweiligen Fahrzeugeinsatzes aufzuzeigen. In Kapitel 3.2 werden dann die gewonnenen Erkenntnisse zur Praxistauglichkeit der Fahrzeuge, beruhend auf dem Fahrzeugeinsatz in den Projekten der Modellregionen Elektromobilität, dargestellt. Diese umfassen neben dem Fahrverhalten (Kapitel 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 und 3.2.7) auch Auswertungen über das Ladeverhalten (Kapitel 3.2.4 und 3.2.6). Dabei werden neben dem Segmentvergleich auch individuelle Einsatzkontexte dargestellt. Kommunale Fuhrparkmanager und Fahrzeugbeschaffer können auf solche Erfahrungswerte zurückgreifen und realistische Verbrauchswerte (Kapitel 3.2.5 und 3.2.8) und die dabei ermittelten Ladeeffizienzwerte (Kapitel 3.2.9) für ihre Einsatzplanung berücksichtigen.

Die Hauptmotivation für den Einsatz von Elektrofahrzeugen ist die Reduktion der Umweltwirkungen des Verkehrssektors. In Kapitel 3.3 werden aus diesem Grund spezifische Umweltprofile des Fahrzeugeinsatzes aufbereitet. Neben den Treibhausgas-Emissionen

werden zusätzliche Wirkungskategorien betrachtet, um ein vollständiges Umweltprofil von Elektrofahrzeugen aufzuzeigen. Die Kernelemente eines ökologisch sinnvollen E-Mobil-Einsatzes werden sowohl für Anwender als auch für Fuhrparkbetreiber klar herausgearbeitet.

Kapitel 4 fasst die zuvor identifizierten Schlüsselfaktoren zum Fahrzeugeinsatz im Hinblick auf die Praxistauglichkeit und die Umweltwirkungen in Form von Planungsindikatoren zusammen. Diese lassen sich für die Fuhrparkplanung oder bei der Fahrzeugbeschaffung nutzen, um alle relevanten Faktoren im Überblick zu behalten. Im Kapitel 4.3 werden erfolgreiche Nutzungskonzepte und deren Erfahrungsschätze anhand von ausgewählten Praxisbeispielen vorgestellt.

Das Kapitel 5 liefert schließlich eine Einschätzung der ökologischen Potentiale des Markthochlaufs der Elektromobilität, welche mit der fortschreitenden Energiewende noch deutlich zunehmen werden. Um die ambitionierten Fahrzeugzahlen der verwendeten Szenarien zu erreichen, ist dabei jeder Nutzer, Fuhrparkmanager und kommunale Entscheider angesprochen, den Einsatz von Elektrofahrzeugen gründlich abzuwägen und - dort wo es möglich ist - auch zu realisieren. Mit der Darstellung der Fahrzeugnutzung und der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotenziale aus dem praktischen Fahrzeugeinsatz leistet die vorliegende Studie ihren Beitrag zu einer informierten Entscheidung hinsichtlich einer ökologisch optimierten Fuhrparkzusammensetzung.












# >> 2 ÜBERBLICK ÜBER METHODIK UND DATENBASIS

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die methodische Vorgehensweise der Studie. Zunächst wird das Vorgehen bei der Langzeitdatenerfassung skizziert und anschließend genauer auf die Ökobilanzuntersuchung eingegangen. Die methodischen Konzepte und die gewählten Randbedingungen für den ökobilanziellen Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen und für die Analyse der erfassten Betriebsdaten (Kapitel 3 und 5) werden explizit vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Darstellung der zur Verfügung stehenden Datenbasis.

## >> 2.1 METHODIK DER LANGZEITDATENERFASSUNG

Die Langzeiterfassung der Fahr- und Ladedaten der eingesetzten Elektrofahrzeuge erfolgte über zahlreiche Mobilitätsprojekte in den Modellregionen. Als gemeinsame Grundlage für die Erfassung der Betriebsdaten diente dabei das in den Modellregionen der Phase I (2009 bis 2011) erstellte Minimaldatenset, das im Diskussionsprozess mit den Projekten weiterentwickelt wurde (Tabelle 6.2 und Tabelle 6.3 im Anhang). Die so definierten Datenpunkte wurden für jede Fahrt bzw. jeden Ladevorgang erhoben. Als grundlegendes Kriterium wurde eine Fahrt jeweils als die Zeitspanne zwischen Zündschlüsseldrehung auf „an“ und Zündschlüsseldrehung auf „aus“ definiert.

Neben den Betriebsdaten für die Fahrten und Ladungen wurden auch die für die Auswertung notwendigen Stammdaten, d. h. Basis-Informationen zu den Fahrzeugen selbst (Hersteller, Modell, Segment etc.) sowie zu den jeweiligen Einsatzrandbedingungen (Einsatzkontext, Einsatzzweck etc.) festgelegt und über die Fahrzeugbetreiber erhoben. Die Datenerfassung konzentrierte sich dabei ausschließlich auf vierrädrige Fahrzeuge. Die Bezeichnungen der Fahrzeugsegmente orientieren sich an der Kategorisierung des Kraftfahrtbundesamtes (KBA), wobei das KBA-Segment Utilities (< 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht) zwecks detaillierterer ökobilanzieller Untersuchungen nochmals in Kastenwagen (< 1,7 t Leergewicht) und Lieferwagen (> 1,7 t Leergewicht) unterteilt wurde. Die Fahrzeugsegmente und die zur Fahrzeugbewertung relevanten Einsatzkontexte sind in Tabelle 2.1 beschrieben.

Icon	Bezeichnung	In Grafiken und Tabellen verwendete Bezeichnung	Definition
Segment			
	Kraftrad	Kraftrad	Für die Zuordnung der Segmente werden neben dem optischen Erscheinungsbild u. a. folgende Merkmale als Abgrenzungskriterien herangezogen [31]: <ul style="list-style-type: none"><li>• Größe (Länge, Höhe)</li><li>• Gewicht (zulässiges Gesamtgewicht)</li><li>• Motorisierung (Hubraum)</li><li>• Leistung (Höchstgeschwindigkeit)</li><li>• Gepäckraum (Zuladung, Variabilität)</li><li>• Sitzplätze (Anzahl)</li><li>• Sitzhöhe (vorn)</li><li>• Grundpreis</li></ul>
	Minis	Minis	
	Kleinwagen	Kleinwagen	
	Kompaktklasse	Kompakt	
	Mini-Vans	Mini-Vans	
	Oberklasse	Oberklasse	
	Utilities (Kastenwagen)	Util. (Kasten)	
	Utilities (Lieferwagen)	Util. (Liefer)	
	LKW (zul. Ggw. 3,5 t - 12 t)	LKW	








Icon	Bezeichnung	In Grafiken und Tabellen verwendete Bezeichnung	Definition
Einsatzkontext			
	Carsharing (Floating)	CS (Float)	Fahrzeugaufnahme und -rückgabe innerhalb eines abgeschlossenen, definierten Gebietes ortsungebunden im öffentlichen Parkraum.
	Carsharing (mehrere Parkplätze)	CS (mehrere P.)	Fahrzeugaufnahme und -rückgabe an mehreren festen Parkplätzen.
	Carsharing (ortsgebunden, ein fester Parkplatz)	CS (fester P.)	Fahrzeugaufnahme und -rückgabe am selben festgelegten Parkplatz.
	Dienstwagen	Dienst	Fahrzeug im gewerblichen Einsatz, das einem Mitarbeiter fest zugeordnet ist und diesem jederzeit und ausschließlich zur Verfügung steht.
	Flotte (Firmen)	Flotte (Firmen)	Fahrzeug eines gewerblichen Fahrzeugpools, das zu betrieblichen Zwecken von verschiedenen Mitarbeitern genutzt werden kann.
	Flotte (kommunal)	Flotte (kommunal)	Fahrzeug eines kommunalen Fahrzeugpools, das zu betrieblichen Zwecken von verschiedenen Mitarbeitern genutzt werden kann.
	Privatwagen	Privat	Fahrzeug im Privatbesitz, das einer Privatperson fest zugeordnet ist und dieser jederzeit und ausschließlich zur Verfügung steht.

Tabelle 2.1: Beschreibung der untersuchten Fahrzeugsegmente und Einsatzkontexte

Als Datenbanklösung für die Datenerfassung wurde die von thinkstep entwickelte Performance-Management-Software für Unternehmensnachhaltigkeit SoFi entsprechend an die Projektanforderungen angepasst.

Die durch die Demonstrationsprojekte bereitgestellten Daten wurden vorab einer Qualitätskontrolle und Aufbereitung unterzogen, bevor sie in SoFi importiert und für die Betriebsdatenauswertung (vgl. Kapitel 3.2) verwendet wurden. Die Prüfung der Datensätze auf logische Konsistenz erfolgte zur Sicherstellung der Datenqualität anhand einer Reihe von Plausibilitätskriterien, bspw. „Fahrtbeginn liegt vor Fahrtende“, „Fahrdauer  $\geq 1$  min.“ oder „Fahrdistanz  $\geq 100$  m“.

## >> 2.2 METHODIK DER ÖKOBILANZUNTERSUCHUNG

Der Fokus der ökobilanziellen Analysen liegt auf der Einschätzung der potentiellen Umweltwirkungen der eingesetzten Elektrofahrzeuge. Dazu zählen die Identifikation der Schlüsselfaktoren der Elektromobilität aus Umweltperspektive sowie das Aufzeigen zukünftiger Reduktionspotenziale von Verkehrsemissionen. Die Untersuchung folgt zwei grundsätzlichen Aufgabenstellungen:

- Vergleich zwischen elektrischen und konventionell angetriebenen Fahrzeugen, um die Größenordnung der Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen sowie des damit verbundenen ökologischen Reduktionspotenzials gegenüber konventionellen Fahrzeugen aufzuzeigen.
- Analyse der Umweltprofile der in den Flottenprojekten der Modellregionen eingesetzten Fahrzeuge auf Basis der erfassten Betriebsdaten aus realen Einsatzkontexten.

Dafür werden zwei Vorgehensweisen herangezogen, welche in Tabelle 2.2 erläutert werden.



Vorgehensweisen für die ökobilanzielle Fahrzeuganalyse		
	Referenzfahrzeuge	Virtuelle Fahrzeuge
Aufgabenstellung	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vergleich zwischen elektrischen und konventionellen Fahrzeugen</li><li>• Abbildung der zukünftigen Reduktionspotenziale bei den Verkehrsemissionen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Betriebsdatenanalyse der elektrischen Fahrzeugkonzepte</li></ul>
Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"><li>• Berücksichtigung elektrischer und konventioneller Fahrzeugkonzepte (Benziner, Diesel, BEV und PHEV)</li><li>• Darstellung des aktuellen deutschen Fahrzeugmarkts auf der Basis von Zulassungszahlen des Kraftfahrt-Bundesamts [32]</li><li>• Verwendung von Verbrauchswerten basierend auf dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) für die Berechnung der Nutzungsphase</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Berücksichtigung BEV und PHEV</li><li>• Darstellung der in der Langzeitdatenerfassung eingesetzten Fahrzeuge</li><li>• Verwendung der erfassten Betriebsdaten der Langzeitdatenerfassung für die Berechnung der Nutzungsphase</li></ul>
Ergebnis	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bandbreiten der Umweltwirkungen im Vergleich</li><li>• Zukünftige Reduktionspotenziale</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Erstellung spezifischer Umweltprofile auf Basis der in den Flottenprojekten erfassten Nutzungsprofile</li></ul>

Tabelle 2.2: Vorgehensweisen für die ökobilanzielle Fahrzeuganalyse

Zur besseren Einordnung der potentiellen Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen im PKW-Bereich werden elektrisch und konventionell angetriebene Fahrzeuge miteinander verglichen. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse werden in Kapitel 3.1 beschrieben.

Die Auswertung der Betriebsdaten in Kapitel 3.2 berücksichtigt u. a. den aktuellen Stand des Fahrenergieverbrauchs sowie die Fahrleistungen der Fahrzeugflotten aus den Projekten der Modellregionen. Diese Erkenntnisse fließen in Kapitel 3.3 auch in die ökobilanzielle Untersuchung mit ein. Damit eine ganzheitliche Einschätzung der in der Herstellungsphase und während des gesamten Lebenszyklus verursachten Umweltbeiträge der Fahrzeuge möglich wird, ohne einzelne Fahrzeugmodelle im Detail darzustellen, greift die Studie auf virtuelle Fahrzeuge zurück. Die virtuellen Fahrzeuge sind dabei jeweils Stellvertreter für ein bestimmtes Fahrzeugsegment und bilden den Durchschnitt der in den Fahrzeugflotten der Modellregionen Elektromobilität eingesetzten Fahrzeuge ab. Die PHEV

werden mit Hilfe der Speicherkapazitäten der in den Fahrzeugflotten der Modellregionen Elektromobilität eingesetzten Batteriesysteme (hohe oder geringe elektrische Reichweite) unterschieden. Zusammen mit den Betriebsdaten der Langzeitdatenerfassung lassen sich damit die potentiellen Umweltwirkungen über den gesamten Fahrzeuglebenszyklus genauer abschätzen. Das virtuelle Fahrzeug kann in seinen technischen Kennwerten, etwa der Dimensionierung des Batteriespeichers, von den auf dem Markt erhältlichen Fahrzeugen abweichen.

In Kapitel 5.1.3 wird der Einfluss der zukünftigen Entwicklung des deutschen Strommix auf die Umweltprofile der Elektrofahrzeugkonzepte untersucht. Diese Analysen beruhen jeweils auf dem in Kapitel 3.3 verwendeten virtuellen Fahrzeug. Kapitel 5.1.4 untersucht Reduktionspotenziale der Verkehrsemissionen durch den geplanten Markthochlauf von Elektrofahrzeugen. Dazu wird auf das in Kapitel 3.1 verwendete Referenzfahrzeugkonzept zurückgegriffen.

Die Umweltanalyse wird für die in Tabelle 2.3 dargestellten Umweltwirkungen durchgeführt.

Kategorie	Referenzeinheit
Umweltwirkungskategorien	
Versauerungspotenzial (AP)	[kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.]
Eutrophierungspotenzial (EP)	[kg Phosphat-Äquiv.]
Treibhauspotenzial (GWP)	[kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.]
Photochemisches Ozonbildungspotential (POCP)	[kg Ethen-Äquiv.]
Andere Auswertungskategorien	
Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Quellen (unterer Heizwert)	[MJ]

Tabelle 2.3: Betrachtete Umweltwirkungskategorien

Der hinterlegte Bewertungsschlüssel dieser Kategorien basiert auf der international akzeptierten Methode CML2001 vom Centrum voor Milieuwetenschappen (CML) in Leiden, Niederlande [10].

Die potentiellen Umweltwirkungen der untersuchten Fahrzeuge werden über den gesamten Lebenszyklus analysiert und auf die wesentliche Funktion des Produktsystems bezogen, nämlich der Fahrleistung in Form der Fahrdistanz. Je nach Untersuchung entspricht diese Fahrdistanz entweder der Gesamtfahrleistung von 150.000 km über den Lebenszyklus (siehe Tabelle 2.4), der durchschnittlichen Fahrleistung aus den erfassten Betriebsdaten oder einem Fahrkilometer.

Die für die Ökobilanz festgelegten allgemeinen Rahmenbedingungen sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

Allgemeine Rahmenbedingungen	
Technische Annahmen	
Laufleistung und Lebensdauer Gesamtfahrzeug	150.000 km in 12 Jahren
Lebensdauer Batterie	entspricht Lebensdauer Gesamtfahrzeug
Ladeeffizienz	80 %
Ladestrom	<ul style="list-style-type: none"><li>• Deutscher Strommix 2011 (609 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh)</li><li>• Deutscher Ökostrommix 2011 (96 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh)</li><li>• Entwicklungsszenario, siehe Kaptel 5.1</li></ul>
Modellierungsansätze	
Datenbank	GaBi- Ökobilanzdatenbanken, Stand Service Pack 27 [19]
Lebensende	Cut-off Ansatz
Darstellung Nutzungsphase konventioneller Fahrzeugkonzepte	<ul style="list-style-type: none"><li>• Verbrauchsdaten basierend auf dem NEFZ [47]</li><li>• Fahrbetriebsemissionen nach Euro-6-Grenzwerten [14]</li></ul>
Darstellung Nutzungsphase elektrischer Fahrzeugkonzepte	<ul style="list-style-type: none"><li>• NEFZ-Verbrauchswerte</li><li>• Betriebsdaten der Langzeitdatenerfassung (vgl. Kapitel 3.2)</li></ul>

Tabelle 2.4: Allgemeine Rahmenbedingungen für die ökobilanzielle Betrachtung

Auf die spezifischen Rahmenbedingungen der weiteren Auswertungen wird bei der Vorstellung der jeweiligen Ergebnisse getrennt eingegangen.

Die Modellierung der Fahrzeuge erfolgt mit Hilfe der Ökobilanzsoftware GaBi und den zugehörigen Datenbanken. Die Modellierung der jeweiligen Fahrzeuglebenszyklen wird mittels

eines generischen Ökobilanzmodells der Abteilung für Ganzheitliche Bilanzierung des Fraunhofer IBP durchgeführt, welches die Abbildung verschiedener Fahrzeug- und Antriebskonzepte ermöglicht. Dabei wird immer der gesamte Lebenszyklus von der Herstellung, über die Nutzung bis hin zum Lebensende des Fahrzeugs dargestellt. Der modulare Aufbau der Rechenmodelle und die Verwendung von Parametern ermöglichen es, spezifische Fahrzeugkonfigurationen auf Basis der relevanten technischen Spezifikationen des Fahrzeugs und der verbauten Antriebskomponenten zu analysieren.

Beim Ladestrom werden der deutsche Netzstrommix und der Ökostrommix 2011 (vgl. Tabelle 2.4) betrachtet. Die Treibhausgas-Emissionen des deutschen Netzstrommix 2011 liegen bei 609 g CO<sub>2</sub>- Äquiv./kWh [19]. Der deutsche Ökostrommix wird auf Grundlage der Anteile erneuerbarer Energien am Netzstrommix berechnet und so der Einfluss des Strommix auf die Ökobilanz der Fahrzeuge untersucht. Das Treibhausgaspotential des Ökostrommix liegt bei 96 g CO<sub>2</sub>- Äquiv./kWh. In Kapitel 5 wird zusätzlich der Einfluss der zukünftigen Entwicklung des deutschen Strommix hin zu höheren Anteilen an erneuerbaren Energiequellen im Rahmen eines Szenarios untersucht.

>> 2.3 DATENBASIS

Die Datengrundlage für den vorliegenden Bericht bilden Betriebsdaten von etwas über einem Drittel der insgesamt rund 2.000 Fahrzeuge aus den etwa 35 für die Fahrzeugbegleitforschung relevanten Elektromobilitätsprojekten aus dem Zeitraum Januar 2012 bis September 2015. Innerhalb der PKW und Nutzfahrzeuge liegt der Anteil der erfassten Fahrzeuge bei über 55 % . Je nach Projekt wurden die Daten dabei zu unterschiedlichen Zeitpunkten und über verschieden lange Zeiträume aufgenommen. Im Mittel erreichten die Projekte 14,5 Erfassungsmonate, wobei die Projekte mindestens sieben Monate und bis zu 39 Monate lang Daten geliefert haben (Bezug auf Fahrdaten). Die parallele Erfassung von Fahr- und Ladedaten wurde unterschiedlich erfüllt und auch die einzelnen Datenpunkte konnten von den Projekten nicht immer vollständig berücksichtigt werden, da diese z. T. technisch nicht erfassbar waren oder eine spezielle Interpretation erforderten. Dies führt dazu, dass die verschiedenen Auswertungen häufig auf unterschiedlichen Datenbeständen basieren. Somit gilt der nachfolgend dargestellte Gesamtdatenbestand an Fahr- und Ladedaten für alle grundlegenden, d. h. auf die Fahrdistanz bzw. Ladeenergie sowie die Zeit bezogenen Auswertungen. Davon abweichende Datengrundlagen sind in Tabelle 6.6 bis Tabelle 6.8 im Anhang tabellarisch zusammengefasst.

>> 2.3.1 DATENBASIS FAHRDATEN

Fahrdaten liegen von insgesamt 735 Fahrzeugen vor, die auf über 600.000 Fahrten insgesamt mehr als 5 Mio. km zurückgelegt haben. In Abbildung 2.1 ist die zeitliche Entwicklung der Datenbasis anhand der gefahrenen Kilometer dargestellt. Demnach wurden seit dem Projekt-Zwischenbericht [21] mit Datenschluss September 2014 nochmal mehr als 2,5 Mio. km zusätzlich erfasst.

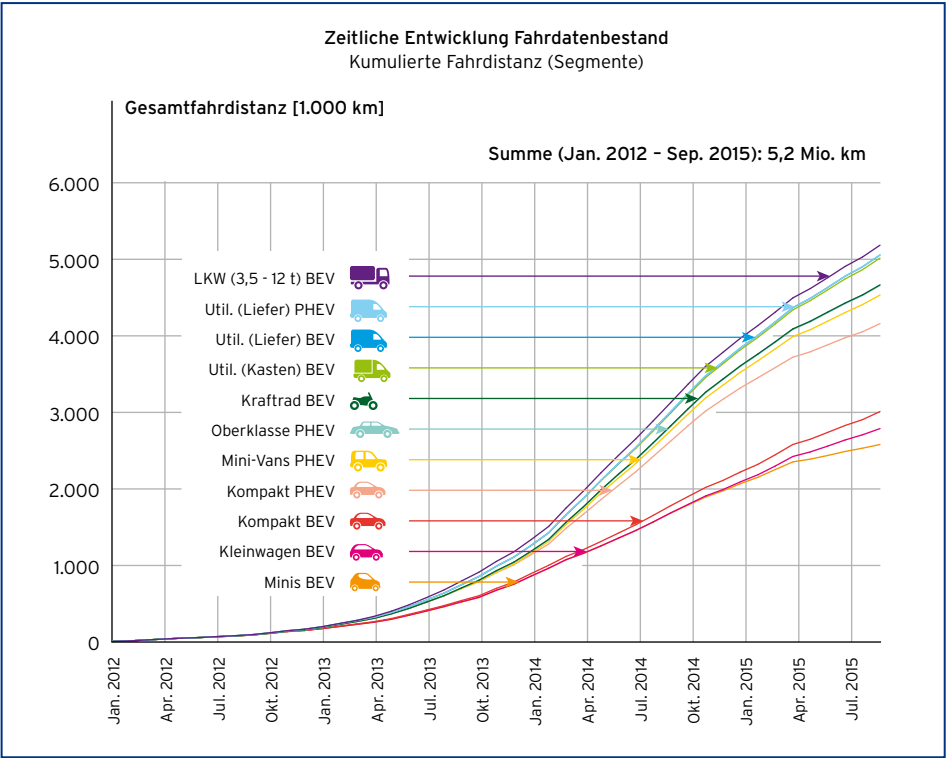












Abbildung 2.1: Zeitliche Entwicklung Fahrdatenbestand

Darüber hinaus zeigt die Entwicklung, dass die Dominanz der Minis BEV durch den überproportionalen Zuwachs an Fahrzeugen in den anderen Segmenten und durch das Hinzukommen weiterer Segmente in der Datenerfassung stetig abgenommen hat. Das Fahrzeugportfolio ist damit auch umfangreicher und ausgewogener geworden und es wurden zusätzliche Fahrzeugsegmente bzw. verschiedene Antriebskonzepte innerhalb eines Fahrzeugsegments auswertbar.

Bei rund 20% der Fahrzeuge handelt es sich um Plug-In-Hybride oder Fahrzeuge mit Range Extender. Beide Antriebsarten werden für die Auswertungen unter Plug-In-Hybride (PHEV) zusammengefasst. Tabelle 2.5 gibt einen Überblick über den Fahrdatenbestand in den jeweiligen Fahrzeugsegmenten.

Segment		Fahrzeuge [Stk.]	Fahrten [Stk.]	Fahrdistanz [km]	Projekte [Stk.]
	Minis BEV	392	368.809	2.581.394	16
	Kleinwagen BEV	65	25.766	207.787	4
	Kompakt BEV	44	22.993	222.547	5
	Kompakt PHEV	110	62.356	1.148.760	7
	Mini-Vans PHEV	21	25.907	373.894	1
	Oberklasse PHEV	12	7.800	124.764	1
	Kraftrad BEV	5	1.328	7.661	1
	Util. (Kasten) BEV	66	78.893	350.603	9
	Util. (Liefer) BEV	8	6.706	40.043	4
	Util. (Liefer) PHEV	2	98	1.834	1
	LKW (3,5 - 12 t) BEV*	10	1.694	126.380	1
Gesamt		735	602.350	5.185.667	21

\* leichte LKW (3,5 - 7,5 t) und mittlere LKW (7,5 - 12 t) wurden zusammengefasst

Tabelle 2.5: Datenbestand Fahrdaten (Segmente)



Um eine ausreichende Repräsentativität zu gewährleisten, werden in den Auswertungen nur solche Fahrzeuggruppen berücksichtigt, für die Daten von mindestens fünf Fahrzeugen mit insgesamt mindestens 300 Fahrten vorliegen. Darum werden Utilities (Liefer) PHEV, für die überdies durch den prototypischen Einsatz von eher „alltagsunüblichen“ Fahrprofilen auszugehen ist, nicht weiter betrachtet (in Tabelle 2.5 graue Schriftfarbe). Eine differenzierte Auswertung nach verschiedenen Einsatzkontexten wird für die Minis BEV und die Kompaktklasse PHEV durchgeführt. Für diese stellt sich der Datenbestand wie folgt dar (Tabelle 2.6):











Einsatzkontext		Fahrzeuge [Stk.]	Fahrten [Stk.]	Fahrdistanz [km]	Projekte [Stk.]
Minis BEV					
	Carsharing (fester P.)	59	6.900	143.384	5
	Carsharing (Float)	49	22.537	135.234	1
	Carsharing (mehrere P.)	5	3.953	68.696	1
	Dienst	45	55.471	373.484	1
	Flotte (Firmen)	149	181.852	1.106.042	9
	Flotte (kommunal)	16	5.896	51.843	4
	Privat	69	92.200	702.711	3
Gesamt		392	368.809	2.581.394	16
Kompakt PHEV					
	Flotte (Firmen)	29	3.848	207.767	3
	Flotte (kommunal)	24	9.056	198.760	4
	Privat	55	46.600	711.500	2
Gesamt		108	59.504	1.118.028	7

Tabelle 2.6: Datenbestand Fahrdaten (Minis BEV und Kompakt PHEV, Einsatzkontexte)

Die anderen Segmente sind überwiegend durch einen einzelnen Einsatzkontext bestimmt (vgl. Tabelle 6.4) und werden lediglich als Gesamtsegment ausgewiesen.

>> 2.3.2 DATENBASIS LADEDATEN

Für etwa 60 % der Fahrzeuge aus der Datenerfassung liegen neben Fahrdaten auch Aufzeichnungen zu den Ladevorgängen vor. Von den 440 Fahrzeugen wurden ca. 105.000 Ladevorgänge mit insgesamt fast 600.000 kWh aufgenommener Energie aufgezeichnet. In Abbildung 2.2 ist die zeitliche Entwicklung der Datenbasis anhand der aufgenommenen Energiemenge dargestellt. Seit dem Zwischenbericht mit Datenschluss Ende September 2014 hat sich die erfasste Ladeenergie etwas mehr als verdoppelt.

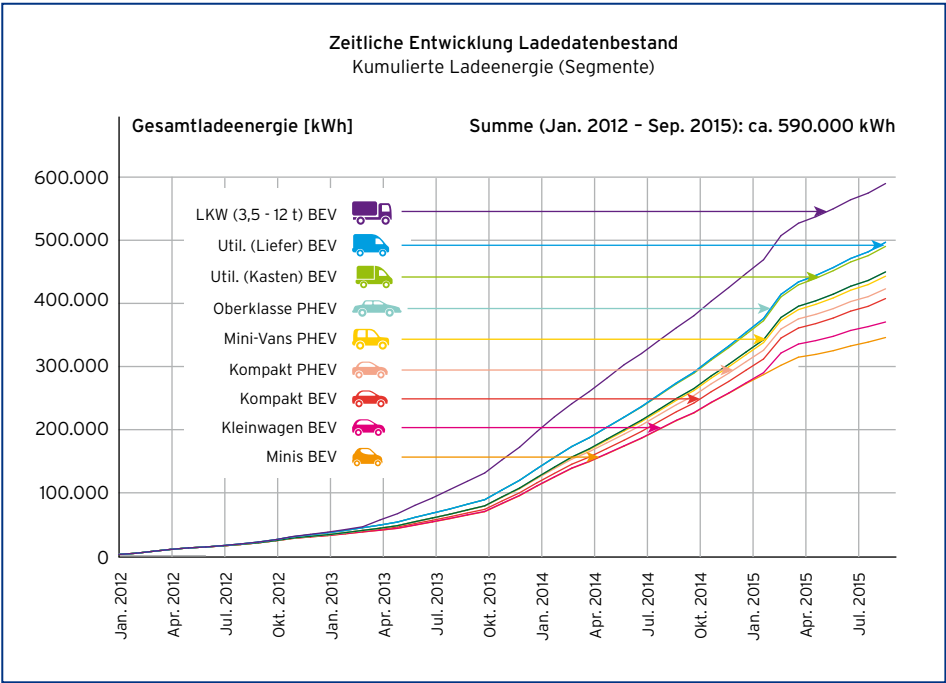










Abbildung 2.2: Zeitliche Entwicklung Ladedatenbestand

Wie für die Fahrdaten konnte auch hinsichtlich der Ladedaten das Segmentportfolio im Laufe des Datenerfassungszeitraums erweitert werden. Das Kleinwagen-BEV-Segment konnte aktuell nicht mitberücksichtigt werden, da die Ladeenergiedaten hier mehrheitlich nicht plausibel waren. Für eine plausible Auswertung wird analog zu den Fahrdaten eine Mindestgröße der Stichprobe von fünf aufladenden Fahrzeugen mit insgesamt 300 Ladevorgängen gefordert. Eine zusätzliche Auswertung nach Einsatzkontexten ist daher lediglich für die Minis BEV sinnvoll (vgl. Tabelle 2.8).

Im Vergleich zum Datenbestand für Fahrdaten fehlen damit auswertbare Ladedaten für die Segmente Kleinwagen und Kraftrad (welche aufgrund der vergleichsweise geringen Energiemengen für ladevorgangsbezogene Betrachtungen von untergeordneter Bedeutung sind), für Utilities (Liefer) PHEV (vgl. Tabelle 2.5) sowie für den Einsatzkontext Car-sharing (Floating) im Mini-Segment (vgl. Tabelle 2.6).

Segment		Fahrzeuge [Stk.]	Ladevorgänge [Stk.]	Ladeenergie [kWh]	Projekte [Stk.]
	Minis BEV	253	76.547	346.045	10
	Kleinwagen BEV*	49	2.433		4
	Kompakt BEV	39	6.309	37.105	2
	Kompakt PHEV	15	3.348	15.452	3
	Mini-Vans PHEV	21	5.652	20.005	1
	Oberklasse PHEV	12	2.351	6.763	1
	Util. (Kasten) BEV	36	5.477	40.434	5
	Util. (Liefer) BEV	5	1.488	6.543	3
	LKW (3,5-12 t) BEV	10	1.612	93.036	1
Gesamt		440	105.217	589.959	13

\*Segment wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da die Ladeenergiedaten mehrheitlich unplausibel waren.

Tabelle 2.7: Datenbestand Ladedaten (Segmente)







Einsatzkontext Minis		Fahrzeuge [Stk.]	Ladevorgänge [Stk.]	Ladeenergie [kWh]	Projekte [Stk.]
	CS (fester P.)	8	1.255	5.676	1
	CS (mehrere P.)	5	3.640	11.925	1
	Dienst	45	10.329	58.604	1
	Flotte (Firmen)	118	37.623	156.739	5
	Flotte (kommunal)	8	642	1.710	3
	Privat	69	23.058	111.391	3
Gesamt		253	76.547	346.045	10

Tabelle 2.8: Datenbestand Ladedaten (Minis, Einsatzkontexte)

- ⇒ Insgesamt liegen zum Projektende Fahrdaten von 735 bzw. Ladedaten von 440 Fahrzeugen vor. Damit ist der Bestand im Vergleich zum Zwischenberichtszeitraum um rund 45 % bzw. 115 % angewachsen.
- ⇒ Im vergangenen Jahr wurden von den erfassten Fahrzeugen rund 2,6 Mio. Kilometer zurückgelegt und sie wurden mit 300.000 kWh elektrischer Energie aufgeladen.
- ⇒ Im aktuellen Berichtszeitraum wurden zusätzliche Fahrzeugsegmente bzw. verschiedene Antriebskonzepte innerhalb eines Fahrzeugsegments ausgewertet und damit die Betrachtung umfassender. Außerdem konnten zusätzliche Einsatzkontexte in die Betrachtung einbezogen werden.
- ⇒ Durch eine weitere Verbesserung der Plausibilitätsprüfung wurde die Datenqualität wesentlich erhöht.
- ⇒ Aufgrund der geringen Zahl von Projekten in einzelnen Segmenten und Einsatzkontexten sind bei der Durchführung weiterer Projekte noch Anpassungen bei den Ergebnissen zu erwarten.
- ⇒ Parallel zur Erhöhung der erfassten Fahrzeugzahl ergibt sich insgesamt etwa eine Verdopplung der erfassten Gesamtfahrleistung bzw. Ladeenergiemenge.

>> 3 ERGEBNISSE

Im folgenden Ergebnisteil sind die wesentlichen Erkenntnisse der Langzeitdatenerfassung und Umweltbegleitforschung zusammengefasst. Zunächst wurde die Größenordnung der Umweltwirkungen elektrischer Fahrzeugkonzepte im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen abgeschätzt und bewertet. Hierzu wird das Konzept der Referenzfahrzeuge herangezogen. Ziel des Vergleichs ist es, die relevanten Einflussfaktoren für den Einsatz von Elektrofahrzeugen mit Blick auf die Ökobilanz aufzuzeigen. Im nachfolgenden Kapitel folgt die Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse der Langzeitdatenauswertung. Diese Daten liefern die Grundlage für die anschließende ökobilanzielle Untersuchung der in den Modellregionen betriebenen Fahrzeugflotten anhand der virtuellen Fahrzeuge unter Berücksichtigung der realen Energieverbrauchswerte und Fahrleistungen, woraus sich die spezifischen Umweltprofile der Fahrzeuge in den betrachteten Einsatzkontexten ableiten.

>> 3.1 ÖKOBILANZIELLER VERGLEICH VON ELEKTRISCHEN UND KONVENTIONELLEN REFERENZFAHRZEUGEN

Im Rahmen der Langzeitdatenerfassung der Modellregionen-Projekte werden die Nutzungsdaten der elektrischen Fahrzeuge erfasst. Es stehen keine vergleichbaren Daten für konventionelle Fahrzeuge zur Verfügung, sodass ein direkter Ökobilanzvergleich der verschiedenen Antriebskonzepte auf Basis der erhobenen Nutzungsdaten der Langzeitdatenerfassung nicht möglich ist. Um dennoch einen Vergleich auf einer konsistenten Datenbasis durchführen zu können, wird die Nutzungsphase des Fahrzeuglebenszyklus auf Basis der NEFZ-Werte der elektrischen und verbrennungstechnischen Fahrzeuge berechnet. Die Berechnung der Fahrbetriebsemissionen erfolgt dabei auf Basis der aktuell geltenden Euro-6-Grenzwerte. Dadurch wird unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben eine vergleichbare Grundlage geschaffen. Weitere Rahmenbedingungen für die folgenden Analysen finden sich in Kapitel 2.2.

Um den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge (Herstellung, Nutzung, Lebensende) in der Ökobilanz zu berücksichtigen, wird in den nachfolgenden Auswertungen auf das Konzept der Referenzfahrzeuge zurückgegriffen. Ein Referenzfahrzeug steht dabei jeweils stellvertretend für den Durchschnitt der zehn verkaufsstärksten Modelle je Segment und Antriebskonzept<sup>1</sup>. Weiterhin werden die Bandbreiten anhand der Fahrzeugmodelle mit

dem jeweils höchsten bzw. niedrigsten Energieverbrauch der zehn meistverkauften Fahrzeugmodelle im untersuchten Segment abgebildet.

Derzeit wird nur in den Segmenten der Minis und der Kompaktklasse eine relevante Fahrzeugpalette an BEV angeboten, PHEV sind nur in der Kompaktklasse wesentlich vertreten [33]. Daher beschränken sich die folgenden Analysen auf diese Fahrzeugsegmente. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Abgasemissionen der ermittelten Referenzfahrzeuge. Zusätzlich zu den Fahrbetriebsemissionen fließen die potentiellen Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung, Kraftstoffbereitstellung und des Fahrzeuglebensendes in die Ökobilanz ein.

Bei der Herstellung eines konventionellen Mini-Fahrzeugs werden beispielsweise ca. 4.700 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv./Fzg. verursacht. Diese Umweltwirkungen werden bei der Ökobilanzierung eines Fahrkilometers linear über die Gesamtfahrleistung verteilt. Bei einer Gesamtfahrleistung von 150.000 km liegt der Anteil der Fahrzeugherstellung bei ca. 31 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km, welche zusätzlich zu den Fahrbetriebsemissionen der Fahrzeugnutzung (vgl. Tabelle 3.1) berücksichtigt werden müssen. Für einen plausiblen Vergleich der verschiedenen Antriebs-technologien ist daher eine Lebenszyklusbetrachtung notwendig.



Segment		Referenz- fahrzeug	Verbrauch und CO <sub>2</sub> -Abgasemissionen der ermittelten Referenz- fahrzeuge nach KBA [33], DAT [12] und eigenen Berechnungen							
			Benzin		Diesel		BEV	PHEV		
			l/100 km	g CO <sub>2</sub> /km	l/100 km	g CO <sub>2</sub> /km	kWh/ 100 km	l/100 km	kWh/ 100 km	g CO <sub>2</sub> /km
	Minis	Verbrauchärmstes Modell	4,40	101,1	3,20	86,1	11,7	-	-	-
		Durchschnitt	4,73	109,9	3,72	101,2	13,9	-	-	-
		Verbrauch- stärkstes Modell	5,10	119,4	4,3	112,7	15,1	-	-	-
	Kompakt- klasse	Verbrauchärmstes Modell	5,40	124,8	3,90	102,4	12,7	2,1	5,2	49
		Durchschnitt	5,73	132,8	4,30	113,2	14,9	1,9	6,6	44
		Verbrauch- stärkstes Modell	6,20	143,0	4,50	119,8	19,0	1,2	13	27

Tabelle 3.1: Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Abgasemissionen der ermittelten Referenzfahrzeuge

<sup>1</sup> Das Kraftfahrtbundesamt veröffentlicht fahrzeugmodellspezifische Zulassungszahlen auf einer monatlichen Basis. Für die hier vorliegenden Auswertungen wurde auf den Jahresbericht 2013 zurückgegriffen [33].

### Ergebnisse im Hinblick auf das Treibhauspotenzial

In Abbildung 3.1 werden die Treibhausgas-Emissionen über den Lebenszyklus der Referenzfahrzeuge am Beispiel des Kompaktwagensegments zusammengestellt. Für die Berechnung des Treibhauspotenzials wurden die in Tabelle 3.1 aufgeführten Verbrauchswerte sowie eine Gesamtfahrleistung von 150.000 km zugrunde gelegt. Die eingetragenen Bandbreiten repräsentieren die Ergebnisse des jeweils verbrauchärmsten und verbrauchstärksten Modells des Segments.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Treibhauspotenzial während der Herstellungsphase (Herst.) der BEV und PHEV deutlich höher ist als bei den konventionellen Fahrzeugen. Hier wird die Relevanz des Batteriesystems für die Umweltwirkungen bei der Fahrzeugherstellung deutlich. Die hohen Umweltwirkungen des Batteriesystems sind dabei vor allem auf den Abbau, die Aufbereitung und Produktion der in den Batteriezellen eingesetzten High-Tech-Werkstoffe (z. B. Aktivmaterialien der Kathode und Anode) zurückzuführen, welche im Vergleich zu den im restlichen Fahrzeug eingesetzten Werkstoffen (hauptsächlich Stahl, Eisen, Kunststoffe, Leicht- und Buntmetalle) mit deutlich höheren Umweltwirkungen verbunden sind.

Beim BEV sind die Beiträge aus der Herstellungsphase zum Treibhauspotenzial und zum Primärenergiebedarf etwa doppelt so hoch wie bei verbrennungsmotorischen Fahrzeugen, wobei diese Anteile je nach Auslegung des Fahrzeugs stark schwanken können. PHEV sind mit einem Batteriesystem geringerer Speicherkapazität ausgestattet, sodass bei ihnen die Herstellung des Batteriesystems nicht so stark ins Gewicht fällt.

Weil PHEV über einen elektrischen und einen verbrennungsmotorischen Antrieb verfügen, liegt das Treibhauspotenzial aus der Fahrzeugherstellung für diesen Fahrzeugtyp über dem der rein verbrennungsmotorischen Fahrzeuge.

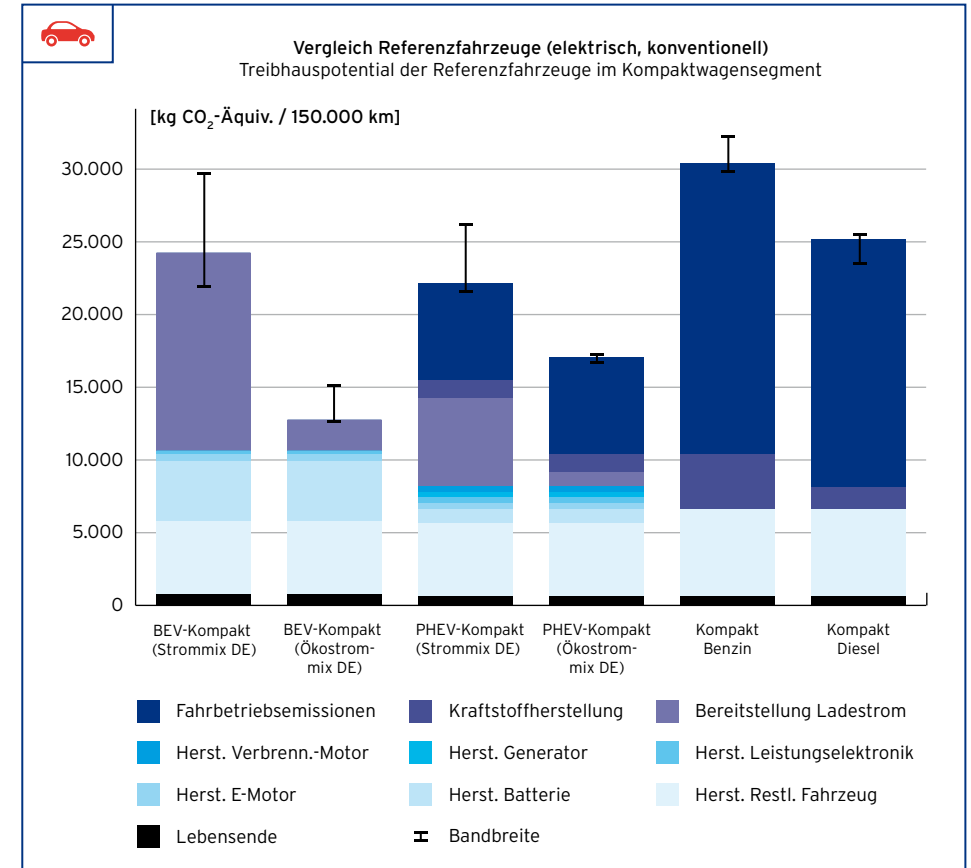


Abbildung 3.1: Vergleich der Referenzfahrzeuge im Kompaktssegment, Treibhauspotenzial

Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet liegt das batterieelektrische Referenzfahrzeug bei Verwendung des deutschen Netzstrommix als Ladestrom in einer vergleichbaren Größenordnung wie das Dieselfahrzeug. Die Bandbreite für die im Segment erhältlichen Elektrofahrzeuge erstreckt sich jedoch über einen Bereich, der sich weitgehend mit der Bandbreite von auf dem Markt erhältlichen konventionellen Fahrzeugen überschneidet,

was auf die unterschiedlichen Auslegungen der aktuell verfügbaren Fahrzeugmodelle zurückzuführen ist. Wird das BEV anstelle des deutschen Netzstrommix mit Ökostrom versorgt, lässt sich das Treibhauspotenzial gegenüber den konventionellen Fahrzeugen deutlich reduzieren.

Ein PHEV hat bei Verwendung von Ladestrom aus dem deutschen Netzstrommix und unter den gegebenen Rahmenbedingungen das niedrigste Treibhauspotenzial der untersuchten Referenzfahrzeuge und liegt im Segmentdurchschnitt deutlich unter den Wirkungen der verbrennungsmotorischen Fahrzeuge. Bei den PHEV lässt sich das Treibhauspotenzial über den Fahrzeuglebenszyklus durch den Bezug von Ökostrom als Ladestrom ebenfalls deutlich reduzieren. Weil bei den PHEV je nach Nutzungskonzept sehr starke Unterschiede in den Fahrzeugauslegungen auftreten, etwa wenn es sich um einen leistungsverzweigten Hybrid oder um ein Fahrzeug mit Range Extender handelt, sind diese Ergebnisse mit einer recht großen Bandbreite behaftet. Die unterschiedliche Funktionalität schränkt die direkte Vergleichbarkeit ein. Fahrzeuge mit Range Extender verfügen über eine Batterie mit großer Speicherkapazität und typischen rein elektrischen Reichweiten von ca. 50–100 km. Der Range Extender trägt zur Reichweitenverlängerung bei, indem die Batterie über den an den Generator gekoppelten Verbrennungsmotor wieder aufgeladen werden kann. Leistungsverzweigte Plug-In-Fahrzeuge besitzen lediglich Batterien mit geringerer Speicherkapazität und demzufolge deutlich geringere Reichweiten beim rein elektrischen Fahren und sind dafür ausgelegt eher kürzere Strecken, etwa Fahrten im Stadtverkehr, elektrisch zurückzulegen. [23]

Dementsprechend unterscheiden sich die Betriebsprofile in der Fahrzeugnutzung. Leistungsverzweigte PHEV haben unter den Rahmenbedingungen des NEFZ einen höheren Kraftstoffverbrauch und einen geringeren Stromverbrauch als Fahrzeuge mit Range Extender, was zu ganz unterschiedlichen Verteilungen der Umweltwirkungen der PHEV in der Nutzungsphase führt. Da derzeit überwiegend leistungsverzweigte PHEV auf dem Fahrzeugmarkt vertreten sind, basiert auch das ermittelte Referenzfahrzeug maßgeblich auf deren Fahrzeugauslegungen. Die Ökobilanzergebnisse der Range Extender liegen im oberen Bereich der in Abbildung 3.1 aufgezeigten Bandbreiten. Hierfür sind die höheren Umweltwirkungen der Batterieherstellung, aber auch der höhere Stromverbrauch des Fahrzeugs verantwortlich. Außerdem zeigt sich bei der Analyse der PHEV-Fahrzeuge die besonders hohe Komplexität einer realitätsnahen Berechnung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase. Durch die vielfältigen Möglichkeiten der Verteilung der Betriebsmodi der Hybridfahrzeuge, die unterschiedlichen Fahrsituationen im Realbetrieb und spezifische

Betriebsstrategien der verfügbaren Fahrzeugmodelle können die Ökobilanzergebnisse unter Betrachtung realer Rahmenbedingungen und Einsatzgebiete stärker von den Ergebnissen auf Basis des NEFZ abweichen.

- ⇒ Bei BEV-Fahrzeugen ist die Herstellungsphase aufgrund der in der Batterie eingesetzten High-Tech-Materialien besonders relevant für das Treibhauspotenzial. Die geringeren Batteriekapazitäten schwächen diesen Effekt bei den PHEV ab.
- ⇒ Variierende Fahrzeugauslegungen führen zu großen Bandbreiten bei den Ergebnissen: Sie können um bis zu 30 % streuen.

### >> 3.1.1 EINFLUSS DER FAHRLEISTUNG UND BREAK-EVEN-PUNKTE IM VERGLEICH ZU KONVENTIONELLEN FAHRZEUGEN

In Abbildung 3.2 ist das Treibhauspotenzial der Referenzfahrzeuge über die Fahrleistung aufgetragen. Die Treibhauspotenziale der Fahrzeuge bei Kilometer Null repräsentieren dabei die verursachten Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung und des Lebensendes. Zusätzlich sind die Break-Even-Punkte des BEV- und PHEV-Referenzfahrzeugs des Kompaktwagensegments zu den verbrennungsmotorischen Fahrzeugen aufgetragen. Der Break-Even-Punkt stellt dabei die erforderliche Fahrleistung dar, die ein BEV oder PHEV zurücklegen muss, um die höheren Treibhauspotenziale der Fahrzeugherstellung gegenüber Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben zu kompensieren. Erst ab diesen Fahrleistungen lässt sich durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen ein Mehrwert in Bezug auf das Treibhauspotenzial gegenüber konventionell angetriebenen Fahrzeugen erzielen.

Der Break-Even-Punkt des BEV der Kompaktklasse gegenüber einem Benzinfahrzeug wird mit dem deutschen Netzstrommix nach ca. 60.000 km erreicht. Durch Bezug des deutschen Ökostrommix als Ladestrom lässt sich der Break-Even auf eine Fahrleistung von ca. 30.000 km verschieben. Die Break-Even-Punkte im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug liegen bei 125.000 km (Strommix DE) bzw. 40.000 km (Ökostrommix DE). Ähnlich verhält es sich bei den ermittelten Break-Even-Punkten des BEV im Mini-Segment. Die Break-Even-Punkte gegenüber einem Benzinfahrzeug liegen zwischen 25.000 km (Ökostrommix) und 70.000 km (Strommix DE) und zwischen 30.000 km und 115.000 km zum Dieselfahrzeug.

Beim PHEV werden die Break-Even-Punkte im Vergleich zum BEV aufgrund der geringeren Umweltwirkungen bei der Fahrzeugherstellung früher erreicht und liegen beim Benzinfahrzeug je nach bezogenem Ladestrom zwischen ca. 15.000 km und 25.000 km und zwischen 25.000 km bzw. 55.000 km im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug. Damit liegen die Break-Even-Punkte des BEV Kompaktwagensegments in einer ähnlichen Größenordnung zu den BEV des Mini-Segments (vgl. Zwischenbericht [21]).

⇒ Die Break-Even-Punkte im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen liegen in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial sowohl für BEV als auch für PHEV innerhalb der anzunehmenden Gesamtfahrleistung.

In Tabelle 3.2 sind die Break-Even-Punkte aller untersuchter Wirkungskategorien zusammengefasst.

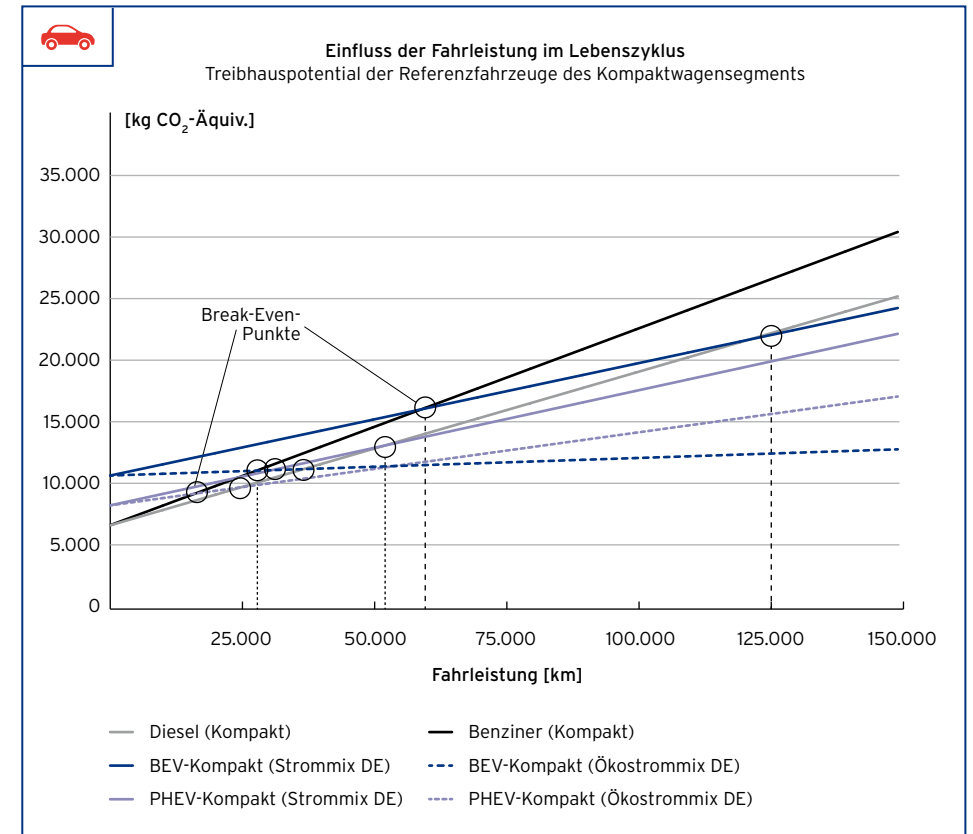


Abbildung 3.2: Einfluss der Fahrleistung auf das Treibhauspotenzial (Referenzfahrzeuge Kompaktsegment)

⇒ Der Einsatz eines Ladestroms mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien sowie hohe Fahrleistungen sind die dominierenden Einflussfaktoren für den optimalen ökologischen Nutzen von BEV und PHEV, damit die bei der Fahrzeugherstellung verursachten höheren Beiträge zum Treibhauspotenzial gegenüber konventionellen Fahrzeugen kompensiert werden können.



### Ergebnisse weiterer untersuchter Wirkungskategorien

Die Ergebnisse des Treibhauspotenzials lassen sich nicht pauschal auf andere Wirkungskategorien übertragen, sondern erfordern eine differenzierte Betrachtung. Dies ist in Abbildung 3.3 am Beispiel des Versauerungspotenzials dargestellt. Das Elektrofahrzeug trägt im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen deutlich stärker zur Versauerung bei, was vor allem auf den Rohstoffabbau und die Aufbereitung der für das Batteriesystem benötigten Aktivmaterialien zurückzuführen ist. Über den gesamten Lebenszyklus ergibt sich sowohl beim BEV als auch beim PHEV keine Reduzierung gegenüber konventionellen Fahrzeugen.

Ein potentieller Mehrwert bei der Nutzung von Elektrofahrzeugen liegt darin, dass die Emissionen und die damit verbundenen Umweltwirkungen an den Standorten der Produktion und der Stromerzeugung und nicht während der Nutzung am Fahrzeug entstehen. Gerade in dicht besiedelten Regionen oder Ballungszentren könnte dies einen positiven Effekt haben, da Emissionen verlagert werden. Um eine belastbare Abschätzung dieses Verlagerungseffekts der Umweltwirkungen vornehmen zu können, sind jedoch umfassende und regional aufgeschlüsselte Umweltdaten und Bewertungsmethoden erforderlich.

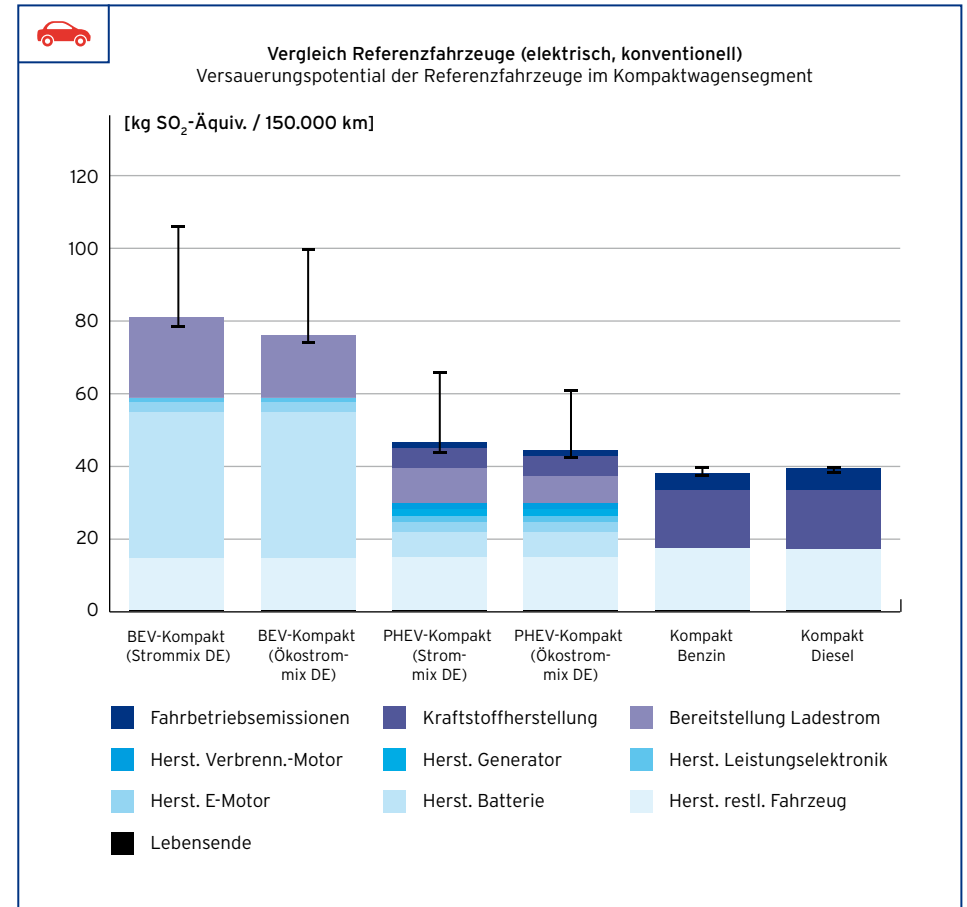


Abbildung 3.3: Vergleich der Referenzfahrzeuge im Kompaktsegment, Versauerungspotenzial

Weitere Ergebnisse für die untersuchten Wirkungskategorien und in Bezug auf den Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Quellen sollen hier kurz zusammengefasst werden:

Die Tendenzen innerhalb der Ergebnisse beim Primärenergiebedarf sind vergleichbar mit den vorgestellten Ergebnissen des Treibhauspotenzials. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Wirkungen im Treibhauspotenzial maßgeblich von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Energiebereitstellung fossiler Energieträger stammen.

In Bezug auf das Photochemische Ozonbildungspotential (POCP) kann der vermehrte Einsatz von BEV und PHEV zu einer Verbesserung gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor führen. Auch beim POCP sind die Beiträge aus der Herstellungsphase bei den elektrifizierten Fahrzeugen deutlich höher als bei konventionell angetriebenen. Diese Anteile lassen sich jedoch über die geringeren Beiträge während der Nutzungsphase kompensieren. Die Bandbreiten der BEV und der PHEV liegen in einer ähnlichen Größenordnung. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor sind vor allem die Abgasemissionen im Fahrbetrieb relevant (maßgeblich NO<sub>x</sub>, aber auch CO und NMVOC).

Beim Eutrophierungspotenzial sind die Werte für BEV zwischen denen eines Benziners und eines Dieselfahrzeugs einzuordnen, wobei die Ergebnisse innerhalb der von der Fahrzeugauslegung und dem Energieverbrauch abhängigen Bandbreiten stark schwanken können. Bei den PHEV mit einer vergleichbaren Fahrzeugauslegung von leistungsverzweigten PHEV (geringe elektrische Reichweite) bewegen sich die Werte des Eutrophierungspotenzials in der Größenordnung der Werte für Benzinfahrzeuge. Das Eutrophierungspotenzial von PHEV mit hoher elektrischer Reichweite (z.B. Range Extender) liegt am oberen Ende der Bandbreite und somit zwischen den Werten eines Benzin- und eines Dieselfahrzeugs.



Wirkungskategorie	Versauerungspotenzial (AP)	Eutrophierungspotenzial (EP)	Treibhauspotenzial (GWP)	Photochem. Ozonbildungspotenzial (POCP)	Primärenergiebedarf, nicht erneuerbare (PE)
Break-Even-Punkte des Referenzfahrzeugs (Segmentdurchschnitt) zum Benzinfahrzeug (nach Fahrleistung [km], gerundet auf 5.000 km)					
BEV-Kompakt; Strommix DE	N/V	N/V	60.000	60.000	55.000
BEV-Kompakt; Ökostrommix DE	N/V	N/V	30.000	55.000	25.000
PHEV-Kompakt; Strommix DE	N/V	110.000	25.000	30.000	25.000
PHEV-Kompakt; Ökostrommix DE	N/V	150.000	15.000	15.000	15.000
Break-Even-Punkte des Referenzfahrzeugs (Segmentdurchschnitt) zum Dieselfahrzeug (nach Fahrleistung [km], gerundet auf 5.000 km)					
BEV-Kompakt; Strommix DE	N/V	70.000	125.000	80.000	110.000
BEV-Kompakt; Ökostrommix DE	N/V	80.000	40.000	75.000	30.000
PHEV-Kompakt; Strommix DE	N/V	25.000	55.000	45.000	45.000
PHEV-Kompakt; Ökostrommix DE	N/V	25.000	25.000	45.000	20.000

Tabelle 3.2: Zusammenfassung Umweltwirkungskategorien

⇒ Die Ergebnisse der untersuchten Fahrzeugkonzepte weichen je nach näher betrachteter Wirkungskategorie stark voneinander ab. Für die Bewertung der Umweltpomformance ist es daher notwendig, alle relevanten Umweltwirkungskategorien in die Untersuchung miteinzubeziehen.

### >> 3.2 BETRIEBSDATENAUSWERTUNG

Vor der ökobilanziellen Analyse der Fahrzeuge unter Verwendung der erhobenen Betriebsdaten erfolgt in diesem Kapitel die Ergebniszusammenfassung der Betriebsdatenauswertung. Es geht dabei vor allem darum, den praktischen Einsatz und die Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge zu untersuchen. Ausgewertet wird die Praxistauglichkeit anhand von realen Nutzungsprofilen der Fahrzeuge. Die Leistungsfähigkeit der Elektroautos wird durch eine detaillierte Untersuchung des Einflusses verschiedener Faktoren auf den Energieverbrauch evaluiert. Lag der Fokus der Auswertungen im Zwischenbericht [21] noch auf den vier Fahrzeugsegmenten Minis, Kompaktklasse BEV, Kompaktklasse PHEV und Utilities (Kasten), werden im aktuellen Bericht alle vorliegenden auswertbaren Segmente einander gegenübergestellt.

#### >> 3.2.1 FAHRLEISTUNG

Die wesentliche Funktion von Fahrzeugen ist die Beförderung von Personen oder Gegenständen über eine bestimmte Fahrdistanz. Damit ist die Fahrleistung (Kilometerleistung) der wichtigste Indikator für die Nutzungsintensität der Fahrzeuge. Wie in Kapitel 3.1.1 bereits deutlich wurde, ist daneben eine hohe Gesamtfahrleistung während der Nutzungsdauer erforderlich, um die bei der Herstellung verursachten Umweltwirkungen zu kompensieren.

Abbildung 3.4 gibt einen Überblick über die mittlere Jahresfahrleistung in den einzelnen Segmenten. Die Auswertungen der Jahresfahrleistung basieren auf der Datengrundlage in Kapitel 2.3.1.

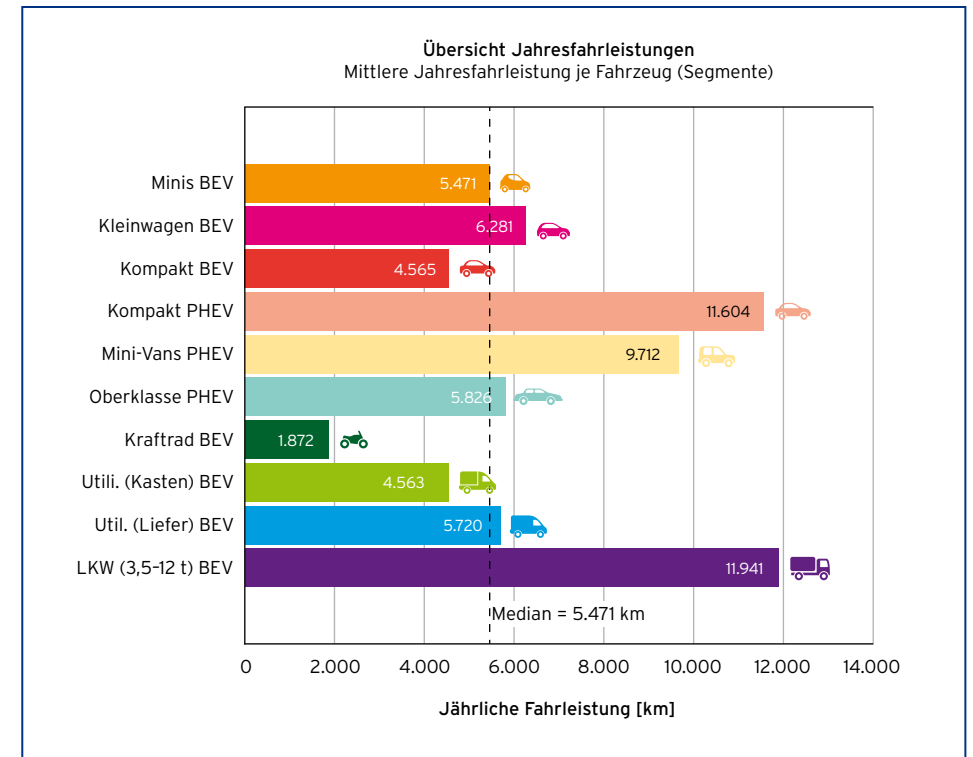


Abbildung 3.4: Mittlere Jahresfahrleistung je Fahrzeug (Segmente)






Der Median der Segmentmittelwerte liegt bei rund 5.500 km/Jahr, wie sie die Minis BEV jährlich im Schnitt zurücklegen. Fahrleistungen mit einer Abweichung von max. 20% davon erzielen auch andere rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge wie Kleinwagen und Kompaktwagen BEV sowie die Utilities BEV. Die geringste Fahrdistanz ergibt sich für die Krafträder BEV mit rund 1.900 km/Jahr. Teilweise mehr als doppelt so hoch wie der Median liegen hingegen die Fahrleistungen der Mini-Vans PHEV mit jährlich etwa 9.700 km sowie der Kompaktwagen PHEV und der LKW BEV mit etwas unter 12.000 km/Jahr. Im Vergleich zu den rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ergeben sich für die PHEV keine grundsätzlich höheren jährlichen Fahrstrecken, so weisen die Oberklasse PHEV in ihrer projektspezifischen Nutzung eine ähnliche Fahrleistung wie z.B. die Kleinwagen

oder Lieferwagen BEV auf. Gegenüber der Jahresfahrleistungen zum Stand des Zwischenberichts [21] ist für alle vergleichbaren Segmente ein Anstieg zu verzeichnen (Minis um 8 %, Kompakt BEV um 24 %, Kompakt PHEV um 3 % und Kastenwagen um 22 %).

Bei der Betrachtung der BEV Minis nach Einsatzkontext ergibt sich ebenfalls ein sehr heterogenes Bild (vgl. Tabelle 6.4). So reichen die beobachteten Jahresfahrleistungen von rund 2.000 km/Jahr für Carsharing-Fahrzeuge im Floatingbetrieb bis zu 9.400 km/Jahr für stationäre Carsharing-Fahrzeuge mit mehreren Parkplätzen. Im Vergleich zum Zwischenbericht [21] haben sich die meisten Werte im Mini-Segment im Wesentlichen nicht stark verändert. Im Kompakt PHEV-Segment liegt die Laufleistung der privaten Anwendung (12.900 km/Jahr) etwa 30 % höher als in der Firmenflotte und im ortsgebundenen Carsharing (beide rund 10.000 km/Jahr). Insgesamt sind damit im Vergleich zur Auswertung im Vorjahr [21] die Jahresfahrleistungen der beiden letzteren Einsatzkontexte angestiegen (für Carsharing-Fahrzeuge ist ein Anstieg von rund 60 % zu verzeichnen), während die privat genutzten Fahrzeuge im Mittel rund 5 % weniger gefahren wurden. Vor dem Hintergrund neu hinzugekommener Projekte kann daraus bislang aber keine eindeutige Schlussfolgerung gezogen werden.

In der Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ [17] in Tabelle 3.3 wird der Unterschied zwischen der Jahresfahrleistung der Elektrofahrzeuge und der mittleren Fahrleistung privat genutzter konventioneller Fahrzeuge in Deutschland deutlich.



KBA-Segment		Jahresfahrleistung [km/Jahr]		Segment	Anteil
	Mobilität in Deutschland [17]	Aktuelle Betriebsdatenauswertung		Betriebsdaten/ konventionelle Flotte DE	
	Minis	10.949	5.471	Minis BEV	50 %
	Kleinwagen	11.656	6.281	Kleinwagen BEV	54 %
	Kompaktklasse	14.023	4.565	Kompakt BEV	33 %
			11.604	Kompakt PHEV	83 %
	Mittelklasse	16.002	-	-	-
	Obere Mittelklasse	17.272	-	-	-
	Geländewagen*	14.562	5.826	Oberklasse PHEV	40 %
	Mini-Vans	14.741	9.712	Mini-Vans PHEV	66 %
	Großraum-Vans	19.403	-	-	-
	Utilities**	17.509	4.563	Util. (Kasten)	26 %
			5.720	Util. (Liefer)	33 %

\* einschließlich Oberklasse und Sportwagen  
\*\* einschließlich Wohnmobile

Tabelle 3.3: Jahresfahrleistung (Segmente) im Vergleich mit der Studie „Mobilität in Deutschland“ [17]

Dabei sind die kompakten Hybridfahrzeuge mit einem Fahranteil von 83 % am ehesten mit entsprechenden konventionellen Fahrzeugen vergleichbar. Alle übrigen E-Fahrzeugsegmente liegen bei rund 1/4 bis 2/3 der konventionell zurückgelegten durchschnittlichen Jahresfahrkilometer.

In der „Shell Zukunftsstudie zur PKW-Mobilität“ [2] wird mittelfristig nicht von überdurchschnittlichen Jahresfahrleistungen von reinen Elektrofahrzeugen ausgegangen, da aufgrund der eingeschränkten Reichweite weiterhin vorwiegend kurze Strecken in urbanen Gebieten zurückgelegt werden. Längerfristig wird erwartet, dass die Reichweiten der Fahrzeuge und damit auch die Jahresfahrleistungen ansteigen, sodass im Trendszenario 8.600 km/Jahr und im Alternativszenario 10.800 km/Jahr im Jahr 2040 angenommen werden, was

einer monatlichen Fahrleistung von 900 km entspricht. In fast allen Segmenten und Einsatzkontexten (Minis BEV) werden bereits jetzt von einem Teil der Fahrzeuge Fahrleistungen von über 1.000 km/Monat problemlos erreicht, wobei die maximalen monatlichen Fahrstrecken teilweise noch weit darüber liegen.

- ⇒ Die mittleren jährlichen Laufleistungen für die E-PKW liegen zwischen 4.600 km/Jahr (Kompakt BEV) und 11.600 km/Jahr (Kompakt PHEV) sowie für die Nfz zwischen ebenfalls 4.600 km/Jahr (Kastenwagen) und 11.900 km/Jahr (LKW).
- ⇒ Die Jahresfahrleistungen der Projektfahrzeuge sind derzeit noch niedriger als die mittleren jährlichen Fahrstrecken privat genutzter konventionell angetriebener Fahrzeuge in Deutschland im jeweiligen Vergleichs-Segment.
- ⇒ Langfristig wird wie in [2] ein deutlicher Anstieg bis hin zu einer Verdopplung der Laufleistung von BEV erwartet. Diese Werte werden bereits heute schon von manchen Fahrzeugen deutlich übertroffen.

### >> 3.2.2 FAHRDISTANZ JE FAHRT

Ergänzend zur Jahresfahrleistung wird hier die Fahrstrecke der einzelnen Fahrten betrachtet. Nach der Studie „Mobilität in Deutschland 2002“ [16] sind ca. 60 % aller Fahrten des motorisierten Individualverkehrs (MIV) in Deutschland kürzer als 10 km sowie etwas mehr als 80 % kürzer als 20 km. Eine Fahrstrecke von über 50 km wird im bundesdeutschen Mittel nur bei etwa 5 % aller Fahrten zurückgelegt. Im Vergleich dazu weisen die aktuellen Ergebnisse der Betriebsdatenauswertung tendenziell noch kürzere Fahrstrecken auf, wobei die verschiedenen PHEV am ehesten an die konventionelle Flotte heranreichen. Im Detail stellen sich die Verteilungen der Fahrdistanz je Fahrt wie in Abbildung 3.5 dar.

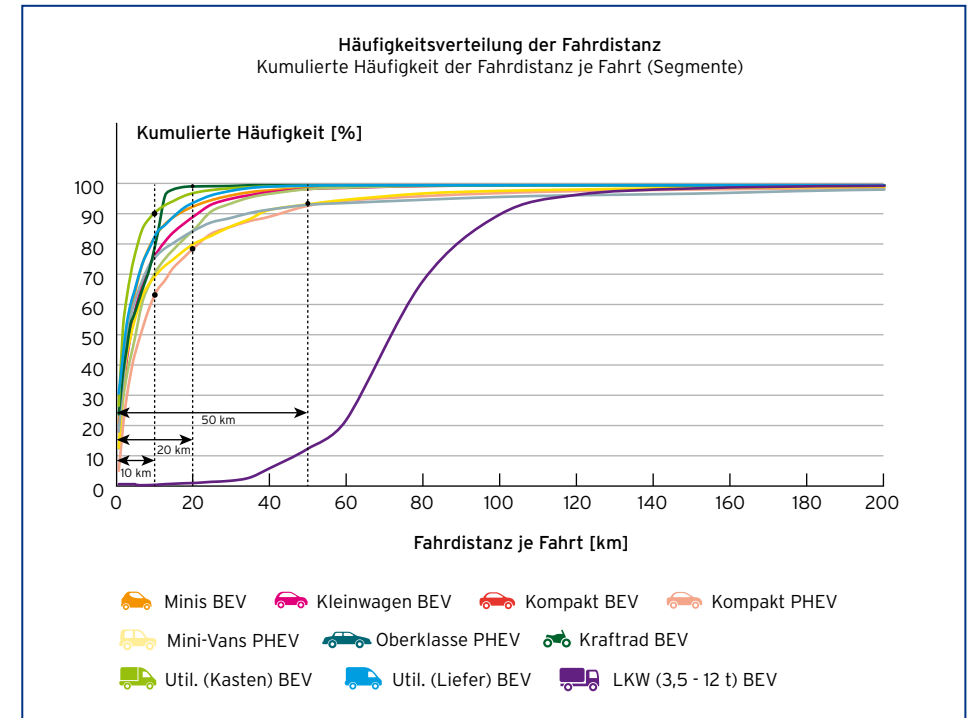


Abbildung 3.5: Fahrdistanz je Fahrt (Segmente) – kumulierte Häufigkeit

Für alle Segmente – außer für die BEV LKW – ist mit 60 bis 90 % ein Großteil der untersuchten Fahrten kürzer als 10 km. 80 bis 100 % der Fahrten haben je nach Segment ein Fahrtziel, das maximal 20 km entfernt liegt. Strecken über 50 km treten bei reinen Batteriefahrzeugen nur vereinzelt auf, bei den PHEV-Segmenten liegt der Anteil bei rund 5 %. Mit Abstand deutlich längere Fahrten liegen für die BEV LKW vor. Der Anteil der Fahrten kürzer als 30 km ist hier vernachlässigbar gering, nahezu 80 % der Fahrten sind zwischen 60 und 200 km lang. Für dieses Segment liegen allerdings Datensätze für Tages-schichten vor, die jeweils mehrere Einzelfahrten umfassen, was auch für die Buchungsdaten bei einem Teil der Carsharing-Fahrzeuge zutrifft.



Entsprechend heterogen sind die mittleren Fahrdistanzen je Fahrt je nach Segment, wie sie Tabelle 6.4 zeigt. Die Fahrstrecken der Einzelfahrten liegen hier durchschnittlich zwischen 4,4 km für batterieelektrische Kastenwagen und 18,4 km für die PHEV-Kompaktwagen, was für letztere im Vergleich zum Zwischenbericht [21] eine Verlängerung um rund 20 % darstellt. Die BEV LKW legen während einer Schicht im Schnitt 74,6 km und damit deutlich längere Strecken im Vergleich zu allen anderen Segmenten zurück. Spiegelt man die Werte am bundesdeutschen Schnitt der mittleren Fahrdistanz privat genutzter Fahrzeuge von 14,7 km [17], liegen die drei PHEV-Segmente um diesen Wert oder darüber, die BEV-PKW-Segmente hingegen darunter. Von den BEV-PKW legen die Kompaktwagen mit 9,7 km die längsten Strecken pro Fahrt zurück.

Soweit ein Vergleich möglich ist, unterscheiden sich die in Abbildung 3.5 dargestellten Verteilungsfunktionen nicht wesentlich von denen zum Zeitpunkt des Zwischenberichts [21]. Einzig die Kurve der Kompaktklasse PHEV verläuft durchgehend etwas flacher, was auf den Anstieg der mittleren Fahrdistanz je Fahrt vor allem bei ortsgebundenen Carsharing-Fahrzeugen zurückzuführen ist. Bei der einsatzkontextspezifischen Betrachtung der Minis haben sich bis auf den Rückgang der durchschnittlichen Fahrstrecken von ortsgebundenen Carsharing-Fahrzeugen von 24,9 auf 20,8 km/Fahrt keine wesentlichen Änderungen ergeben. Die Beobachtungen decken sich weitgehend mit den Ergebnissen aus dem vorangegangenen Förderzeitraum [50].

- ⇒ Insgesamt werden von den Projektfahrzeugen überwiegend Kurzstrecken zurückgelegt. Strecken über 50 km sind eher selten
- ⇒ Im Vergleich zu üblicherweise in Deutschland zurückgelegten Strecken werden von den BEV noch häufiger kürzere Strecken gefahren. Am ehesten ähneln die PHEV in ihrer Nutzung dem deutschen Fahrzeug-Mix.

### >> 3.2.3 SOC BEI FAHRTBEGINN

Der State of Charge (SOC) kennzeichnet die noch verfügbare Kapazität der Traktionsbatterie im Verhältnis zur nutzbaren Batteriekapazität. Die Untersuchung der Start-SOC für batterieelektrische Fahrzeuge gibt einen Anhaltspunkt dafür, inwieweit Fahrten auch mit nur teilweise geladener Batterie durchgeführt werden. Die Auswertungen beruhen auf dem Datenumfang nach Tabelle 6.6 im Anhang.

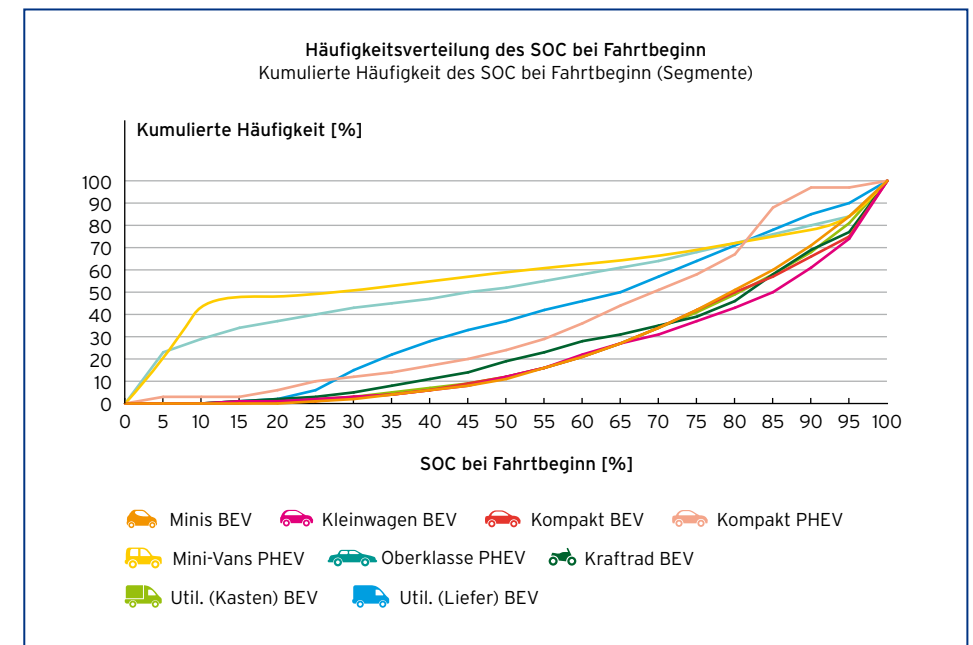


Abbildung 3.6: SOC bei Fahrtbeginn (Segmente) – kumulierte Häufigkeit

Wie Abbildung 3.6 zeigt, weisen die Fahrzeuge bei Fahrtbeginn je nach Segment teilweise sehr unterschiedliche SOC auf. Die SOC der meisten rein batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeuge sind jedoch ähnlich verteilt: Die Fahrstarts konzentrieren sich bei SOC von 70 % und höher. Eine Ausnahme sind die Lieferwagen BEV, für die eine gleichmäßigere Verteilung des Start-SOC vorliegt. Die PHEV im Mini-Van-Segment und in der Oberklasse



werden häufig auch bei weitgehend entleerter Batterie gestartet. Es scheint für die Fahrer dieser Fahrzeuggruppe aufgrund des verfügbaren Verbrennungsmotors in der Mehrzahl keine Rolle zu spielen, welchen Ladezustand die Batterie aufweist, zumal sich während der Fahrt die Möglichkeit der Nachladung bzw. der Bereitstellung des Fahrstroms durch den Verbrennungsmotor bietet.

Bei den Kompaktklasse PHEV hingegen werden nur ca.  $\frac{1}{4}$  der Fahrten bei einem SOC unter 50 % begonnen und bei  $\frac{1}{3}$  der Starts liegt der SOC-Wert bei mindestens 80 %. Da für dieses Segment – abweichend von den anderen Segmenten – überwiegend reale SOC-Werte<sup>2</sup> vorliegen, ist ein direkter Vergleich mit den anderen Segmenten nur eingeschränkt möglich. Auf Einsatzkontextbasis unterscheiden sich die Kompaktwagen PHEV hauptsächlich durch ihren Anteil an Fahrstarts bei sehr hohen bzw. sehr niedrigen SOC nahe der Nutzungsgrenzen der Traktionsbatterie. Während für Firmenflottenfahrzeuge der hohe Anteil von fast leeren Batterien bei Fahrtbeginn auffällt, starten die privat genutzten Fahrzeuge häufig bei nahezu voller Batterie.

Beim Vergleich der Ergebnisse mit den Verteilungsfunktionen im Zwischenbericht [21] fällt auf, dass die Kurven der BEV Kompaktwagen und Kastenwagen aktuell weit niedriger verlaufen, sodass Fahrten dieser Segmente aktuell noch häufiger mit vollerer Batterie gestartet werden als bisher. Die einsatzkontextspezifischen Ergebnisse für die Minis sind im Wesentlichen konstant geblieben. Zusätzlich betrachtet werden Kommunalflottenfahrzeuge, deren Häufigkeitsverteilung leicht unterhalb der Kurve des Mini-Segment-Durchschnitts liegt. D.h. hier werden Fahrten tendenziell bei noch höherem SOC begonnen.

- ⇒ Rein elektrische Fahrzeuge werden eher bei fast voller Batterie gestartet, während es bei PHEV auch häufiger Fahrten bei niedrigem Ladestand gibt.
- ⇒ Für Fahrer von PHEV scheint es aufgrund des alternativ einsetzbaren Verbrennungsmotors weniger relevant zu sein, ob die Batterie für die geplante Fahrt ausreichend geladen ist. Dies kann jedoch zu einer deutlichen Verringerung des elektrischen Fahranteils führen. Dagegen ist es vermutlich aufgrund der eingeschränkten Reichweite für BEV-Fahrer wichtig, möglichst mit einer vollen Batterie loszufahren.

<sup>2</sup> Realer SOC = Verfügbare Batteriekapazität relativ zur physikalischen Batteriekapazität. Kunden-SOC = Verfügbare Batteriekapazität relativ zur tatsächlich nutzbaren Batteriekapazität (diese ist im vorliegenden Fall auf 19–86 % der physikalischen Batteriekapazität beschränkt. Um die Batterie zu schonen, ist immer nur ein Anteil der physikalischen Batteriekapazität nutzbar. In der Regel wird der Kunden-SOC angegeben).

### >> 3.2.4 SOC BEI LADEBEGINN

Dass die vergleichsweise geringen Fahrleistungen (vgl. Kapitel 3.2.1) nicht auf die mangelnde Reichweite der E-Fahrzeuge zurückzuführen sind, bekräftigen die Untersuchungen des Batterieladestands beim Ladebeginn. Dieser lässt eine Aussage darüber zu, bis zu welchem Grad die verfügbare Batteriekapazität ausgenutzt wird, bevor eine erneute Aufladung erfolgt. Die Auswertungen zum SOC bei den Ladungen beruhen auf der Datengrundlage in Tabelle 6.7 im Anhang.

Kleinwagen BEV werden bei den Auswertungen nicht berücksichtigt, da die aufgenommenen Ladeenergiedaten mehrheitlich unplausibel waren.

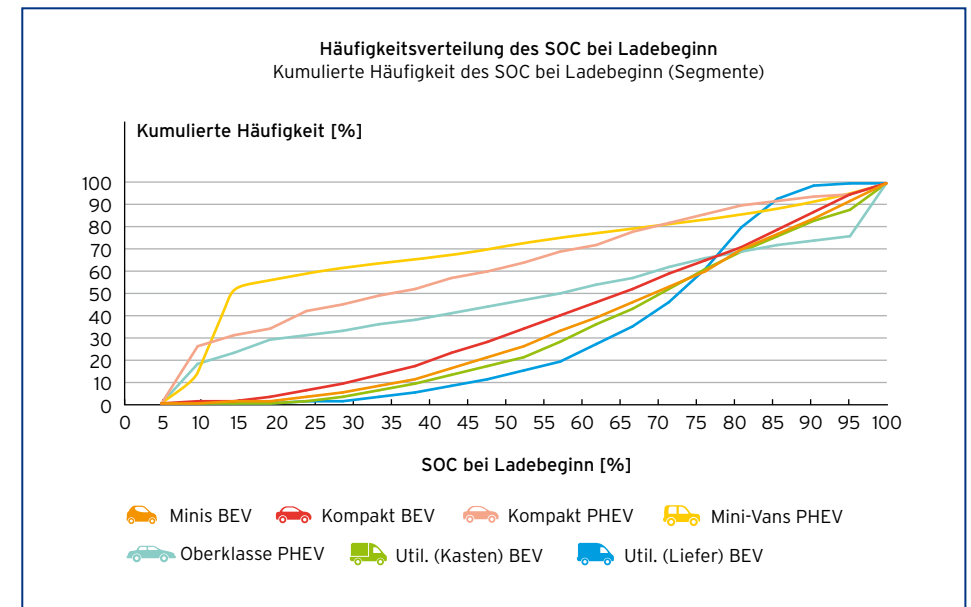


Abbildung 3.7: SOC bei Ladebeginn (Segmente) – kumulierte Häufigkeit

Beim SOC bei Ladebeginn (Abbildung 3.7) sind wie beim SOC bei Fahrtbeginn vor allem Unterschiede zwischen BEV und PHEV beobachtbar. Während es nahezu keine Ladestarts der BEV bei weitgehend entleerter Batterie gibt, werden PHEV-Ladevorgänge häufiger bei niedrigerem SOC beobachtet.

figer auch erst bei SOC unter 10 % begonnen. Der teilweise steiler werdende Verlauf der BEV-Kurven zeigt, dass Ladevorgänge in Richtung höherer SOC zunehmend häufiger auftreten. Dagegen werden die PHEV-Kurven nach dem ersten steilen Anstieg flacher und steigen anschließend etwa konstant an, was einer Gleichverteilung entspricht. Im Bereich hoher SOC fallen die Oberklasse PHEV durch einen hohen Anteil an Ladevorgängen bei fast voller Batterie auf. Mit Ausnahme dieser Beobachtung wird die Kapazität von PHEV-Batterien insgesamt häufiger besser ausgenutzt als bei reinen Elektro-Fahrzeugen. Die Befunde dieses Abschnitts werden durch die Ergebnisse im Kapitel 3.2.6 (Ladeenergie je Ladung) bestätigt.

Bei der Gegenüberstellung der aktuell berechneten einsatzkontextspezifischen Verteilungen für die Minis mit den Befunden aus dem Zwischenbericht [21] ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede. Durch die breitere Datenbasis ist nun zusätzlich der Kommunalflotteneinsatz auswertbar, für den die Ladungen schwerpunktmäßig bei über 90 % SOC gestartet werden. Ladevorgänge mit einem Start-SOC zwischen etwa 50 bis 90 % kommen angenähert gleichverteilt vor, während Ladevorgänge bei geringeren SOC-Werten eher selten begonnen werden. Die SOC bei Ladebeginn bestätigen die Ergebnisse der Fahrleistungs- und Fahrdistanzanalyse der jeweilige Einsatzkontexte.

- ⇒ Die BEV werden überwiegend bei hoher Restkapazität der Batterie nachgeladen. Für PHEV hingegen erfolgt die Ladung z. T. erst bei einem deutlich geringeren SOC.
- ⇒ Aus dem SOC am Ende des Ladevorgangs ergibt sich, dass die Batterie in der Regel vollgeladen wird.
- ⇒ Anhand der zahlreichen Ladevorgänge bei BEV mit noch sehr hohem SOC kann gefolgert werden, dass ihre Nutzung in der Regel nicht durch die mögliche Reichweite eingeschränkt wird.

### >> 3.2.5 ENERGIEVERBRAUCH

Der Energieverbrauch der Fahrzeuge spielt vor dem ökologisch-ökonomischen Hintergrund eine entscheidende Rolle und ist sowohl für BEV und PHEV als auch für konventionelle Fahrzeuge die Hauptursache für die Umweltwirkungen während der Nutzungsphase (Bereitstellung von Kraftstoff bzw. Ladestrom, Emissionen im Fahrbetrieb verbrennungsmotorischer Antriebe). Auf Basis der bisher erhobenen Daten ergeben sich für die Segmente die in Abbildung 3.8 dargestellten Verbrauchswerte. Da nicht für alle Projekte und Fahrzeuge Energieverbrauchsdaten vorhanden sind, beruhen die Auswertungen zum Energieverbrauch auf der Datengrundlage von Tabelle 6.8 im Anhang.

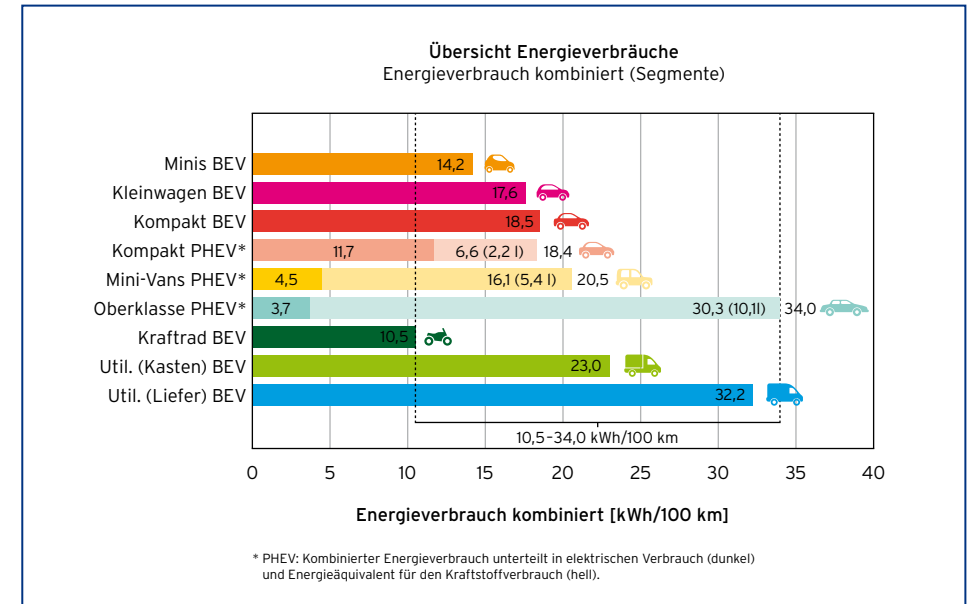







Abbildung 3.8: Energieverbrauch kombiniert (Segmente)

Um den Energieverbrauch der BEV und der PHEV miteinander vergleichbar zu machen, wird der Kraftstoffverbrauch in Form seines direkten Energieeinsatzes berücksichtigt und zum Stromverbrauch dazugerechnet. Nach Daten des österreichischen Umweltbundesamtes [39] beträgt der direkte Energieeinsatz 53 bzw. 65 kWh/100 km für Diesel- bzw. Benzin-PKW, was bei einem Energiegehalt von 8,77 kWh/l Kraftstoff einem Kraftstoffverbrauch von rund 6,7 l/100 km entspricht. Für die Darstellung des kombinierten Verbrauchs wird nun der Stromverbrauch für ein vergleichbares batterieelektrisches Fahrzeug von 20 kWh/100 km auf diesen Kraftstoffverbrauchswert bezogen, woraus sich ein Umrechnungsfaktor von gerundet 3 kWh/l ergibt. Der Kraftstoffverbrauch in Litern wird daher mit dem Faktor 3 in kWh umgerechnet und zum Stromverbrauch dazugerechnet, was im Folgenden als „kombinierter Verbrauch“ bezeichnet wird. Für die ökobilanziellen Auswertungen in Kapitel 3.3 werden Strom- und Kraftstoffverbrauch hingegen getrennt berücksichtigt.

Der für die PHEV dargestellte kombinierte Verbrauch ist unterteilt in den elektrischen Verbrauch (dunkel) und das zusätzliche Energieäquivalent für den Kraftstoffverbrauch (hell), die sich jeweils aus dem Durchschnitt über alle Fahrten ergeben. Der anteilig deutlich höhere elektrische Verbrauch für die Kompakt PHEV ist im Wesentlichen dadurch begründet, dass in diesem Segment die Fahrten zu etwa 86 % rein elektrisch erfolgen, während dies bei den PHEV Mini-Vans und der PHEV Oberklasse bei nur etwas mehr als 20 % der Fahrten der Fall ist. Die Kompaktklasse in der vorliegenden Datenbasis verfügt im Schnitt über eine deutlich größere Batterie als die beiden anderen PHEV-Segmente.

Der durchschnittliche kombinierte Energieverbrauch für die Segmente liegt zwischen 10,5 kWh/100 km für die Krafträder BEV und 34,0 kWh/100 km für die Oberklasse PHEV. Im unteren Bereich der PKW und Nutzfahrzeuge liegen Minis BEV mit 14,2 kWh/100 km. Im Mittelfeld folgen Kleinwagen bis Kastenwagen BEV mit einem kombinierten Verbrauch zwischen 17 und 23 kWh/100 km. Mit rund 32 kWh/100 km liegen die Lieferwagen verbrauchsmäßig in derselben Größenordnung wie die Fahrzeuge der Oberklasse PHEV.

Die Verbräuche der Minis nach Einsatzkontext (vgl. Kapitel 3.3.1) weichen um max. 7 % von den Werten des Zwischenberichts [17] ab, die „Reihenfolge“ der Verbrauchshöhe bleibt dabei gleich. Als zusätzlicher Einsatzkontext kommen Flottenfahrzeuge im kommunalen Einsatz hinzu, die mit 12,8 kWh/100 km den vergleichsweise geringsten Verbrauch aufweisen. Darüber hinaus lässt die Datenbasis einen Vergleich zwischen den einsatzkontextspezifischen Verbrauchswerten innerhalb der Kompaktklasse PHEV zu: Firmenflottenfahrzeuge verbrauchen rund 21 kWh/100 km und liegen damit etwa 3 kWh über den Privatwagen.

kombiniertes Segment	Energieverbrauch kombiniert [kWh/100 km]			Segment	
Förderprogramm Phase I (2009 - 2011)		Förderprogramm Phase II (2012 ff.)			
	Abschlussbericht [50]	Zwischenbericht [21]	Abschlussbericht		
Minis und Kleinwagen	17,2	14,4	14,2	Minis BEV	
		-	17,6	Kleinwagen BEV	
Kompakt- und Mittelklasse	16,9	23,3	18,5	Kompakt BEV	
Utilities (Kasten- und Lieferwagen)	30,4	-*	23,0	Util. (Kasten) BEV	
		-	32,2	Util. (Liefer) BEV	

\* Der im Zwischenbericht genannte Verbrauchswert für Utilities (Kastenwagen) von 31,1 kWh/100 km erwies sich als nicht valide.

[Tabelle 3.4: Energieverbrauch kombiniert \(Vergleich: Modellregionen der Phase I, Modellregionen Phase II mit Zwischenbericht und abschließenden Ergebnissen\)](#)

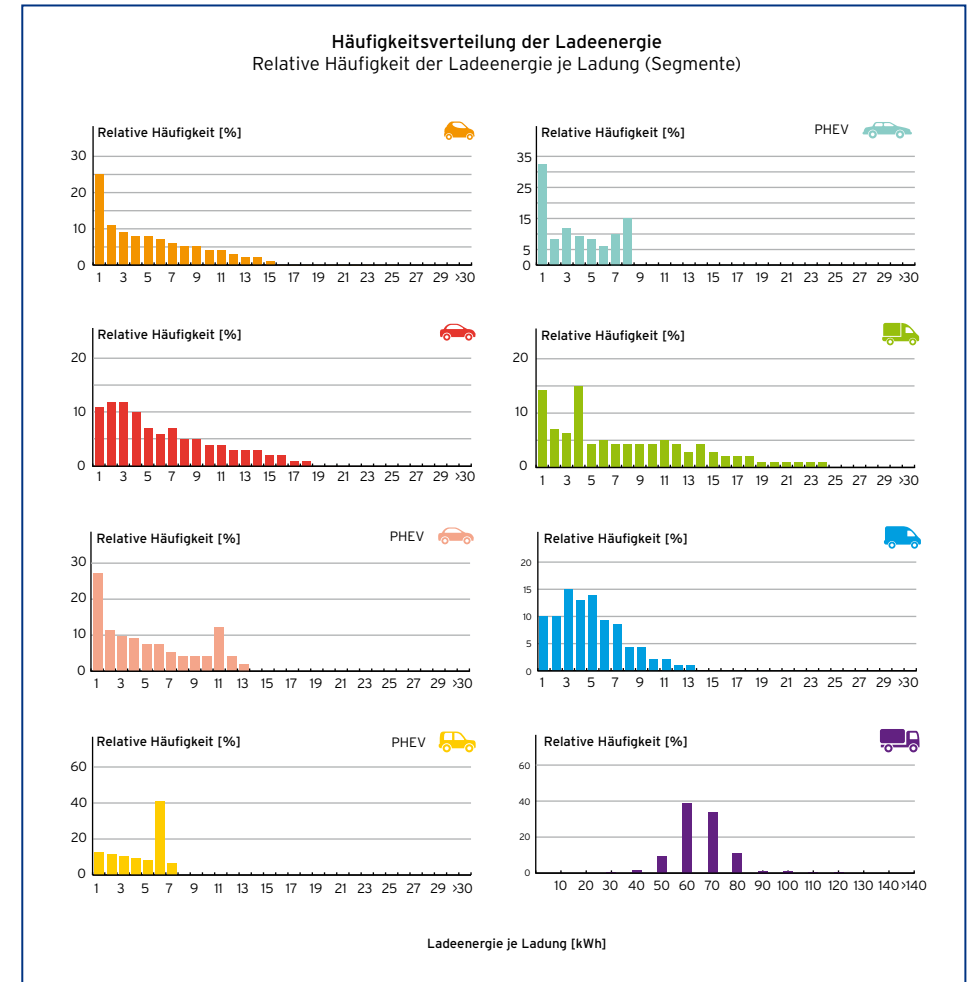
Mit dem Zwischenbericht [21] können hier lediglich Minis und Kompaktwagen verglichen werden. Dabei fällt insbesondere der um ca. 20 % niedrigere Verbrauch der Kompakt BEV auf (Tabelle 3.4). Da seit dem Zwischenbericht aufgrund von Dateninkonsistenzen diverse Neuberechnungen der Verbrauchswerte erfolgten, kann der festgestellte Rückgang nicht schlüssig nachvollzogen werden und muss erst im Rahmen weiterer Untersuchungen bestätigt werden. Der Mini-Verbrauch ist im Wesentlichen gleich geblieben.

Den aktuellen Ergebnissen sind die mittleren Verbrauchswerte, die im Rahmen der Umweltbegleitforschung der ersten Phase der Modellregionen 2009-2011 [50] ermittelt wurden, gegenübergestellt. Durch die aktuell umfangreichere Datenbasis sind im Vergleich zur ersten Phase nun auch Verbrauchswerte für Einzelsegmente verfügbar. Aufgrund der unterschiedlichen Segmentzusammensetzung ist ein direkter Vergleich der Daten aber nur bedingt möglich. Außerdem beinhaltete z.B. der Erfassungszeitraum für das kombinierte Kompakt- und Mittelklassensegment aus der ersten Phase noch keinen Wintereinsatz, welcher durch dort auftretende niedrigere Temperaturen höhere Verbräuche mit sich bringt (3.2.8.1).

- ⇒ Der Energieverbrauch der erfassten PKW im alltäglichen Gebrauch liegt zwischen 14,2 kWh/100 km (Minis BEV) und 20,5 kWh/100 km (Mini-Vans PHEV). Die Oberklasse PHEV liegt mit rund 34,0 kWh/100 km rund 65 % über den Mini-Vans.
- ⇒ Für die Nutzfahrzeuge ergeben sich durchschnittliche Verbräuche von 23,0 kWh/100 km (Kastenwagen) bzw. 32,2 kWh/100 km (LKW).

### >> 3.2.6 LADEENERGIE JE LADUNG

Das Ladeverhalten im Segmentvergleich stellt sich in Abbildung 3.9 sehr unterschiedlich dar. Die jeweils aufgenommene Ladeenergie hängt neben der gefahrenen Strecke vom spezifischen Verbrauch und der Antriebstechnik der Fahrzeuge ab. Die Auswertungen der Ladeenergie basieren auf der Datengrundlage, wie sie in Kapitel 2.3.2 dargestellt ist.



Kleinwagen BEV werden bei den Auswertungen nicht berücksichtigt, da die Ladeenergiedaten mehrheitlich unplausibel waren.

Abbildung 3.9: Ladeenergie je Ladung (Segmente)

Die maximale Ladeenergie ist durch die nutzbare Batteriekapazität begrenzt. Entsprechend liegen die größten gemessenen Ladeenergien für LKW zwischen 120 und 130 kWh, für Minis bei 17 kWh, für Kompakt BEV bei 25 kWh und für Kastenwagen bei knapp 30 kWh (vgl. Abbildung 3.9). Die PHEV-Segmente haben mit Ausnahme der Kompaktklasse mit rund 14 kWh eine deutlich geringere Batteriekapazität: Hier liegt die maximale Ladeenergie je Ladung bei 7–8 kWh. Es wird deutlich, dass allgemein überwiegend kleinere Energiemengen geladen werden, wobei die extrem hohen Anteile kleinster Ladeenergiemengen (<1 kWh) vermutlich zu einem großen Teil auf Nachladevorgänge zurückzuführen sind.

Für PHEV korrelieren die Peaks etwas unterhalb der maximalen Ladeenergie mit den häufig leeren Batterien, die dann bei der Ladung komplett wieder vollgeladen werden (vgl. Kapitel 3.2.3 und 3.2.4). Der zusätzliche Peak bei BEV Kastenwagen im Bereich von 3–4 kWh lässt sich jedoch anhand der sonstigen Fahrdaten nicht erklären. Bei den LKW unterscheidet sich das Ladeverhalten entsprechend der längeren Fahrstrecken deutlich von dem in den übrigen Fahrzeugsegmenten: In der Regel werden hier Ladeenergien zwischen 50 und 70 kWh aufgenommen.

Verglichen mit der einsatzkontextspezifischen Betrachtung der Minis im Zwischenbericht [21] liegen die durchschnittlichen Ladeenergien je Ladung in den meisten Einsatzkontexten der Minis aktuell um bis zu 17 % höher. Der Wert für die Firmenflottenfahrzeuge liegt dagegen um rund 60 % niedriger. Aufgrund einer veränderten Projekt- und Fahrzeugzusammensetzung kann hierfür kein ursächlicher Zusammenhang identifiziert werden.

In der früheren Förderphase wurde auch die Ladeenergieverteilung für das kombinierte Segment Minis und Kleinwagen sowie leichte Nutzfahrzeuge betrachtet [50], wobei die damaligen Ergebnisse weitgehend bestätigt werden.

- ⇒ Für die rein elektrisch angetriebenen Fahrzeuge dominieren eher niedrige Ladeenergien im Vergleich zu verfügbaren Batteriekapazität. So weisen in fast allen Segmenten mehr als die Hälfte der Ladevorgänge Ladeenergien von maximal 5 kWh auf.
- ⇒ PHEV weisen tendenziell geringere Ladehäufigkeiten auf (s. Tabelle 6.5). Bei den Ladevorgängen werden häufiger hohe Energiemengen bezogen auf die Kapazität geladen.
- ⇒ Die tatsächlich verfügbaren Batteriekapazitäten des Fahrzeugportfolios können anhand der oben beschriebenen maximalen Ladeenergien abgeschätzt werden. Sie reichen von rund 7 kWh für die Oberklasse und Mini-Vans PHEV bis zu einer Größenordnung von 130 kWh für die LKW.

### >> 3.2.7 WOCHENGANG DER FAHRTEN

Zur Beschreibung der Fahrzeugnutzung im Wochenverlauf wird die Verteilung der Fahrdistanz über die Wochentage betrachtet. Dabei sind deutliche Unterschiede zwischen den Segmenten erkennbar, insbesondere fällt bei einigen Segmenten eine verhältnismäßig geringe Nutzung am Wochenende auf (Abbildung 3.10).

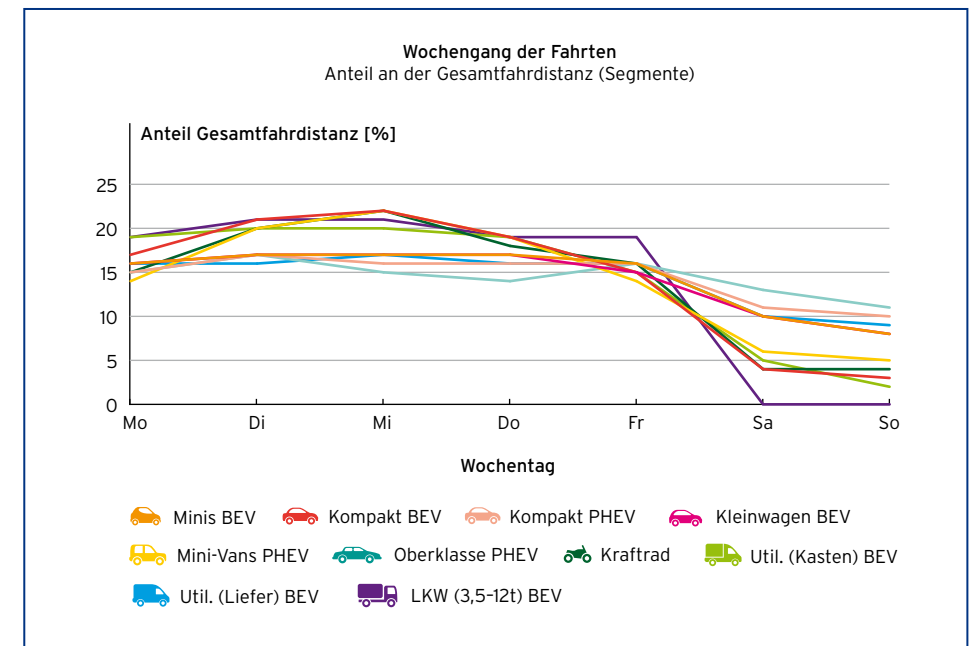


Abbildung 3.10: Nutzung über die Woche anhand des Anteils an der Gesamtfahrdistanz (Segmente)

Am auffälligsten ist dies bei den LKW, die unter der Woche nahezu konstant genutzt werden, während sie am Samstag und am Sonntag komplett stillstehen. Ein anderes Nutzungsprofil weisen die vier Segmente Krafträder, BEV Kastenwagen, BEV Kompaktklasse und PHEV Mini-Vans auf, die am Wochenende einen geringen Streckenanteil zurücklegen und ein eindeutiges Nutzungsmaximum zur Wochenmitte haben. Alle weiteren Segmente werden an Werktagen weitgehend gleichmäßig genutzt, wobei der Rückgang der Fahrleistung am Wochenende (mit einem Minimum am Sonntag) deutlich geringer ausfällt als bei den zuvor betrachteten Segmenten.



Der Wochengang der Fahrdistanz wurde im Zwischenbericht [21] ebenfalls dargestellt, wobei eine große Übereinstimmung mit den aktuellen Ergebnissen festzustellen ist. Im direkten Vergleich fällt die Nutzung von Kleinwagen BEV und Lieferwagen BEV wochentags gleichmäßiger aus, während sie am Wochenende etwas abgenommen hat. Beim Vergleich der Einsatzkontexte stellt sich das Mini-Segment wie bereits im Zwischenbericht [21] sehr heterogen dar und die wesentlichen Erkenntnisse werden bestätigt: Bei den Minis im Carsharing steigt die Nutzung von Dienstag bis Samstag tendenziell an und fällt zum Sonntag hin wieder ab. In allen anderen Einsatzkontexten werden die Fahrzeuge dagegen vorwiegend unter der Woche gefahren, wobei der Unterschied zwischen der Nutzung an Werktagen und an Wochenenden bei den Kommunalflottenfahrzeugen am größten ist. Dies trifft ebenfalls für PHEV Kompaktwagen im Carsharing zu, die sich damit von den Minis abheben.

- ⇒ Für alle Segmente ist die Nutzung unter der Woche intensiver als am Wochenende, wobei verschiedene Wochengangtypen identifiziert werden können.
- ⇒ Bei den Carsharing-Fahrzeugen im Mini-Segment steigt jedoch die Fahrleistung zum Wochenende hin deutlich an und erreicht ihr Maximum an Samstagen. Kompaktwagen im gleichen Einsatzkontext werden wie die anderen Fahrzeuge hauptsächlich unter der Woche gefahren.
- ⇒ Bei der Verteilung der Ladeenergie über die Wochentage zeigt sich ebenfalls die zumeist geringere Nutzung der Fahrzeuge an Wochenenden.

### >> 3.2.8 EINFLÜSSE AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH

Der Fahrenergieverbrauch ist generell von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig. Bei Elektrofahrzeugen ist dies umso bedeutsamer, weil durch einen erhöhten Energieverbrauch die im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen geringere Reichweite weiter beeinträchtigt wird. So reduziert sich nach Literaturwerten die verfügbare Reichweite im Winter bei Verwendung einer elektrischen Heizung insgesamt auf 40–70 % der Reichweite im Sommer ([1], [7], [11], [9], [44]).

Im Rahmen der Studie wurde neben dem Einfluss der Außentemperatur auch der Einfluss der Fahrdistanz auf den Energieverbrauch der Fahrzeuge untersucht. Die entsprechenden Auswertungen beruhen jeweils auf der Fahrzeugflotte eines ausgewählten Modells in einer bestimmten Region, um andere Einflussfaktoren auf den Verbrauch (wie etwa eine unterschiedliche Topografie) möglichst auszuschließen.

#### >> 3.2.8.1 EINFLUSS DER AUSSENTEMPERATUR

Für das Modell A aus dem Fahrzeugsegment der BEV Minis zeigt sich in Abbildung 3.11 (oben) bei Betrachtung der Tagesmittelwerte jeweils ein deutlicher Anstieg des Durchschnittsverbrauchs in der kalten Jahreszeit. Damit ergibt sich eine eindeutig negative Verbrauchskorrelation (Abbildung 3.11 (unten)), die sich auch für dasselbe Mini-Modell in einer anderen Region sowie für ein Kompaktmodell BEV zeigt. Die PHEV weisen diese Korrelation ebenfalls auf, wobei sie je nach Modell unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Das hängt vermutlich auch mit dem Anteil an rein elektrischen Fahrten zusammen, der je nach Modell sehr verschieden ausfällt.





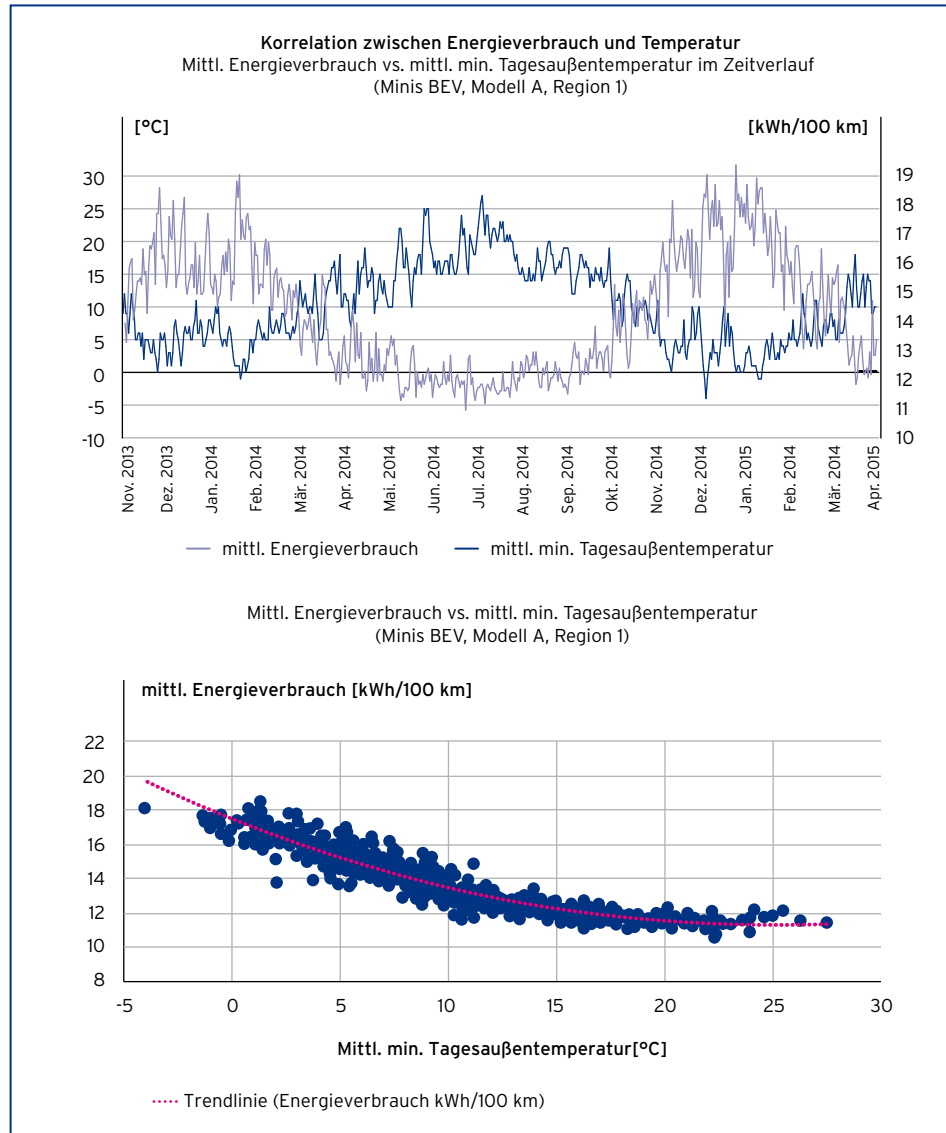


Abbildung 3.11: Minimale Tagesaußentemperatur und Energieverbrauch im Zeitverlauf (Minis BEV, Modell A, Region 1)

Werden Einzelfahrten betrachtet und der Energieverbrauch über die minimale Außentemperatur aufgetragen (vgl. Abbildung 3.12), ergeben sich Punktwolken, die fast immer eine obere fallende Grenze aufweisen. Für die PHEV ist diese Punktwolke bei der Untersuchung rein elektrischer Fahrten teilweise etwas weniger gestreut als bei gemischten (d. h. bei allen) Fahrten.

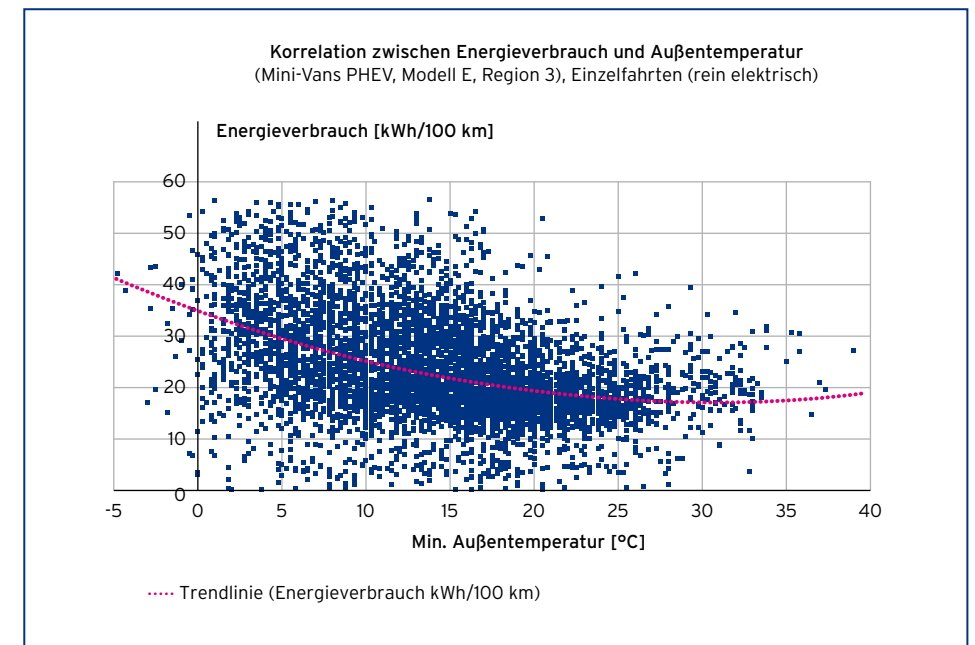


Abbildung 3.12: Minimale Außentemperatur und Energieverbrauch (Mini-Vans PHEV, Modell E, Region 3), Einzelfahrten (rein elektrisch)

Bei der Gruppierung von Temperaturbereichen (Gruppenbreite hier z.B. 2 °C) und der Untersuchung des Verlaufs des mittleren Energieverbrauchs ist stets eine negative Korrelation zwischen Außentemperaturbereich und Energieverbrauchsmittel bis zu einem Minimum zwischen 20 und 25 °C zu erkennen, wonach es zu einem erneuten Verbrauchsanstieg kommt (vgl. Abbildung 3.13). Der Unterschied zwischen Minimum und Maximum ist dabei bei BEV und PHEV für rein elektrische Fahrten größer als bei der Betrachtung der gemischten Fahrten der PHEV, was auf eine stärkere Temperaturabhängigkeit beim rein elektrischen Fahren hindeutet.

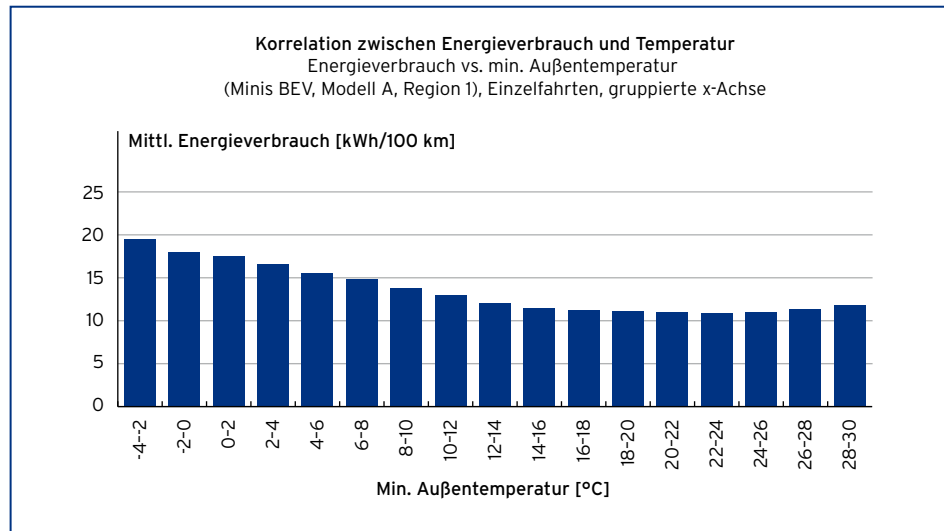


Abbildung 3.13: Minimale Außentemperatur und Energieverbrauch (Minis BEV, Modell A, Region 1), gruppierte x-Achse

Der höhere Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen bei niedrigen Temperaturen resultiert zu einem gewissen Teil aus der verringerten Leistungsfähigkeit der Batterie bei tieferen Temperaturen. So reduziert sich nach [8] deren nutzbarer Energieinhalt zwischen 25 °C und 0 °C um ca. 17 %. Dazu kommt ein erhöhter Stromverbrauch für die im Winter vermehrt erforderlichen Nebenaggregate wie Licht (100–120 W), Scheibenwischer (80–150 W) oder Heckscheibenheizung (200 W; alle Angaben nach [8]). Für eine elektrische Innenraumheizung bzw. Klimaanlage müssen sogar 3–5 kW veranschlagt werden [43].

Beim VW Golf TwinDrive, einem Plug-In-Hybrid aus dem Kompakt-Segment, liegt das Minimum der Leistungsaufnahme durch Heizung und Klimaanlage nach [25] bei 18–20 °C. Sowohl bei höheren als auch bei tieferen Außentemperaturen steigt die Leistungsaufnahme deutlich an und erreicht maximal rund 2 kW bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt oder bei ca. 30 °C (betrifft Fahrten mit einem elektrischen Anteil von >90 %). Der durchschnittliche Energieverbrauch durch die Nebenverbraucher für dieses Modell liegt bei 2,6 kWh/100 km (entspricht ca. 1/4 des Gesamtenergieverbrauch).

### >> 3.2.8.2 EINFLUSS DER FAHRDISTANZ

Abbildung 3.14 stellt Fahrdistanz und Energieverbrauch von Einzelfahrten eines Kompaktklasse BEV-Modells gegenüber. Auffällig ist die sehr große Streuung der Energieverbräuche bei kürzeren Strecken, die mit wachsender Fahrstrecke geringer wird. Dies wird auch bei anderen Fahrzeugmodellen sichtbar. Die deutlich größere Streuung der Werte bei kurzen Distanzen dürfte zu einem großen Teil auf Rundungsfehler zurückzuführen sein, denn es ist durchweg eine Stabilisierung des Verbrauchs bei längeren Fahrdistanzen zu erkennen.

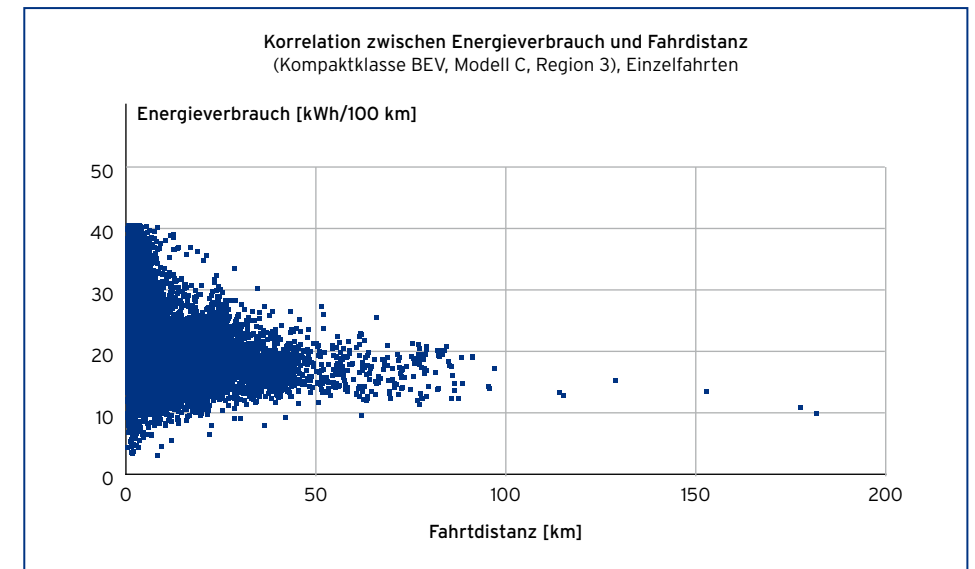


Abbildung 3.14: Fahrdistanz und Energieverbrauch (Kompaktklasse BEV, Modell C, Region 3), Einzelfahrten

Bei den Untersuchungen ergaben sich einige Anhaltspunkte, die darauf hindeuten, dass mit steigender Fahrdistanz der mittlere Energieverbrauch tendenziell sinkt. Diesbezüglich konnte im Rahmen dieser Arbeit noch kein eindeutiges Ergebnis erzielt werden. Eine mögliche Ursache hierfür könnte möglicherweise die eingeschränkte Rekuperation zu Fahrbeginn sein, weil die Batterie noch weitgehend vollgeladen ist und daher in dieser Phase keine Bremsenergie aufnehmen kann. Zudem muss der Fahrzeuginnenraum bei niedrigen Temperaturen zunächst aufgeheizt werden, bis die gewünschte Raumtemperatur erreicht ist, wodurch ein geringerer Verbrauch bei größeren Fahrdistanzen zu erwarten ist.

Neben Außentemperatur und Fahrdistanz wurden weitere Einflüsse auf den Energieverbrauch wie etwa Höhenprofil und Durchschnittsgeschwindigkeit überprüft. Zum aktuellen Zeitpunkt lässt die Datenbasis jedoch noch keine fundierten Aussagen bezüglich dieser Einflussfaktoren zu.

- ⇒ Insgesamt zeigen die Analysen für alle betrachteten Fahrzeugsegmente eine mehr oder weniger ausgeprägte negative Korrelation zwischen dem Energieverbrauch und der minimalen Außentemperatur bis ca. 20 bis 25 °C, darüber ist ein erneuter Anstieg im Verbrauch zu verzeichnen. Die Ergebnisse deuten außerdem auf eine stärkere Temperaturabhängigkeit bei rein elektrischen Fahrten als bei gemischten (d.h. bei allen) Fahrten hin.
- ⇒ Mit zunehmender Fahrdistanz nimmt die Streuung des Fahrenergieverbrauchs deutlich ab, was zum großen Teil auf Rundungsfehler zurückzuführen sein dürfte.
- ⇒ Bezüglich der Vermutung einer negativen Korrelation des elektrischen Energieverbrauchs mit der Fahrdistanz konnte auf Basis der vorliegenden Daten noch kein eindeutiges Ergebnis erzielt werden. Ebenso verhält es sich für weitere Einflüsse wie etwa Höhenprofil und Durchschnittsgeschwindigkeit.

### >> 3.2.9 LADEVERLUSTE

Der Begriff Ladeverluste wie auch die zu berücksichtigende Systemgrenze sind nicht einheitlich definiert. Das in der Literatur angegebene Spektrum der Ladeverluste reicht von 5 bis 40 %, wobei jedoch von den reinen Verlusten des Elektromotors bis hin zu Tank-to-Wheel-Verlusten völlig unterschiedliche Komponenten berücksichtigt werden ([13], [18], [22], [24], [25], [26], [29], [30], [37], [38], [40], [49]).

Das Energieflussdiagramm in Abbildung 3.15 zeigt beispielhaft elektrische Verluste, die nach der Twin-Drive Studie [26] auf dem Weg zum Elektromotor auftreten. Von den 100 % Netzstrom kommen in der Studie noch 84 % in der Hochvoltbatterie an. Der Ladeverlust von der Steckdose bis zum Antriebsstrang beträgt in diesem Fall 19,4 %. Bei den vorliegenden Projektdaten der Langzeitdatenerfassung stellt die verbrauchte Energiemenge stets den Gesamtenergieverbrauch des Fahrzeuges dar. Nebenverbraucher (wie Innenraumheizung etc.) sowie evtl. erfolgte Vorkonditionierungen der Fahrzeuge (z.B. Vorheizen im Winter) werden berücksichtigt.

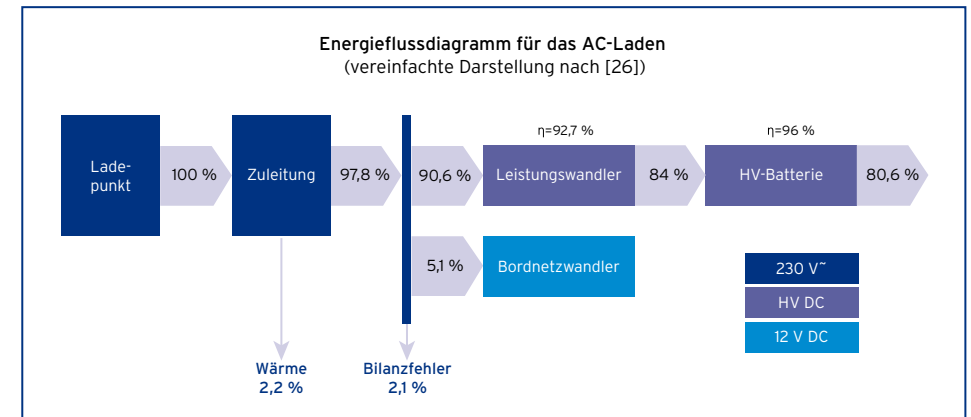


Abbildung 3.15: Energieflussdiagramm für das AC-Laden (vereinfachte Darstellung nach [26])

Die Ladeverluste gehen als Aufschlagfaktor für den Energieverbrauch während der Nutzungsphase der Fahrzeuge in die ökobilanziellen Betrachtungen ein (vgl. Kapitel 2.2). Zu ihrer Bestimmung wurde eine eigene Methodik entwickelt, bei der nur diejenigen Fahrzeuge berücksichtigt wurden, deren Datenvollständigkeit und -plausibilität mit Hilfe des SOC-Standes der Fahr- und Ladedatensätze nochmals spezifisch überprüft wurde (weitere Details vgl. [27]). Danach erwiesen sich die Daten von 77 Fahrzeugen von zwei unterschiedlichen Modellen aus insgesamt drei Projekten für eine Bestimmung von Ladeverlusten geeignet. Für diese Fahrzeuge wurde eine Bandbreite der Ladeverluste von 1 - 33 % ermittelt, was beispielhaft für die 63 Fahrzeuge des Modelltyps A in Abbildung 3.16 dargestellt ist. Die durchschnittlichen Ladeverluste liegen je nach Modell bei 9,3 bzw. 13,4 % und somit deutlich unter den bislang für die Ökobilanz pauschal angesetzten 20 %.

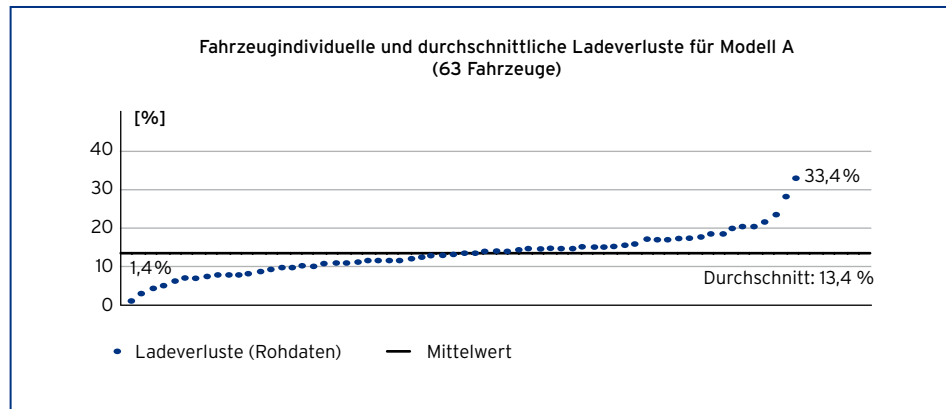


Abbildung 3.16: Fahrzeugindividuelle und durchschnittliche Ladeverluste für Modell A

- ⇒ Mit der entwickelten Vorgehensweise zur Vollständigkeitsprüfung der Daten anhand der SOC-Übergänge wurden die für eine Ladeverlustbestimmung geeigneten Fahrzeuge erfolgreich ermittelt.
- ⇒ Die berechneten fahrzeugindividuellen Ergebnisse weisen weiterhin eine erhebliche Spannweite auf. Die Mittelwerte erscheinen jedoch plausibel und valide.
- ⇒ Die ermittelten Ladeverluste liegen mit durchschnittlich 9,3 bzw. 13,4 % deutlich unter den bislang für die Ökobilanz pauschal angesetzten 20 %.



### >> 3.3 ÖKOBILANZAUSWERTUNG DER BETRIEBSDATEN

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für die Fahrzeugsegmente Kompaktwagen und Minis auf Basis der in Kapitel 3.2 erläuterten Betriebsdaten der Langzeitdatenerfassung vorgestellt. Diese Daten repräsentieren die in der Langzeitdatenerfassung ermittelten spezifischen Energieverbräuche und Fahrleistungen der in den Modellregionen eingesetzten Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV), Stand Sept 2015. Für die Abbildung der Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung und des Lebensendes wird das Konzept des virtuellen Fahrzeugs herangezogen, welches den gewichteten Durchschnitt der in den Modellregionen eingesetzten Elektrofahrzeuge eines Segments darstellt. Für das BEV im Mini-Segment wird ein Fahrzeug mit einem Gesamtgewicht von 1.020 kg und einer Li-Ionen-Batterie von 15,5 kWh angenommen. Das BEV der Kompaktklasse hat ein Gesamtgewicht von 1.520 kg und eine 22,6-kWh-Batterie, der angenommene PHEV (hohe elektrische Reichweite) ein Gesamtgewicht von 1.750 kg und ein Batteriesystem mit einer Speicherkapazität von 15 kWh.








Virtuelles Fahrzeug		Leergewicht [kg]	Speicherkapazität Batteriesystem [kWh]
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)			
	Minis	1.020	15,5
	Klein-/ Kompaktwagen	1.520	22,6
	Utilities (Kastenwagen)	1.500	22,3
	Utilities (Lieferwagen)	2.200	30
Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV)			
	Kompaktsegment, hohe elektrische Reichweite (Batterie > 10 kWh)	1.750	15
	Kompaktsegment, geringe elektrische Reichweite (Batterie < 10 kWh)	1.660	6,6











Tabelle 3.5: Kenndaten der ermittelten virtuellen Fahrzeuge (Auszug)




Die ökobilanzielle Auswertung erfolgt zunächst auf Basis der ermittelten Fahrenergieverbrauchs- werte. Die Gesamtfahrleistung der Fahrzeuge wird gemäß der allgemeinen Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 2.2) mit 150.000 km in 12 Jahren Fahrzeugnutzung angenommen. Die anschließende Auswertung erfolgt zusätzlich unter Berücksichtigung der spezifischen Fahrleistungen der Fahrzeuge in den untersuchten Einsatzkontexten. Die Berechnung der Nutzungsphase erfolgt unter Annahme des deutschen Netzstrommix und Ökostrommix als Ladestrom.

>> 3.3.1 FAHRENERGIEVERBRAUCH

Die erhobenen Fahrenergieverbrauchsdaten der Langzeitdatenerfassung stellen den Energieverbrauch ohne Berücksichtigung der Ladeverluste dar. Um den gesamten Energieverbrauch der Fahrzeuge am Stromnetz abzubilden, wird ein Ladeverlust von 20 % zugerechnet (vgl. Kapitel 2.2 und [6][15][26]), welcher in den nachfolgenden Abbildungen separat ausgewiesen wird. Dieser Literaturwert, der über den Ergebnissen von Kapitel 3.2.9 liegt, wird aus Konsistenzgründen gewählt. Durch die spezifische Ausweisung werden mögliche Potentiale für künftige Einsparungen deutlich.

Tabelle 3.6 fasst die hinterlegten Verbrauchsdaten für die betrachteten Segmente und ausgewählten Einsatzkontexte zusammen.

Durchschnittlicher Energieverbrauch nach Fahrzeugsegment		Stromverbrauch im Fahrzeug [kWh/100 km]	Annahme Ladeverluste [%]	Stromverbrauch am Stromnetz [kWh/100 km]	Kraftstoffverbrauch (PHEV) [l/100 km]
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)					
	Mini-Segment				
Segmentdurchschnitt		14,2	20	17,1	-
	CarSharing (mehrere Parkplätze)	17,5	20	21,0	-
	Dienstwagen	13,7	20	16,4	-
	Flotte (Firmen)	14,3	20	17,2	-
	Flotte (kommunal)	12,8	20	15,3	-
	Privatwagen	14,1	20	17,0	-
	Kleinwagen				
Segmentdurchschnitt		17,6	20	21,1	-
	Kompaktwagen				
Segmentdurchschnitt		18,5	20	22,2	-
	Utilities (Kastenwagen)				
Segmentdurchschnitt		23,0	20	27,6	-
	Utilities (Lieferwagen)				
Segmentdurchschnitt		32,2	20	38,7	-

	Durchschnittlicher Energieverbrauch nach Fahrzeugsegment	Stromverbrauch im Fahrzeug [kWh/100 km]	Annahme Ladeverluste [%]	Stromverbrauch am Stromnetz [kWh/100 km]	Kraftstoffverbrauch (PHEV) [l/100 km]
Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV)*					
	Kompakt-Segment (hohe elektrische Reichweite, Batterie > 10kWh)				
Segmentdurchschnitt		11,72*	20	14,1	2,21*
	Flotte (Firmen)	14,70*	20	17,6	2,06*
	Privatwagen	11,63*	20	14,0	2,20*

\*Gewichteter Strom- und Kraftstoffverbrauch über Anteile der Betriebsmodi (elektrisch, hybrid)

Tabelle 3.6: Segment- und einsatzkontextspezifischer Fahrenergieverbrauch (Langzeitdatenerfassung)

Für das Mini-Segment wurde in der Langzeitdatenerfassung ein durchschnittlicher segment-spezifischer Fahrenergieverbrauch von 14,2 kWh/100 km ermittelt (vgl. Kapitel 3.2.5). Unter Berücksichtigung zusätzlicher Ladeverluste von 20 % ergibt sich ein Verbrauch am Stromnetz von 17,2 kWh/100 km. Der ermittelte Realverbrauch liegt somit ca. 24 % höher als die ermittelten NEFZ-Verbrauchswerte des Marktdurchschnitts von 13,9 kWh/100 km (vgl. Kapitel 3.1). Ähnlich verhält es sich bei den Fahrzeugen aus dem Segment Kompaktklasse, wobei hier die ermittelten Verbrauchswerte stärker von den NEFZ-Werten der auf dem Markt erhältlichen Fahrzeuge abweichen.

>> 3.3.2 AUSWERTUNG DES FAHRZEUGLEBENSZYKLUS

In Abbildung 3.17 und Abbildung 3.18 sind die Umweltwirkungen des Fahrzeuglebenszyklus am Beispiel des PHEV und BEV der Kompaktklasse dargestellt. Die Ergebnisse sind dazu anhand der relativen Anteile der Lebenszyklusphasen am Fahrzeuglebenszyklus dargestellt. Die Ergebnisse der Herstellungsphase (Herst.) sind zudem anhand der relevanten Antriebskomponenten und des restlichen Fahrzeugs weiter unterteilt. Die Berechnung der Umweltwirkungen der Nutzungsphase basiert auf dem Fahrenergieverbrauch des Segmentdurchschnitts sowie der Annahme einer Gesamtfahrleistung von 150.000 km. Als Ladestrom wird der deutsche Netzstrommix herangezogen. Die Ergebnisse bei Verwen-

dung des deutschen Ökostrommix sind in den folgenden Abbildungen als gestrichelte Linie dargestellt, um die Einsparpotenziale gegenüber dem deutschen Netzstrommix aufzuzeigen.

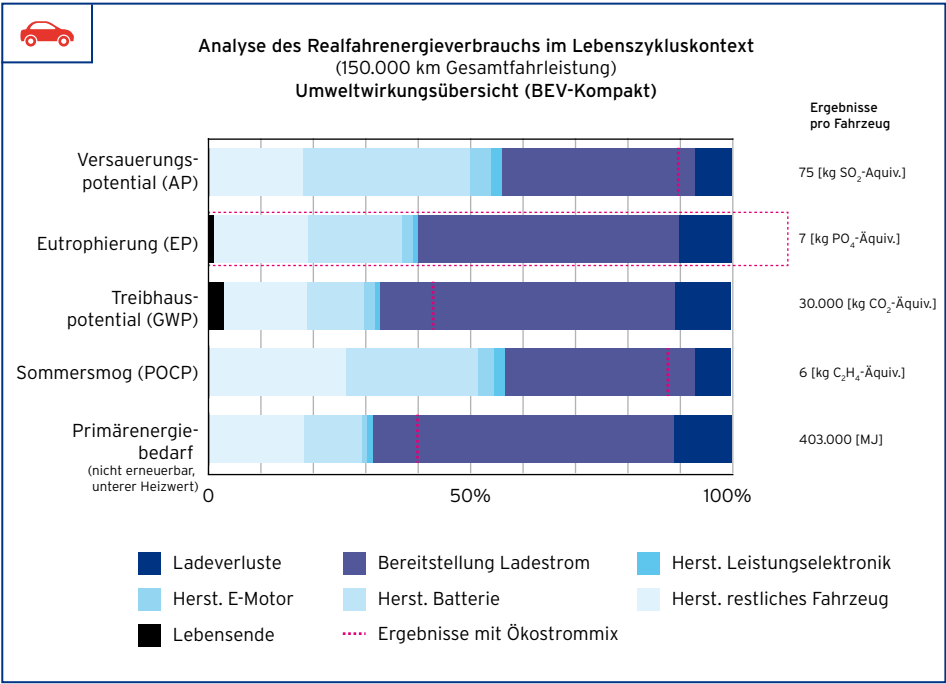


Abbildung 3.17: Anteile der Lebenszyklusphasen an den Umweltwirkungen des BEV der Kompaktklasse unter Berücksichtigung des ermittelten Fahrenergieverbrauchs der Langzeitdatenerfassung

Abbildung 3.17 zeigt, dass die Nutzungsphase einen wesentlichen Anteil an den untersuchten Umweltwirkungen während des Fahrzeuglebenszyklus einnimmt. Die Nutzungsphase ist dabei stark von den individuellen Rahmenbedingungen der Fahrzeugnutzung abhängig. Der Ladestrommix am Nutzungsstandort, die Fahrleistung und der spezifische Fahrenergieverbrauch sind wichtige Einflussfaktoren für die Ökobilanz der Elektrofahrzeuge. Wird der deutsche Ökostrommix anstelle des Netzstrommix für die Ladung der Fahrzeuge ver-



wendet, lassen sich vor allem die Wirkungen zum Treibhauspotenzial und der Primärenergiebedarf aus fossilen Ressourcen signifikant senken. In den weiteren untersuchten Wirkungskategorien AP, POCP und EP lassen sich keine bzw. nur geringe Verringerungen der Wirkungen erzielen, was maßgeblich auf den vergleichsweise hohen Anteil der Biomassenstromerzeugung zurückzuführen ist. Da auch bei den regenerativen Energien unterschiedliche Stromerzeugungstechnologien und Energieträger zum Einsatz kommen (z. B. Wind-, Wasserkraft, Photovoltaik, etc.), können sich die Umweltprofile des bezogenen Ladestroms deutlich unterscheiden, sodass eine differenzierte Betrachtung auf der Grundlage der Rahmenbedingungen am Einsatzort der Fahrzeuge erforderlich ist. Dem entsprechend können die Einsparpotenziale je nach Mix an Erneuerbaren Energien zusätzlich variieren.

Auffällig ist zudem der hohe Anteil der Herstellungsphase in allen betrachteten Umweltwirkungskategorien, welche zwischen 30 % (GWP) und 60 % (AP) des gesamten Lebenszyklus des BEV im Kompakt-Segment ausmachen. Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, wird die hohe Relevanz des Batteriesystems an den Umweltwirkungen in der Herstellungsphase sichtbar. Das Batteriesystem nimmt eine Schlüsselposition bei der Ökobilanzierung von Elektrofahrzeugen ein, es ist eine wichtige Schlüsselkomponente. Die Auslegung der Reichweite eines Elektrofahrzeuges hat somit einen hohen Einfluss auf die Ökobilanz, weil dadurch die Dimensionierung des Batteriesystems vorgegeben wird. Vergleichbare Tendenzen lassen sich auch bei den Auswertungen der BEV der weiteren Fahrzeugsegmente feststellen.

Eine ähnliche Verteilung der Lebenszyklusphasen am Gesamtlebenszyklus ergibt sich auch für die untersuchten PHEV-Fahrzeuge im Kompaktsegment (hohe elektrische Reichweite, Batteriesystem >10 kWh). Wie in Kapitel 3.1 beschrieben gibt es aber eine Reihe grundsätzlicher Unterschiede zwischen diesen beiden Fahrzeugkonzepten, die je nach Nutzungscharakteristik zu deutlicheren Unterschieden in den Ergebnissen führen können. Signifikante Unterschiede zwischen PHEV mit hoher elektrischer Reichweite und BEV ergeben sich maßgeblich im POCP, verursacht durch die Stickoxidemissionen während der Fahrzeugnutzung, womit die Nutzungsphase in dieser Kategorie beim PHEV deutlich an Bedeutung gewinnt.

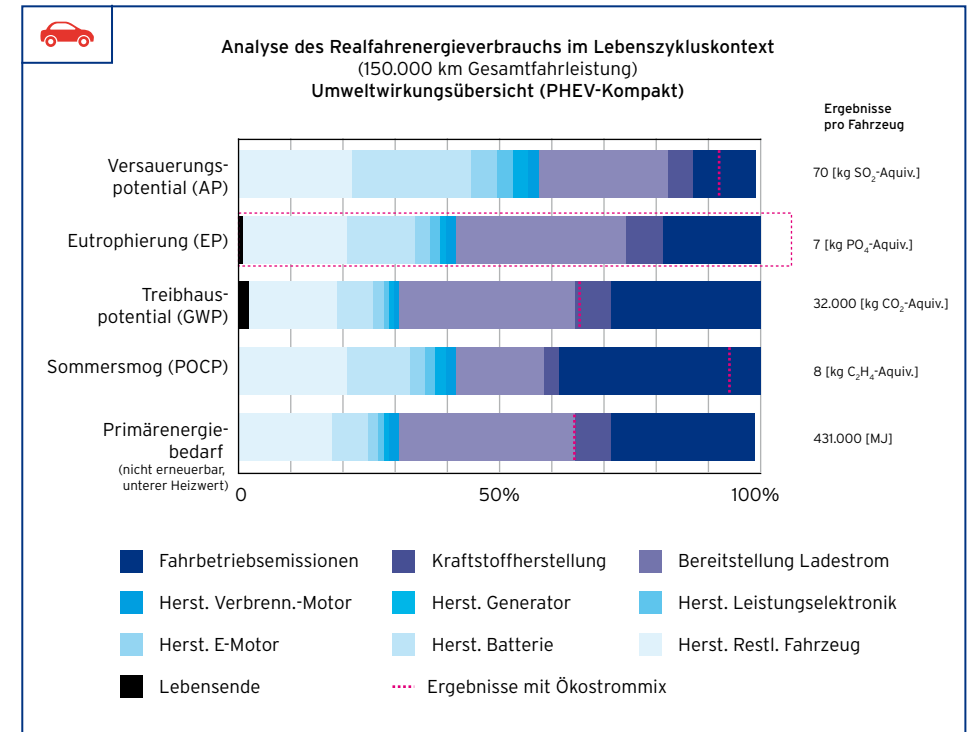


Abbildung 3.18: Anteile der Lebenszyklusphasen an den Umweltwirkungen des PHEV der Kompaktklasse unter Berücksichtigung des ermittelten Fahrerenergieverbrauchs der Langzeitdatenerfassung

Die Ergebnisse aller untersuchten Fahrzeugkonzepte und Segmente machen die Bedeutung der kontextbezogenen Auslegung der elektrischen Reichweite für die Ökobilanz deutlich, da diese einen wichtigen Einfluss auf die Dimensionierung des Batteriesystems hat. Damit können Fahrzeughersteller durch bedarfsgerechte Batteriedimensionierung einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Ökobilanz von Elektrofahrzeugen leisten. Dies setzt gleichzeitig eine bedarfsgerechte Fahrzeugauswahl durch Flottenbetreiber und Fahrzeugnutzer voraus, womit bereits beim heutigen Fahrzeugmarkt das Umweltprofil von Elektromobilität deutlich optimiert werden kann. So haben sich in der Betriebsdatenauswertung einsatzkontextspezifische Unterschiede beim Fahrerenergieverbrauch gezeigt (vgl. Kapitel 3.2), deren ökobilanziellen Auswirkungen im Folgenden näher untersucht werden.

- ⇒ Die Auslegung der Reichweite eines Elektrofahrzeuges hat einen hohen Einfluss auf die Ökobilanz, da diese die Dimensionierung des Batteriesystems mitbestimmt.
- ⇒ Durch einsatzkontextbezogene Fahrzeugwahl und -dimensionierung kann das Umweltprofil weiter verbessert werden.
- ⇒ Bei PHEV Fahrzeugen ergibt sich aufgrund der Hybridisierung des Antriebstrangs eine stärkere Abhängigkeit der Umweltbilanz von den spezifischen Nutzungsprofilen im Einsatzkontext, da diese die Verteilung der Betriebsmodi (elektrisch, hybrid) des Fahrzeugs beeinflussen.

Aufgrund der im Vergleich zum Mini-Segment schwereren Fahrzeuge und den dadurch bedingten größeren Batteriekapazitäten liegen die absoluten Werte der Umweltwirkungen bei den Kompakt BEV deutlich höher. So liegt beispielsweise für die Wirkungskategorie Treibhauspotenzial unter den genannten Rahmenbedingungen das Mini-Segment bei knapp 23.000 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. (vgl. [21]) im Vergleich der BEV-Kompaktklasse mit 32.000 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. über den gesamten Lebenszyklus. Die relativen Anteile der verschiedenen Lebenszyklusphasen verteilen sich dabei ähnlich.

### >> 3.3.3 BANDBREITEN DURCH EINSATZKONTEXTSPEZIFISCHE FAHRENERGIEVERBRAUCHSWERTE

Die Fahrenergieverbräuche und Fahrleistungen aus der Langzeitdatenerfassung lassen sich den spezifischen Einsatzkontexten der Fahrzeuge in den Modellregionen zuordnen. Dies soll zu einem besseren Verständnis der Einsatzprofile der Fahrzeuge in den verschiedenen Nutzungskonzepten führen. Wie aus Tabelle 3.6 ersichtlich ist, variieren die Realverbrauchsdaten in den verschiedenen Einsatzkontexten. Bei den Fahrzeugen im Mini-Segment reichen die Verbrauchswerte je nach Einsatzkontext von 12,8 kWh/100 km bis 17,5 kWh/100 km. Inklusive der veranschlagten Ladeverluste von 20 % ergibt sich ein Strombedarf am Stromnetz von 15,3 kWh/100 km bis 21 kWh/100 km.

In Abbildung 3.19 sind die einsatzkontextspezifischen Treibhausgas-Emissionen pro Fahrkilometer am Beispiel der Fahrzeuge aus dem Minis-Segment dargestellt. Es wird hier von einer Gesamtfahrleistung von 150.000 km und dem deutschen Strommix 2010 als Ladestrom ausgegangen. Die potentiellen Einsparungen durch den Bezug von Ökostrom sind in Form der gestrichelten Linie dargestellt.

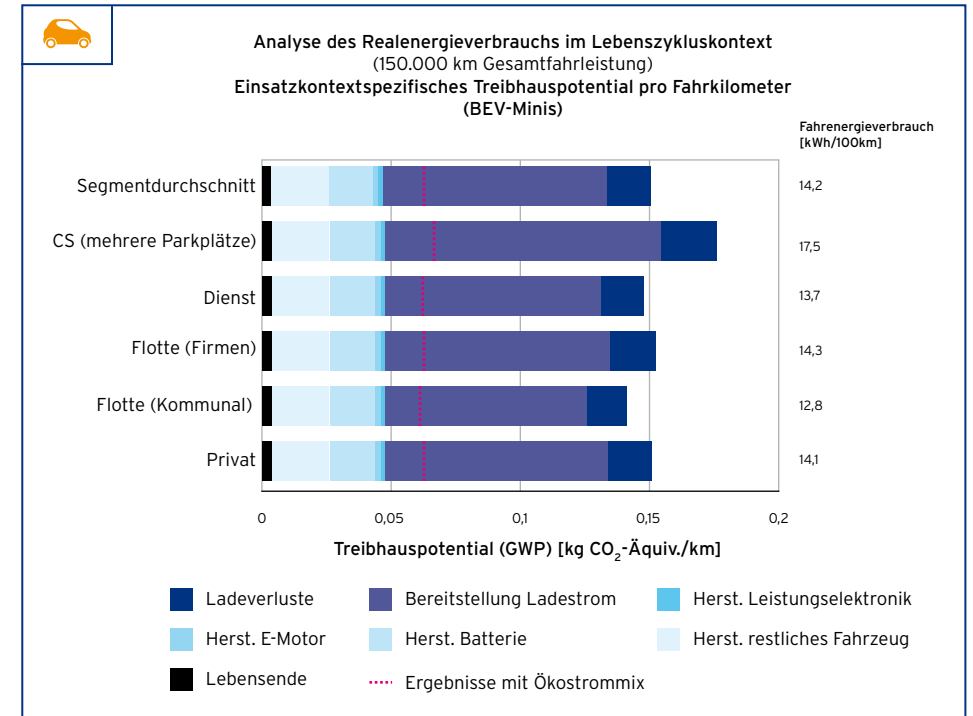


Abbildung 3.19: Treibhauspotenzial der Mini-BEV unter Berücksichtigung der einsatzkontextspezifischen Fahrenergieverbräuche (je Fahrkilometer)

Durch die Bandbreiten des erfassten Fahrenergieverbrauchs ergeben sich beim Treibhauspotenzial unter den gewählten Randbedingungen Beiträge zwischen 140 und 175 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km. Wird anstelle des deutschen Netzstrommix der deutsche Ökostrommix als Ladestrom bezogen (gestrichelte Linie), so verringern sich die Treibhauspotenziale der Minis BEV auf Werte zwischen 61 und 67 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km. Dabei ist zu beachten, dass diese Werte die Umweltwirkungen des gesamten Lebenszyklus, von der Fahrzeugherstellung, bis zum Lebensende beinhalten. Sie sind daher nicht mit den CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der Herstellerangaben von konventionellen Fahrzeugen vergleichbar, welche sich auf die Abgasemissionen im Fahrbetrieb beziehen (z. B. in g CO<sub>2</sub>/km, vgl. Tabelle 3.1).

Das Treibhauspotenzial des BEV des Kompaktsegments liegt im Segmentdurchschnitt bei ca. 198 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km, bzw. ca. 84 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km bei Verwendung des deutschen Ökostrommix (Abbildung 3.20). Bei den PHEV-Fahrzeugen (hohe elektrische Reichweite) des Kompaktwagen-Segments lassen sich auf Basis der Langzeitdatenerfassung spezifische Fahrenergieverbräuche für den Privatgebrauch und den Einsatz in Firmenflotten ermitteln. Die Treibhauspotenziale je Fahrkilometer liegen bei Verwendung des deutschen Netzstrommix zwischen 212 und 231 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km und ca. 140 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km bei Verwendung des deutschen Ökostrommix als Ladestrom.

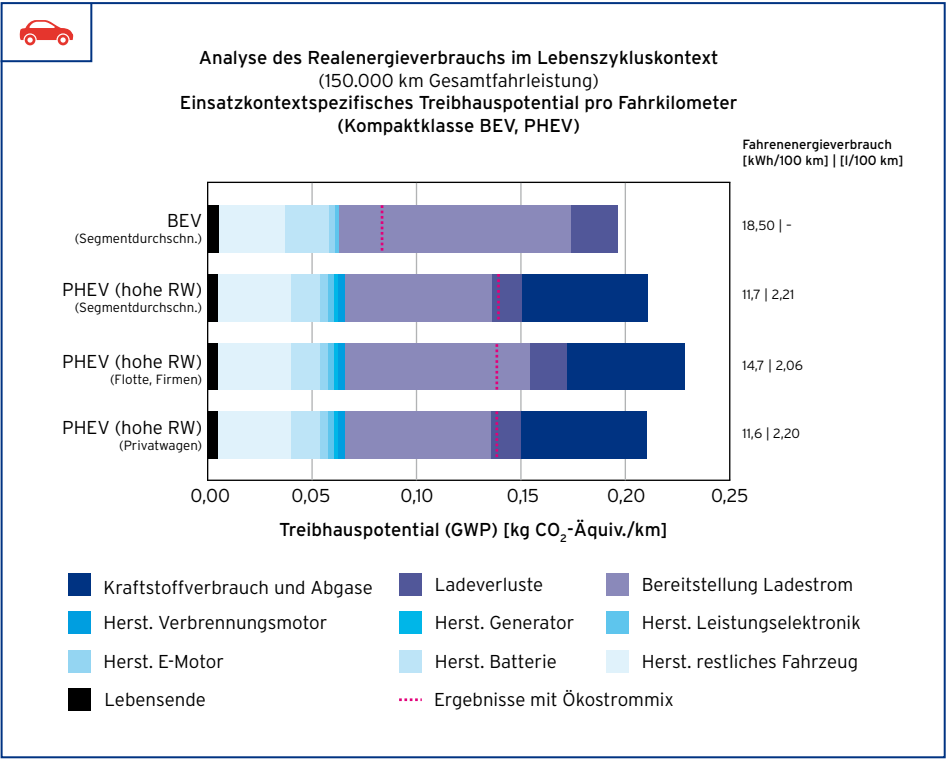


Abbildung 3.20: Treibhauspotenzial der BEV und PHEV der Kompaktklasse unter Berücksichtigung der einsatzkontextspezifischen Fahrenergieverbräuche (je Fahrkilometer)

- ⇒ Das Treibhauspotenzial je Fahrkilometer berechnet sich über die Treibhauspotenziale der Herstellung, Nutzung und des Lebensendes. Die Anteile der Herstellungsphase und Entsorgung werden dabei linear über die Lebenszyklusfahrleistung verteilt.
- ⇒ Für das Mini-Segment sind die absoluten Werte geringer als für das Kompaktsegment. Die relativen Anteile der verschiedenen Lebenszyklusphasen verteilen sich ähnlich.











Treibhauspotenzial je Fahrkilometer (Annahme 150.000 km Gesamtfahrleistung)		Treibhauspotenzial (GWP) [kgCO <sub>2</sub> -Äquiv./km]	
		Strommix DE	Ökostrommix DE
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Segmentdurchschnitt			
	Mini	0,151	0,063
	Kleinwagen	0,192	0,083
	Kompaktwagen	0,198	0,084
	Utilities (Kastenwagen)	0,227	0,085
	Utilities (Lieferwagen)	0,331	0,132
Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV), Segmentdurchschnitt			
	Kompaktwagen, hohe elektrische Reichweite (Batterie >10 kWh)	0,213	0,141

Tabelle 3.7: Treibhauspotenzial je Fahrkilometer (Gesamtfahrleistung: 150.000 km)

>> 3.3.4 EINFLUSS DER FAHRLEISTUNG

Wie aus den Ergebnissen der Lebenszyklusanalyse der BEV und PHEV hervorgeht, hat die Nutzungsphase und somit die Höhe der Fahrleistung in den spezifischen Einsatzkontexten einen großen Einfluss auf die Ökobilanz der Fahrzeuge, weil damit die höheren Umweltwirkungen in der Herstellungsphase kompensiert werden können. In den folgenden Auswertungen werden zusätzlich zum ermittelten Fahrenergieverbrauch auch die einsatzkontextspezifischen Fahrleistungen der Langzeitdatenerfassung berücksichtigt. Die Gesamtfahrleistungen der Fahrzeuge werden anhand der durchschnittlichen Monatsfahrleistungen auf eine Fahrzeuglebensdauer von 12 Jahren hochgerechnet.

Tabelle 3.8 fasst die segment- und einsatzkontextspezifischen Fahrleistungen zusammen.

Durchschnittliche Fahrleistungen nach Segment und Einsatzkontext		Durchschnittswerte der Datenerfassung		Hochrechnung	
		Wegstrecke [km / Fahrt]	Monats-fahrleistung je Fahrzeug [km / Monat]	Jahres-fahrleistung je Fahrzeug [km / Jahr]	Gesamt-fahrleistung je Fahrzeug [km / 12 J.]
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)					
	Mini-Segment				
Segmentdurchschnitt		7,0	456	5.471	65.652
	Carsharing (mehrere P.)				
		17,4	781	9.368	112.412
	Dienstwagen				
		6,7	562	6.740	80.875
	Flotte (Firmen)				
		6,2	451	5.417	64.999
	Flotte (Kommunal)				
		8,8	390	4.678	56.131
	Privatwagen				
		7,6	667	8.003	96.032
	Kleinwagen-Segment				
Segmentdurchschnitt		8,1	523	6.281	75.369
	Kompakt-Segment				
Segmentdurchschnitt		9,7	380	4.565	54.781
	Utilities (Kastenwagen)				
Segmentdurchschnitt		4,4	380	4.563	54.758
	Utilities (Lieferwagen)				
Segmentdurchschnitt		6,0	477	5.720	68.645




Durchschnittliche Fahrleistungen nach Segment und Einsatzkontext		Durchschnittswerte der Datenerfassung		Hochrechnung	
		Wegstrecke [km / Fahrt]	Monats-fahrleistung je Fahrzeug [km / Monat]	Jahres-fahrleistung je Fahrzeug [km / Jahr]	Gesamt-fahrleistung je Fahrzeug [km / 12 J.]
Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV)					
	Kompakt-Segment (weite elektrische Reichweite, Batterie > 10 kWh)				
Segmentdurchschnitt		18,4	967	11.604	139.244
	Flotte (Firmen)				
		20,1	965	11.584	139.010
	Privatwagen				
		15,3	1.075	12.897	154.767

Tabelle 3.8: Segment- und einsatzkontextspezifische Fahrleistungen (Langzeitdatenerfassung)

Die hochgerechneten Fahrleistungen liegen in den untersuchten Fahrzeugsegmenten bisher unter der veranschlagten Gesamtfahrleistung von 150.000 km. Die vergleichsweise geringen Fahrleistungen und entsprechende Entwicklungsszenarien wurden bereits in Kapitel 3.2.1 diskutiert.

Der Einfluss der Fahrleistung auf die Ökobilanz der eingesetzten Fahrzeuge wird in Abbildung 3.21 am Beispiel des Mini-Segments deutlich. Die Ergebnisse werden beispielhaft für das Treibhauspotenzial je Kilometer dargestellt. Durch die geringere Fahrleistung der Fahrzeuge erhöht sich die Relevanz der Herstellungsphase. Da die Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung und des Lebensendes über die Fahrleistung alloziert wird, resultieren höhere Werte je Kilometer.

Unter Berücksichtigung der ermittelten Fahrleistungen der Langzeitdatenerfassung resultieren für das Mini-BEV im Treibhauspotenzial Werte von ca. 176 bis 218 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km, bzw. 82 bis 139 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km bei Verwendung des deutschen Ökostrommix.

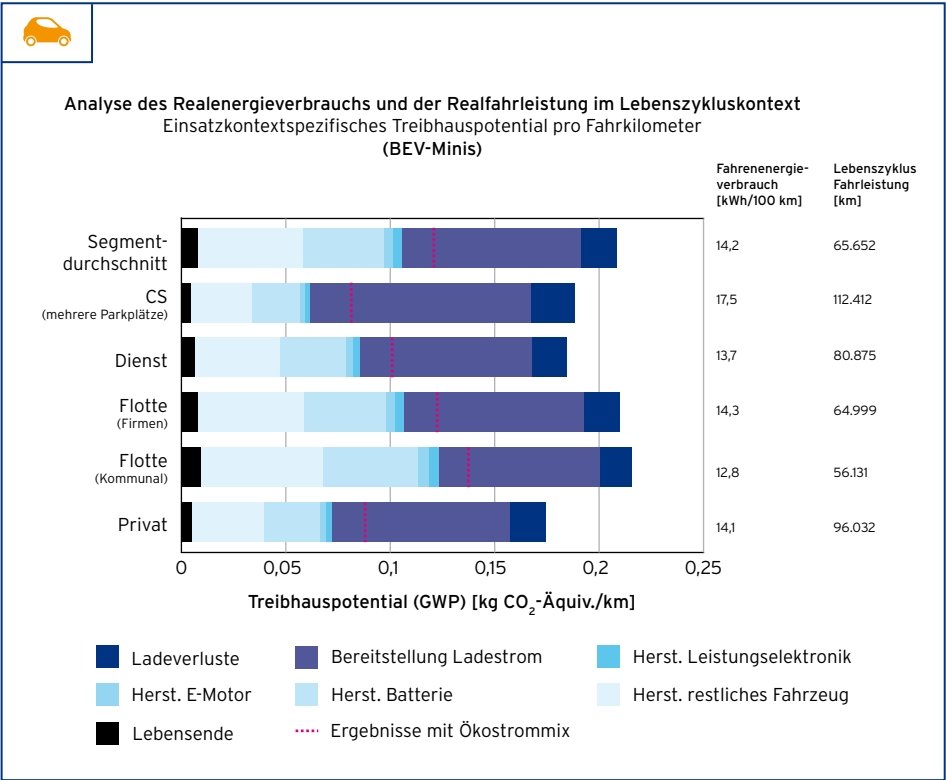


Abbildung 3.21: Treibhauspotential des Mini- BEV unter Berücksichtigung der einsatzkontextspezifischen Fahrenergieverbräuche und Fahrleistungen (je km)

In Abbildung 3.22 sind die Ergebnisse für die Fahrzeuge des Kompaktwagensegments dargestellt. Die PHEV der Kompaktklasse erreichen in den Flottenprojekten der Modellregionen bereits vergleichsweise hohe Fahrleistungen von ca. 139.000 bis 155.000 km. Somit sind nur geringere Abweichungen in den auf den Fahrkilometer bezogenen Treibhauspotenzialen festzustellen, welche von 210 bis 236 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km reichen, bzw. von 138 bis 146 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km bei Verwendung des deutschen Ökostrommix.

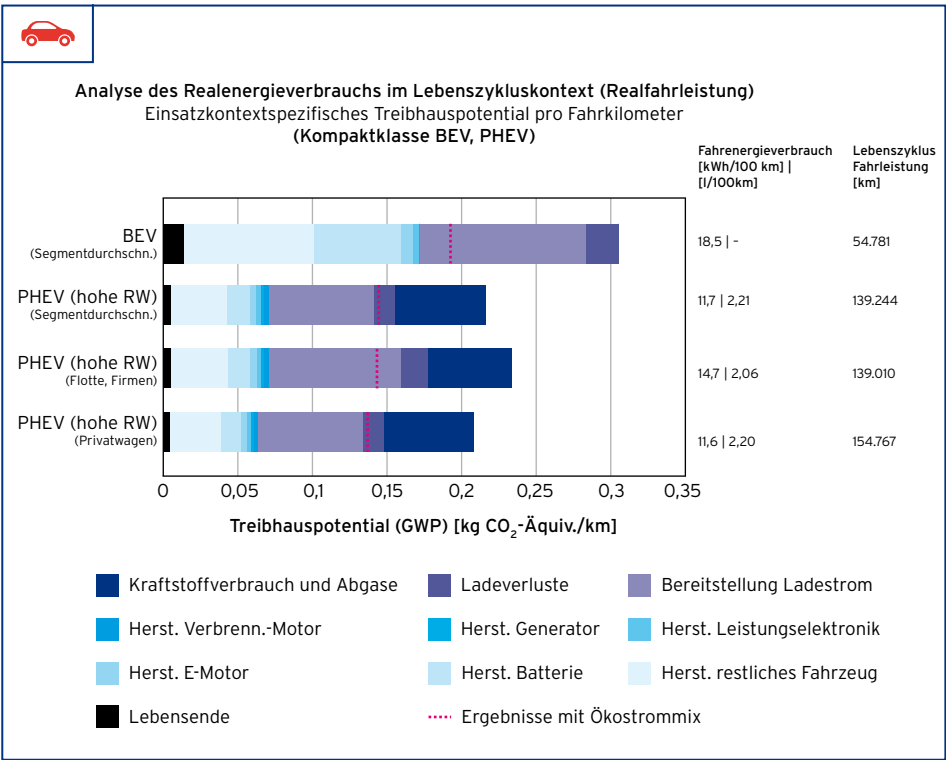


Abbildung 3.22: Treibhauspotential der BEV und PHEV der Kompaktklasse unter Berücksichtigung der einsatzkontextspezifischen Fahrenergieverbräuche und Fahrleistungen (je km)

Das Fahrprofil der Nutzer im angestrebten Einsatzkontext spielt eine wichtige Rolle für die Planung und für die optimierte Auslegung von Fahrzeugen und Fahrzeugflotten. Das betrifft sowohl die Auswahl des Antriebkonzeptes, die Fahrzeugauslegung (im Falle von BEV beispielsweise die Auslegung der Reichweite) als auch die Auslastung der Fahrzeuge. Fahrzeugflotten sollten also immer hinsichtlich der spezifischen Bedürfnisse der Nutzer geprüft, zusammengestellt und optimiert werden.

Grundsätzlich sind für alle Fahrzeugkonzepte solche Nutzungsprofile anzustreben, die eine möglichst hohe Auslastung gewährleisten. Aufgrund der höheren Umweltwirkungen der Herstellungsphase der BEV im Vergleich zu den konventionell angetriebenen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor gewinnt dieser Aspekt für den ökologisch sinnvollen Einsatz der Elektrofahrzeuge zusätzlich an Relevanz.

⇒ Die Gesamtfahrleistung hat einen wichtigen Einfluss auf die Ökobilanz der Fahrzeuge. Somit ist eine produktgerechte Auslastung bzw. eine entsprechend hohe Fahrleistung anzustreben. Die Fahrzeugauswahl in einer Fahrzeugflottenzusammenstellung sollte daher sinnvoll, gemäß dem spezifischen Nutzungsprofil und Einsatzkontext erfolgen.







Treibhauspotenzial je Fahrkilometer (unter Annahme von Realfahrleistungen)		Treibhauspotenzial (GWP) [kgCO <sub>2</sub> -Äquiv./km]	
		Strommix DE	Ökostrommix DE
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Segmentdurchschnitt			
	Mini	0,210	0,123
	Kleinwagen	0,255	0,146
	Kompaktwagen	0,309	0,195
	Utilities (Kastenwagen)	0,330	0,188
	Utilities (Lieferwagen)	0,444	0,245
Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV), Segmentdurchschnitt			
	Kompaktwagen, hohe elektrische Reichweite (Batterie > 10kWh)	0,218	0,146

Tabelle 3.9: Treibhauspotenzial je Fahrkilometer (unter Annahme von Realfahrleistungen)

>> 4 ANALYSE DER NUTZUNGSPROFILE

Aus den in den Projekten gewonnenen Erfahrungen sollen möglichst ideale Rahmenbedingungen für den erfolgreichen Einsatz von Elektrofahrzeugen abgeleitet werden. Die Betriebsdatenauswertung der elektromobilen Fahrzeugflotte aus den Demonstrationsprojekten in Kapitel 3.2 hat gezeigt, dass Fahrzeuge aus unterschiedlichen Segmenten bzw. Einsatzkontexten in unterschiedlicher Art und Weise genutzt werden und somit individuelle Nutzungsprofile aufweisen. Zur Charakterisierung und Bewertung der Nutzungsprofile wurden in einem Abstimmungsprozess innerhalb der AG PKW und Nfz bestimmte Merkmale (hier als Planungsindikatoren bezeichnet), wie z. B. die Jahresfahrleistung in Kapitel 3.2.1, eingeführt. Diese sollen die Orientierung im Planungsprozess bzw. bei der Fahrzeugauswahl für Flottenbetreiber oder potentielle Einzelanwender erleichtern.

Im Folgenden werden die einzelnen Indikatoren vorgestellt und erläutert. Anschließend sollen einzelne Einsatzkontexte im Mini-Segment exemplarisch anhand einer Auswahl von Planungsindikatoren charakterisiert werden. In Abschnitt 4.3 werden ausgewählte Projektbeispiele genauer vorgestellt.

>> 4.1 PLANUNGSINDIKATOREN

Die im Rahmen der AG PKW und Nutzfahrzeuge zusammengetragenen Planungsindikatoren (Tabelle 4.1) wurden von der Begleitforschung erarbeitet und danach mit der Arbeitsgruppe diskutiert und weiterentwickelt. Die Charakterisierungsmerkmale gehen über das Minimaldatenset hinaus, sie lassen sich in vier Kategorien (Auslastung, Ladevorgänge, Energieeffizienz sowie Fahrzeugeinsatz und Nutzung) einteilen.



Planungskategorie	
Auslastung	
Fahrleistung (je Fahrt, täglich, monatlich, jährlich)	
Anzahl der Nutzungstage (z. B. monatlich)	
Anzahl Fahrten (z. B. täglich)	
Nutzungsdauer (je Fahrt, täglich, monatlich, jährlich)	
Anzahl Nutzer (insgesamt)	
Wochentagabhängige Nutzung	
Ladevorgänge	
Herkunft-Strom	Eigenstromerzeugung Ökostromvertrag
Ladevorgang	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische Mindestanforderungen Anschluss</li> <li>• Zugänglichkeit</li> <li>• Effizienz</li> <li>• Anzahl Ladevorgänge</li> <li>• Anzahl der Nutzungstage</li> <li>• Ladeenergie</li> <li>• Dauer</li> </ul>
Energieeffizienz	
Energieverbrauch	
Fahrschulungen	
Fahrgastraum-Behaglichkeit	
Fahrzeugeinsatz und Nutzung	
Einsatzort (z. B. sensible Bereiche)	
Einsatzzeit	
Einsatzdauer	
Reichweiten	
Lademöglichkeit	
Vorkonditionierung	
Sichtbarkeit der Nutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Öffentlichkeitsarbeit</li> <li>• Zugänglichkeit</li> <li>• Anzahl der Nutzer</li> </ul>
Zweckmäßige Fahrzeugauswahl (gemäß spezifischem Nutzungsprofil und Einsatzkontext)	
Angepasste Fahrzeugdimensionierung	
Steuerung der Auslastung	

Tabelle 4.1: Planungsindikatoren für den Einsatz von Elektrofahrzeugen

Für die aus ökobilanzieller Sicht zu befürwortende möglichst hohe Auslastung der Fahrzeuge (vgl. Kapitel 3.3.4) sind unterschiedliche Aspekte ausschlaggebend. Grundsätzlich sollte das Mobilitätsbedürfnis möglichst vieler Nutzer befriedigt werden oder es können möglichst hohe Fahrdistanzen angestrebt werden.

Die Kategorie Ladevorgänge beinhaltet sowohl die Herkunft des Ladestroms als auch die Bedingungen für die Strombereitstellung und den Ladevorgang. Die Kategorie Energieeffizienz umfasst verschiedene Indikatoren, die durch technische Lösungen oder eine Änderung des Nutzerverhaltens die Reichweite der Fahrzeuge beeinflussen. Mögliche Aspekte sind hier Fahrschulungen oder die gewünschte Fahrgastraum-Behaglichkeit. Unter Fahrzeugeinsatz und Nutzung werden verschiedene relevante Einsatzaspekte angeführt. Hier stellt sich auch die Frage nach dem Einsatzort. Sensible Bereiche wie etwa Lärmschutzzonen stellen hier besonders geeignete Rahmenbedingungen dar. Je nachdem welcher spezifische Indikator im jeweiligen Untersuchungsfall besonders relevant ist, sollte dies eine wesentliche Rolle bei der Fahrzeugauswahl spielen.

Anwender können durch diese Indikatoren geplante Einsatzkonzepte charakterisieren, bewerten und im Umkehrschluss ableiten, welche Rahmenbedingungen für einen sinnvollen Einsatz der Elektromobilität vorhanden sein oder künftig ermöglicht werden müssen. Die Planungsindikatoren sollen Flottenbetreibern oder potentiellen Einzelanwendern in erster Linie bei der Planung und Entscheidung helfen. Sie zeigen auf, welche relevanten Fragestellungen bei der Fahrzeugauswahl bzw. Konzepterstellung berücksichtigt werden sollten.

## >> 4.2 BEISPIELHAFTE CHARAKTERISIERUNG VON NUTZUNGSPROFILIEN

Anhand der in Kapitel 4.1 vorgestellten Indikatoren werden im Folgenden beispielhaft einsatzkontextspezifische Nutzungsprofile für das Mini-Segment aus den Projekten der Modellregionen Elektromobilität des BMVI dargestellt und miteinander verglichen. Zur Veranschaulichung der Bandbreite der vorhandenen Nutzungsprofile erfolgt die Betrachtung an diesen drei Einsatzkontexten: Carsharing mit mehreren Parkplätzen, Firmenflottenwagen und private Nutzung. Die Datenerfassung im Rahmen des vorliegenden Projekts beschränkte sich auf die Kategorien Auslastung und Ladevorgänge, die im Folgenden im Fokus stehen. Tabelle 4.2 zeigt die beispielhafte Charakterisierung von Nutzungsprofilen anhand der drei Einsatzkontexte.




Planungskategorie		Minis Einsatzkontexte		
Auslastung		CS (mehrere P.)	Flotte (Firmen)	Privat
				
Fahrleistung (jährlich) in km		9.368	5.442	8.093
Anzahl der Nutzungstage (monatlich)		24	15	20
Anzahl Fahrten (täglich)		2	5	5
Nutzungsdauer (täglich) in Std.		6	1	1
Anzahl Nutzer (insgesamt)		k.A.	k.A.	k.A.
Wochentagabhängige Nutzung (Anteil Fahrleistung)				
Ladevorgänge				
Herkunft-Strom	Eigenstromerzeugung	k.A.	k.A.	k.A.
	Ökostromvertrag	k.A.	k.A.	k.A.
Ladevorgang	Zugänglichkeit	k.A.	k.A.	k.A.
	Effizienz	k.A.	k.A.	k.A.
	Anzahl Ladevorgänge (täglich)	2	2	2
	Anzahl der Nutzungstage (monatlich) in d	23	10	14
	Ladeenergie (monatlich) in kWh	136	78	107
	Dauer (täglich) in Std.	22	3	4

Tabelle 4.2: Charakterisierung von Nutzungsprofilen durch Planungsindikatoren

In der Planungskategorie Auslastung werden fünf der Indikatoren exemplarisch beschrieben. Carsharing-Fahrzeuge mit mehreren Parkmöglichkeiten fahren im Schnitt rund 9.400 km und weisen unter den drei betrachteten Einsatzkontexten damit die größte jährliche Fahrleistung auf. Privatwagen werden etwas weniger genutzt und legen ca. 8.100 km im Jahr zurück. Firmenflottenfahrzeuge fahren rund 60 % der jährlichen Strecke im Vergleich zu den E-Fahrzeugen im Carsharing-Einsatz.

Entsprechend unterschiedlich stellen sich die Anzahl der Nutzungstage pro Monat bei den verschiedenen Einsätzen dar. Während Firmenflottenwagen an durchschnittlich jedem zweiten Tag genutzt werden, sind es bei den Privatwagen 20 Nutzungstage pro Monat. Die Fahrzeuge im Carsharing werden an den meisten Tagen im Monat genutzt.

Bezüglich der täglichen Fahrtenzahl und Nutzungsdauer weisen Firmenflottenfahrzeuge und Privatwagen die gleiche Ausprägung von fünf Fahrten täglich und einer Stunde auf. Dabei sind nur die Tage berücksichtigt, an denen eine Fahrt stattfindet. Für die Carsharing-Fahrzeuge liegen Buchungsdaten und Buchungszeiten vor. Am Ende einer Buchung muss das Fahrzeug wieder auf einem der vorgesehenen Ladeplätze abgestellt und geladen werden. So können sich hinter einer Buchung auch mehrere Fahrten verbergen, zwischen denen das Fahrzeug einmal oder mehrmals abgestellt wurde, wodurch für diese beiden Indikatoren kein direkter Vergleich mit den beiden anderen Einsatzkontexten möglich ist.

Über die Woche betrachtet weisen die drei Einsatzmöglichkeiten teilweise auffällige Unterschiede auf: Bei den Carsharing-Fahrzeugen steigt der tägliche Anteil an der Gesamtfahrstrecke bis zum Samstag an und fällt am Sonntag wieder ab. Dagegen ist die Nutzung von Firmenflotten- und Privatfahrzeugen an Werktagen relativ gleichmäßig und fällt am Wochenende ab (Minimum am Sonntag). Bei der Firmenflotte ist dieser Unterschied noch größer als bei Privatwagen.

Im Bereich Ladevorgänge zeigt die monatliche Ladeenergie erwartungsgemäß dieselbe Tendenz wie die zurückgelegte Jahresfahrleistung auf: Je höher die zurückgelegte Fahrstrecke im Jahr, desto höher ist die monatlich aufgenommene Energiemenge an den Ladestationen pro Fahrzeug.

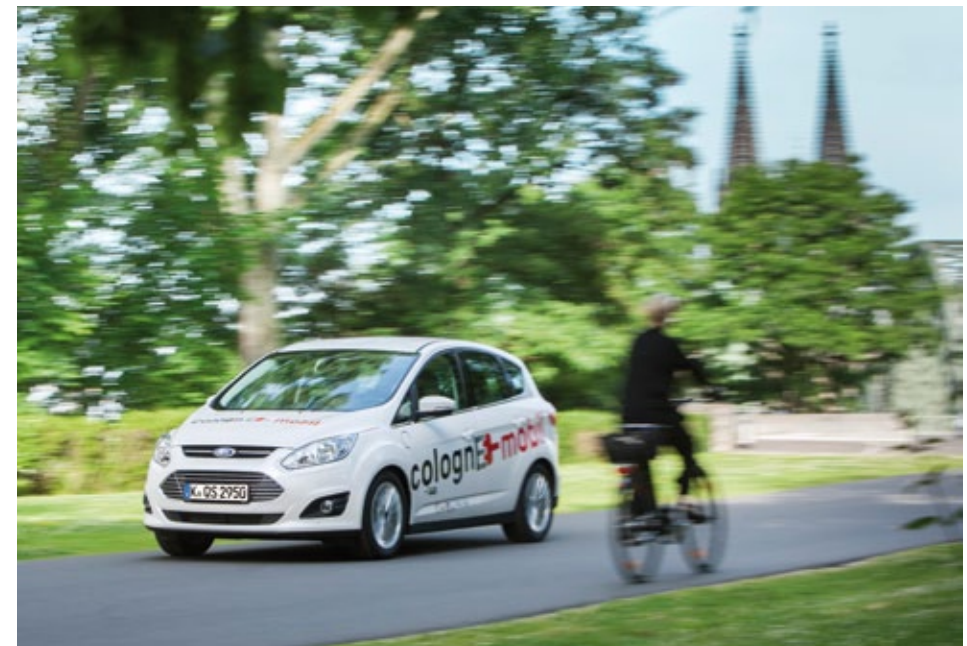
Mit der Anzahl der Tage, an denen Fahrten stattfinden, steigt auch die Anzahl der Tage, an denen geladen wird. Jedoch deuten die niedrigeren Werte für die Ladetage darauf hin, dass nicht an jedem Tag mit Fahrten auch Ladevorgänge erfolgen. Dies ergibt sich unmittelbar aus der Zahl der Ladevorgänge, die mit etwa zwei Ladevorgängen täglich für alle drei Einsatzkontexte im gleichen Bereich liegen. Dagegen unterscheiden sich die täglichen Ladedauern deutlich voneinander. Carsharing-Fahrzeuge werden im Schnitt 22 Stunden geladen, während es bei Firmenflotten- bzw. Privatwagen 3 bzw. 4 Stunden an einem Tag sind. Wie in der Planungskategorie Auslastung ist hier vermutlich die unterschiedliche Erfassungsmethodik für die auffällige Diskrepanz bei einigen Indikatoren ver-

antwortlich. So kommen die hohen Ladedauern für die Carsharing-Fahrzeuge vermutlich daher, dass für diese die Einsteckdauer statt der Ladedauer erfasst wurde. Daher ist auch für diesen Indikator kein direkter Vergleich möglich.

In der ökobilanziellen Auswertung der Betriebsdaten (vgl. Kapitel 3.3.4) wurde eine hohe Auslastung als vorteilhaft für die Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen identifiziert. Bezüglich des Indikators Jahresfahrleistung stellt sich der Einsatz als Carsharing-Fahrzeug mit durchschnittlichen 9.400 km damit am positivsten dar. Gleichzeitig weist der Carsharing-Einsatz die meisten Nutzungstage im Monat auf, was grundsätzlich ebenfalls positiv zu bewerten ist. Die Nutzung über die Woche hinweg ist je nach Einsatzkontext unterschiedlich und deutet darauf hin, dass die Fahrzeuge an einigen Tagen in der Woche weniger ausgelastet sind als an anderen.

Die Gegenüberstellung der exemplarisch ausgewählten Einsatzkontexte im Mini-Segment hat gezeigt, dass sich die Nutzungen je nach Einsatz bezüglich Auslastung und Ladevorgängen voneinander unterscheiden. Die Fahrzeuge sollten zukünftig entsprechend ihrer zu erwartenden Nutzung ausgewählt werden. Darüber hinaus ist die Entwicklung von Konzepten zur Steuerung und Optimierung der Nutzung möglich. So könnte die Auslastung z. B. mit einem Mischkonzept (z. B. Carsharing und Flottennutzung (gewerblich oder kommunal)) maximiert werden.

Die charakterisierten Nutzungsprofile bilden den Durchschnitt der Flottenprojekte der Modellregionen Elektromobilität des BMVI ab. Die Einzelprojekte haben in weiten Teilen individuelle Konzepte zum Einsatz von Elektrofahrzeugen entwickelt und bieten somit noch spezifischere Einblicke in die Nutzungsmöglichkeiten und Potentiale der Elektromobilität. Diesbezüglich sei auch auf die Ergebnisveröffentlichungen der Einzelprojekte verwiesen.



### >> 4.3 AUSGEWÄHLTE PROJEKTBEISPIELE

#### TaxiBot



Modellregion	Rhein-Main
Besonderheiten	Reduzierung von Energieverbrauch und Abgasen, deutlicher Lärmschutz und Mitarbeiterschutz
Fahrzeuge	Insgesamt drei TaxiBot-Flugzeugschlepper
Einsatzkontext	Flughafenabfertigung
Projektlaufzeit	01.01.2013 – 31.05.2016
Weiterführende Informationen	<a href="http://www.e-port-an.com/">http://www.e-port-an.com/</a>

#### Kurzvorstellung

Der TaxiBot ist ein neuartiger, elektrisch/hybrid angetriebener Flugzeugschlepper, der Flugzeuge ohne laufende Triebwerke bis kurz vor die Startbahn ziehen kann. Erst nahe der Startbahn koppelt der Schlepperfahrer den Schlepper ab und der Pilot lässt die Triebwerke an. Dadurch wird Treibstoff gespart und gleichzeitig werden Schadstoff- und Lärmemissionen drastisch reduziert. Gesteuert wird der TaxiBot auf dem Weg zur Startbahn vom Piloten. In Frankfurt setzt Lufthansa den TaxiBot seit Ende 2014 weltweit erstmalig im täglichen Betrieb ein.

#### Erfahrungsschatz: „Lessons learned“ aus dem Projekt

Auffallend positiv sind die Rückmeldungen der Bodenmitarbeiter des Flughafens zum TaxiBot-Betrieb. Geschätzt wird hier sowohl der deutlich niedrigere Geräuschpegel am Fluggastterminal (durch den an die Startbahn verlagerten Triebwerksstart) als auch die merklich verbesserte Luftqualität. Die Fahrer der TaxiBots schätzen zudem das durch den elektrischen Antrieb sehr hohe Drehmoment der Schlepper, welches eine schnellere Durchführung des Pushbacks ermöglicht.

#### colognE-mobil II – Elektromobilitätslösungen für NRW



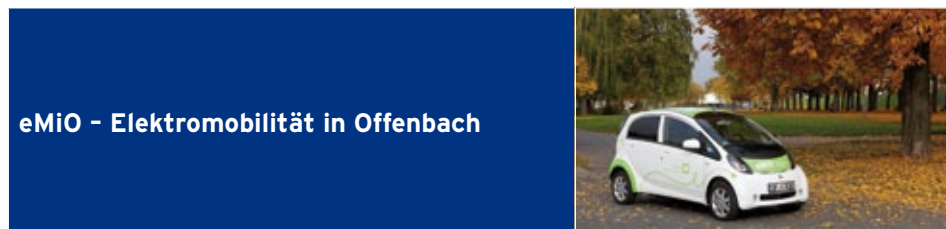
Modellregion	Rhein-Ruhr
Besonderheiten	Eigenstromerzeugung durch Solar-Carports, hohe Laufleistung, große Fahrzeugvielfalt, Anreizsysteme, zweistufige Datenerfassung
Fahrzeuge	Ford Focus Electric, Fusion Energi, C-MAX Energi, Transit Electric, Transit Connect Electric
Einsatzkontext	Privat- und Firmenkunden
Projektlaufzeit	01.07.2012 – 30.06.2015
Weiterführende Informationen	<a href="http://www.cologne-mobil.de">www.cologne-mobil.de</a>

#### Kurzvorstellung

„colognE-mobil – Elektromobilitätslösungen für NRW“ ist das Nachfolgeprojekt von colognE-mobil, das zwischen 2009 und 2011 die Alltagstauglichkeit von batterieelektrischen Fahrzeugen im innerstädtischen Lieferverkehr untersucht hat. Mit dem Folgeprojekt wird der Fokus Elektromobilität um weitere Verkehrsträger bzw. Anwendungen (e-Taxi und e-CarSharing) erweitert. Darüber hinaus wird eine deutlich vergrößerte Fahrzeugflotte von 56 rein batterieelektrischen und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen bei den 13 Partnern im Alltag eingesetzt. Weitere Aspekte der Untersuchung sind neben der Weiterentwicklung einer innovativen Ladeinfrastruktur die Integration regenerativer Energien für Elektrofahrzeuge, die CO<sub>2</sub>-Optimierung von Wegeketten unter Einbeziehung des ÖPNV und des motorisierten Individualverkehrs sowie die Auswirkungen im Ballungsraum Köln in Bezug auf Lärmreduzierung oder Luftverschmutzung.

#### Erfahrungsschatz: „Lessons learned“ aus dem Projekt

- Einsatz einer hohen Anzahl an Elektrofahrzeugen (56) bei gleichzeitig fünf verschiedenen Fahrzeugtypen im gewerblichen, privaten, e-Taxi- und e-Carsharing-Einsatz
- Dichtes Netz an im Projekt errichteten Ladesäulen (insgesamt > 120)
- Hohe Laufleistung: 700.000 km (Ø 12.500 km / Fzg.)
- Vollständig „grüne“ Mobilität durch Eigenstromerzeugung mit Hilfe von 4 Solar Carports
- Korrekturmöglichkeit historischer Datenanalysen durch zweistufiges Erfassungskonzept
- Umfassende Datenvalidierung als Basis für robuste Datenanalysen
- Schaffung von Anreizsystemen zur Erhöhung der Fahrzeuglaufleistung



## eMiO - Elektromobilität in Offenbach

Modellregion	Rhein-Main
Besonderheiten	Stadtfahrten, Integration in den betrieblichen Alltag, breite Fahrzeugpalette
Fahrzeuge	Renault Kangoo Z.E., Mitsubishi MEV, Smart fortwo electric drive, Opel Ampera, BMW i3, VW e-up!, VW e-Golf, Audi A3 e-tron
Einsatzkontext	Firmenflotte
Projektlaufzeit	01.10.2012 - 01.08.2015
Weiterführende Informationen	<a href="https://www.offenbach.de/stadtwerke/microsite/emio/eMiO/index.php">https://www.offenbach.de/stadtwerke/microsite/emio/eMiO/index.php</a>

### Kurzvorstellung

eMiO - Elektromobilität in Offenbach ist ein Projekt der SOH Stadtwerke Offenbach Unternehmensgruppe, das 2013 mit dem Ziel gestartet ist, 40 Elektroautos an Offenbacher Unternehmen, Verbände und Gewerbetreibende zu vermieten und damit der umweltfreundlichen E-Mobilität einen wichtigen Impuls zu geben. Mit Hilfe individueller Leistungspakete und der Förderung des BMVI wurde ein vergleichsweise günstiges und cleveres Einstiegsmodell in die Zukunftstechnologie geschaffen. Die SOH hat hierfür Elektrofahrzeuge geleast und sie zusammen mit einem umfangreichen Service-Paket an interessierte Unternehmen weitergegeben. Das Vermarktungsziel wurde Mitte 2015 erreicht.

### Erfahrungsschatz: „Lessons learned“ aus dem Projekt

Die Erfahrungen aus vorherigen Projekten haben gezeigt, dass neben der „Hürde - Einsatz von neuen Technologien“ insbesondere hohe Anschaffungskosten für Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur eine breitere Einführung von Elektromobilitätslösungen hemmen. An dieser Stelle setzt die Projektidee von eMiO an, indem mit der modellhaften Bereitstellung und Vermietung von E-Fahrzeugen im lokalen Kontext diesen Schwierigkeiten entgegengewirkt wird. Der Best-Practice-Ansatz besteht in der Bündelung von Maßnahmen, um interessierten Kunden ein attraktives Angebot bereitstellen zu können. Das sogenannte eMiO-Inklusiv-Paket umfasst diverse Leistungen wie die Wartung und Inspektion der Fahrzeuge inkl. Reifenwechsel, Vollkaskoversicherung und Schutzbrief, technische und sozialwissenschaftliche Begleitforschung, eine enge Betreuung vor Ort und Schadensmanagement.

## Langstrecken-Elektromobilität (Alltagstauglichkeit von Elektromobilität sowie Langstreckeneignung und -akzeptanz)



Modellregion	Rhein-Ruhr
Besonderheiten	C-Schnellladung, Range-Extender, hohe Fahrleistung, hohe Nutzeranzahl, Vielfahrer, Fahrerschulungen, Hohe Sichtbarkeit
Fahrzeuge	Opel Ampera, Peugeot iOn, Mitsubishi i-MiEV, Think City, German E-Cars Stromos, Fiat 500 EV
Einsatzkontext	Elektromobilität im Langstreckeneinsatz: • Private Nutzung durch Mittel- und Langstreckenpendler • Multimodale Nutzung in Unternehmen
Projektlaufzeit	01.03.2012 - 31.05.2014
Weiterführende Informationen	<a href="http://www.enesys.rub.de/projekte/langstrecken_elektromobilitaet.html">http://www.enesys.rub.de/projekte/langstrecken_elektromobilitaet.html</a>

### Kurzvorstellung

Zwei technische Konzepte zur Überwindung der Reichweitenrestriktion. Die DC-Schnellladung und der Range-Extender-Antrieb, wurden einer bürgernahen Felderprobung unterzogen und hinsichtlich Energieeffizienz und Akzeptanz bewertet. 24 Fahrzeuge wurden Berufspendlern für mehrere Wochen zur Integration in den Alltag zur Verfügung gestellt und in Dienstleistungsbetrieben für dienstliche Zwecke und teilweise auch hier zur Privatnutzung eingesetzt. Insgesamt nahmen so über 500 Testpersonen am Feldtest teil und eine Laufleistung von 785.000 km wurde erreicht.

### Erfahrungsschatz: „Lessons learned“ aus dem Projekt

Beide Fahrzeugtechnologien haben sich im Einsatz bei Pendlern bewährt. Anhand der aufgezeichneten Fahrprofile und Energieverbräuche wurde ein unterschiedliches Nutzungsverhalten bei beiden Fahrzeugtypen festgestellt. Insbesondere Komfortfunktionen werden in reinen Elektrofahrzeugen zugunsten einer höheren Reichweite zurückhaltender genutzt. In begleitenden Befragungen der Testpersonen wurden Defizite und damit auch Potenzial für Forschungsaktivitäten vor allem bei der allgemeinen Dichte und beim Zugang zur Ladeinfrastruktur identifiziert.



Wirtschaft am Strom	
Modellregion	Hamburg
Besonderheiten	Gewerbliche Flotten, Verbrauchsmonitoring, Einsatzpotenziale, Hemmnisse und Chancen
Fahrzeuge	Audi A 3 e-tron, BMW i3 (mit und ohne Range Extender), Mercedes-Benz Vito E-Cell und C 350 e T, smart ed (mit 55 und 60 kW), Mitsubishi i-Miev und Outlander, Nissan Leaf und e-NV200, Peugeot Partner, Renault Fluence, Zoe und Kangoo Z.E., VW e-Golf, e-Up, Golf GTE, Volvo C30 und V 60 Plug-In, Citroen Berlingo
Einsatzkontext	Einsatz in gewerblichen und kommunalen Flotten in 18 Wirtschaftszweigen
Projektlaufzeit	01.09.2012 - 31.09.2016
Weiterführende Informationen	<a href="http://www.elektromobilitaethamburg.de/wirtschaft-am-strom/">http://www.elektromobilitaethamburg.de/wirtschaft-am-strom/</a>
Kurzvorstellung	Ziel des Projekts ist die Abschätzung der Potentiale von batterieelektrischen Fahrzeugen im städtischen Wirtschaftsverkehr anhand von praktischen Erfahrungen, subjektiven Einschätzungen und objektiven Gegebenheiten. Dafür werden in der Stadt Hamburg und in der Metropolregion bereits heute mehr als 700 meist rein-elektrische PKW in über 350 Flotten unterschiedlicher Größe im gewerblichen und kommunalen Wirtschaftsverkehr eingesetzt.
Erfahrungsschatz: „Lessons learned“ aus dem Projekt	Von diesen Fahrzeugen wurden mehr als 130 Fahrzeuge mit einem Datenlogger ausgestattet, um tiefergehende Analysen der Nutzungsmuster, der Einflussgrößen auf den Energieverbrauch und damit auf die Einsatzfähigkeit von batteriebetriebener Fahrzeugen zu erlangen. Diese Daten werden anhand von Informationen aus einer umfangreichen Erhebung der teilnehmenden Unternehmen gespiegelt. Zudem erfolgen Tiefeninterviews mit Nutzern und Entscheidern dieser Fahrzeuge, um das Spektrum an Kriterien für und gegen den Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen besser verstehen und entsprechende Handlungsempfehlungen ableiten zu können. Dafür wird zusätzlich am Projekt auch an alternativen Geschäftsmodellen sowie an der Demonstration innovativer Ladeinfrastruktur- und Netzlastmanagementlösungen gearbeitet.



eMERGE	
Modellregion	Rhein/Ruhr & Berlin/Brandenburg
Besonderheiten	Gesteuertes Laden, Bedarfsermittlung, Ladesäulenreservierung, Flottenversuch
Fahrzeuge	146 smart fortwo electric driven
Einsatzkontext	Privat- und Firmenkunden
Projektlaufzeit	01.07.2012 - 30.06.2015
Weiterführende Informationen	<a href="http://www.emerge-projekt.de/">http://www.emerge-projekt.de/</a>
Kurzvorstellung	Der breit angelegte Feldversuch im Rahmen des eMERGE-Projekts gibt nicht nur Aufschluss über Nutzerverhalten und Technik von E-Autos; untersucht wurden auch intelligente Ladesysteme zur Verbesserung der Stromnetzauslastung sowie unterschiedliche Preissysteme im Hinblick auf die Kundenakzeptanz. Mit Hilfe von Verkehrsmodellen haben die Projektpartner den Bedarf öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur überprüft.
Erfahrungsschatz: „Lessons learned“ aus dem Projekt	Nach über einer Million Kilometern in zwei Jahren von Mai 2013 bis Juni 2015 ist der Elektroauto-Praxistest eMERGE abgeschlossen. Teilnehmer des Projekts waren Privat- und Geschäftskunden mit 146 smart fortwo electric driven aus Berlin, Potsdam und Nordrhein-Westfalen. Einige davon erzielten dabei Rekorde: Der niedrigste durchschnittliche Energieverbrauch über ein Jahr lag bei 10,4 kWh/100 km, die höchste Reichweite bei 161 Kilometern. Zertifiziert ist der smart fortwo electric driven mit einem Verbrauch von 16,3 kWh/100 km und 145 Kilometern Reichweite.





## >> 5 SZENARIEN

Weil die Bereitstellungsart des bezogenen Ladestroms eine hohe Relevanz für die Ökobilanz von Elektrofahrzeugen hat, wird im Folgenden der Einfluss der zukünftigen Entwicklung des Umweltprofils des deutschen Netzstrommix und des Ökostrommix untersucht. Grundlage für die Berechnung der Ökobilanzszenarien sind die Langfristszenarien des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland [4]. Das darauf aufbauende Szenario dient der Einschätzung der Größenordnung des Einsparpotenzials der verkehrsbedingten Treibhausemissionen durch den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV) gegenüber verbrennungsmotorischen Fahrzeugen.

### >> 5.1 ENTWICKLUNG DES ZUKÜNFTIGEN MIX BEI DER STROMERZEUGUNG IN DEUTSCHLAND

#### >> 5.1.1 ANNAHMEN

Die Entwicklung des deutschen Netzstrommix basiert auf dem Szenario 2011 A der BMUB Leitstudie 2011 [4]. Ziel der Studie war die Erarbeitung von Leitszenarien, aus denen sich Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien unter Berücksichtigung energiepolitischer Rahmenbedingungen, Versorgungssicherheit und internationale Konvergenz ableiten lassen. Nach [4] ist für die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieerzeugung eine Reduktion von mindestens 85 % bis hin zu einer emissionsfreien Energieversorgung erforderlich, um die gesetzten Ziele zu erreichen.

Im Mittelpunkt der Szenarien stehen Fragestellungen der Entwicklung des Ausbaus an erneuerbaren Energien (EE) bis hin zur Umstellung auf EE und der Steigerung der Energieeffizienz von Kraftwerken. Die festgelegten Ziele der Energiewende beschreiben hierfür die Rahmenbedingungen. Ausgehend von diesen Zielen werden die notwendigen Entwicklungen und strukturellen Veränderungen in der Energiebereitstellung und mögliche Strategien unter Berücksichtigung der technisch-strukturellen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen und politischen Aspekte beschrieben.

Die wichtigsten Eckpunkte der Szenarien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Reduktion der Treibhausgas-Emissionen um mindestens 80 % bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 1990
- Verringerung des Stromverbrauchs um 25 % bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Endenergieverbrauch im Jahr 2008
- Kernenergieausstieg bis zum Jahr 2020

Zur Kompensation der Kernenergie erfolgen in den Folgejahren eine stärkere Nutzung von Erdgaskraftwerken sowie eine Steigerung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Insbesondere wird der Ausbau von Windkraft vorangetrieben. Neben dem deutschen Netzstrommix werden Szenarien zur Entwicklung des deutschen Ökostrommix untersucht. Hierfür wird die Verteilung der Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien aus dem Strommix Deutschland zugrunde gelegt und entsprechend skaliert.

#### >> 5.1.2 ERGEBNISSE DER STROMMIX-SZENARIEN

In Abbildung 5.1 sind die Ergebnisse der Strommix-Szenarien des deutschen Strommix und des Ökostrommix für den Zeitraum 2015 - 2050 am Beispiel des Treibhauspotenzials dargestellt.

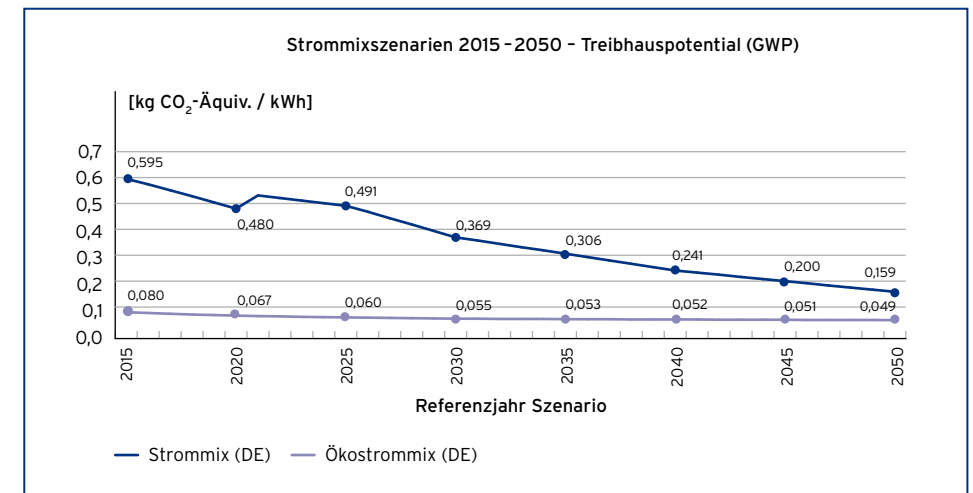


Abbildung 5.1: Entwicklung Strommix DE und Ökostrommix 2015-2050 (Treibhauspotenzial)

Langfristig sind auf Basis der hinterlegten Szenarien, vor allem durch den verstärkten Ausbau der Stromerzeugung aus Windkraft, bis zum Jahr 2050 deutliche Verringerungen des Treibhauspotenzials möglich. Beim deutschen Netzstrommix ist in den Bezugsjahren 2020 und 2021 ein sprunghafter Anstieg erkennbar. Dieser resultiert aus dem Kernenergieausstieg

im Jahr 2020, welcher zu höheren Anteilen fossiler Stromerzeugung, überwiegend Erdgas, im Stromerzeugungsmix und damit einhergehend zu einem leichten Anstieg des Treibhauspotenzials führte. Bis zum Jahr 2025 werden die Kapazitäten der fossilen Kraftwerke zurückgefahren und die Anteile der EE-Stromerzeugung weiter ausgebaut, was zu einer Verringerung des Treibhauspotenzials der Stromerzeugung führt. Bis zum Jahr 2030 lassen sich damit die Treibhausgas-Emissionen von ca. 600 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh auf ca. 370 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh absenken. Bis zum Jahr 2050 ist durch den starken Ausbau der erneuerbaren Energien, vor allem der Windkraft, eine Reduzierung des Treibhauspotenzials der Stromerzeugung auf ca. 160 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh möglich.

Für den deutschen Ökostrommix ergibt sich unter Annahme der gleichen Verteilung an EE-Kraftwerken für das Jahr 2015 ein Treibhauspotenzial von ca. 80 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh. Bis zum Jahr 2030 kann das Treibhauspotenzial auf ca. 55 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh gesenkt werden. Durch den steigenden Anteil der Stromerzeugung aus Windkraft im Ökostrommix kann bis zum Jahr 2050 ein Treibhauspotenzial der EE-Stromerzeugung von ca. 50 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh erreicht werden.

### >> 5.1.3 ERGEBNISSE AUF FAHRZEUGEBOENE 2015 / 2030

Der Einfluss der Strommix-Entwicklung auf die Ökobilanz von Elektrofahrzeugen ist in Abbildung 5.2 für das Treibhauspotenzial der BEV und PHEV im Kompaktwagensegment dargestellt.

Für die Szenarien 2015 und 2030 wird eine dynamische Berechnung des Umweltprofils der Stromerzeugung über die Fahrzeugnutzungsdauer von 12 Jahren zugrunde gelegt. Das Treibhauspotenzial der Nutzungsphase des Szenarios 2030 berechnet sich somit über die Stromerzeugungsmixe der Jahre 2030–2041. Im Mittel liegt das Treibhauspotenzial des deutschen Stromerzeugungsmix im Szenario 2015 bei ca. 520 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh und im Szenario 2030 bei ca. 300 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh. Zur Berechnung werden die Energieverbrauchswerte der Betriebsdatenerfassung (vgl. Kapitel 3.2.5) und eine gleichmäßige Laufleistung von 150.000 km verteilt über 12 Jahre angesetzt.

Die Ergebnisse für das BEV der Kompaktklasse zeigen, dass sich das Treibhauspotenzial der Kompakt BEV durch den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromerzeugungsmix im Szenario 2030 um ca. 8 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. gegenüber dem Szenario 2015 absenken lässt. Im Szenario 2030 kann die Klimabilanz der BEV durch den Bezug von Lade-

strom aus dem deutschen Ökostrommix im Vergleich zum Netzstrommix-Bezug noch weiter abgesenkt werden, von ca. 20 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. (Strommix DE) auf ca. 11,5 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. (Ökostrommix DE).

Beim Treibhauspotenzial und beim Primärenergiebedarf liegt das Reduktionspotenzial gegenüber dem Bezugsjahr 2015 zwischen 28 % (Strommix DE, 2030–2041) und 59 % (Ökostrommix-Szenarien). In den weiteren untersuchten Wirkungskategorien AP, EP und POCP fallen die Reduktionspotenziale geringer aus und liegen je nach Wirkungskategorie und Strommix-Szenario zwischen ca. 3 und 24 %.

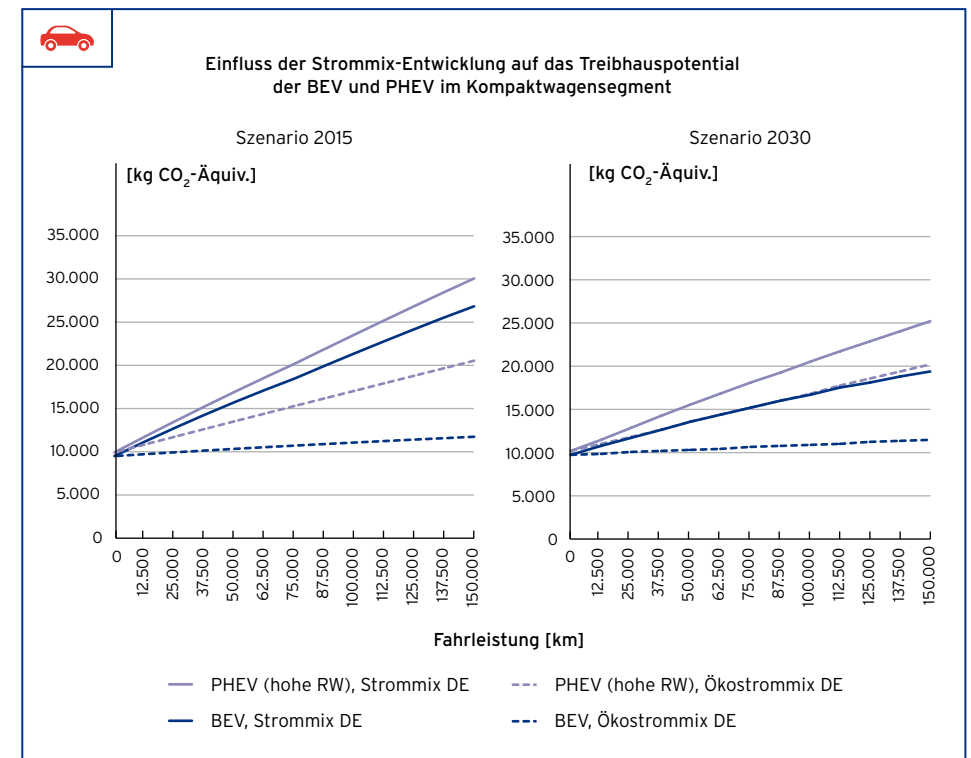


Abbildung 5.2: Einfluss der Strommix-Entwicklung auf das Treibhauspotenzial der BEV und PHEV im Kompaktwagensegment

Beim untersuchten Plug-In-Hybrid aus dem Kompaktwagensegment (Batteriekapazität >10 kWh, hohe elektrische Reichweite) lassen sich im Szenario 2030 durch den Ausbau der erneuerbaren Energien im Netzstrommix Verringerungen von ca. 5 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. gegenüber dem Szenario 2015 erzielen. Auch beim PHEV besteht im Szenario 2030 viel Spielraum, um das Treibhauspotenzial durch den Bezug von Ökostrom anstelle von Strom aus dem deutschen Netzstrommix weiter zu senken.

Das mögliche Reduktionspotenzial liegt in den Wirkungskategorien Treibhauspotenzial und Primärenergiebedarf je nach Strom-Szenario bei ca. 15–33 %. In den weiteren Wirkungskategorien, AP, EP und POCP, liegen die Reduktionspotenziale zwischen 2 % und 14 %.

>> 5.1.4 EINSARPOTENZIALE DURCH DEN MARKTHOCHLAUF DER ELEKTROFAHRZEUGE

Aufbauend auf den Ergebnissen der Stromerzeugungsszenarien folgt eine grobe Einschätzung der Größenordnung der Einsparpotenziale im Treibhauspotenzial, die sich durch den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen für die Bezugsjahre 2020 und 2030 ergeben. Hierzu werden die Ökobilanzergebnisse der Referenzfahrzeuge (Kapitel 3.1) und der Strommix-Szenarien (Kapitel 5.1) mit den Annahmen eines bestehenden Flottenszenarios verknüpft. Die Berechnung der Szenarien erfolgt für die angestrebten Stückzahlen elektrifizierter Fahrzeugkonzepte gemäß der Ziele des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität mit einem Bestand von 1 Million Fahrzeuge im Jahr 2020 und 6 Millionen im Jahr 2030. Die Untersuchung beschränkt sich zudem auf Fahrzeuge des Mini-, Kleinwagen- und Kompaktwagensegments, wodurch es zu geringeren Summen der Fahrzeugstückzahlen innerhalb der Szenarien kommt.

>> 5.1.4.1 ANNAHMEN ZUM FAHRZEUGBESTAND IM SZENARIO 2020 UND 2030

Als Grundlage für die Verteilung der Elektrofahrzeuge nach Fahrzeugsegment und Antriebskonzept (BEV, PHEV) sind die Flottenszenarien der Studie des Büro für Technikfolgen-Abschätzung des Deutschen Bundestags (TAB) [42] hinterlegt. Zusätzlich wird eine weitere Verteilung der Elektrofahrzeuge gemäß der KBA-Segmente anhand der Neuzulassungen im Jahr 2014 [32] vorgenommen. Um die Einsparpotenziale durch den weiteren Ausbau des Elektrofahrzeugmarkts abzuschätzen, wird angenommen, dass jedes neu zugelassene Elektrofahrzeug ein Fahrzeug mit verbrennungsmotorischem Antrieb aus dem jeweiligen Segment ersetzt. Das Einsparpotenzial im Treibhauspotenzial wird anschließend über die Differenz der Wirkungen des Elektrofahrzeugs zum konventionellen Fahr-

zeug (Diesel oder Benziner) berechnet. Die Verteilung der Benzin- und Dieselfahrzeuge innerhalb eines Segments basiert auf KBA FZ14 [32].

Die Annahmen zu den Fahrzeugstückzahlen der BEV und PHEV in den untersuchten Fahrzeugsegmenten sowie die potentiell substituierten konventionellen Fahrzeuge je Segment sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.



Annahmen des Flottenszenarios							
		Szenario 2020			Szenario 2030		
		BEV/PHEV	Substituierte Benziner	Substituierte Diesel	BEV/PHEV	Substituierte Benziner	Substituierte Diesel
		Anzahl Fahrzeuge [Stk.]					
	Minis BEV	152.000	149.010	2.990	640.000	627.412	12.588
	Klein/Kompakt BEV	229.000	154.760	74.240	1.730.000	1.169.147	560.853
	Klein/Kompakt PHEV	482.000	325.739	156.261	2.370.000	1.601.664	768.336
	Gesamt	863.000			4.740.000		

Tabelle 5.1: Annahmen der Szenarien zur Berechnung der Einsparpotenziale durch den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen

Die Berechnung der Szenarien erfolgt für eine Nutzungsdauer von 12 Jahren mit einer Gesamtfahrleistung der Fahrzeuge von 150.000 km. Neben den Annahmen zur Entwicklung der Fahrzeugflotten werden die in Kapitel 5.1 vorgestellten Strommix-Szenarien hinterlegt. Weitere Einflussfaktoren wie die Veränderung der Umweltprofile der Kraftstoffherzeugung, Fahrzeugherstellung und des Lebensendes sowie der Fahrzeugkennwerte wie Energie- oder Kraftstoffverbrauch bleiben unberücksichtigt.

>> 5.1.4.2 ERGEBNISSE

Wie bereits die Ergebnisse aus Kapitel 3.1 und 3.3 verdeutlicht haben, ist die Höhe der möglichen Einsparpotenziale durch den Ersatz eines Benzin- oder Dieselfahrzeugs durch ein BEV oder PHEV stark von der tatsächlichen Fahrleistung der Fahrzeuge im Einsatz-

kontext abhängig, sodass hohe Auslastungen der Elektrofahrzeuge erreicht werden sollten, um die höheren Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung zu kompensieren. Die berechneten Einsparpotenziale der Treibhausgas-Emissionen innerhalb der Szenarien 2020 und 2030 unter Annahme einer Gesamtfahrleistung von 150.000 km sind in Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 dargestellt.

Hierbei ist zu beachten, dass sich die Fahrzeuganzahlen in den Szenarien 2020 und 2030 deutlich unterscheiden. Im Szenario 2020 liegt die angenommene Anzahl an BEV und PHEV über die betrachteten Segmente bei insgesamt 863.000 Fahrzeugen. Die angenommene Fahrzeuganzahl im Szenario 2030 beträgt 4,74 Mio. Fahrzeuge. Somit sind im Szenario 2030 aufgrund der höheren Zahl an Fahrzeugen und des veränderten Strommix DE deutlich höhere Einsparungen im Treibhauspotenzial möglich.

Unter den getroffenen Annahmen sind über die Fahrzeugnutzungsdauer von 12 Jahren im Szenario 2020 (0,86 Mio. Fahrzeuge) Einsparpotenziale durch die Substitution konventioneller Fahrzeuge durch BEV und PHEV von ca. 6,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv./12 Jahre (Strommix DE) bis ca. 12 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv./12 Jahre (Ökostrommix DE) möglich. Das jährliche Einsparpotenzial liegt bei ca. 564.000 t CO<sub>2</sub>-Äquiv./Jahr (Strommix DE) bzw. ca. 996.000 t CO<sub>2</sub>-Äquiv./Jahr (Ökostrommix DE).

Im Szenario 2030 (4,74 Mio. Fahrzeuge) liegt das Einsparpotenzial über die Fahrzeugnutzungsdauer bei ca. 49 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv./12Jahre (Strommix DE) bzw. ca. 68 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv./12 Jahre (Ökostrommix DE). Das jährliche Einsparpotenzial liegt im Szenario 2030 bei ca. 4,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv./Jahr (Strommix DE) bzw. ca. 5,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv./Jahr (Ökostrommix DE).

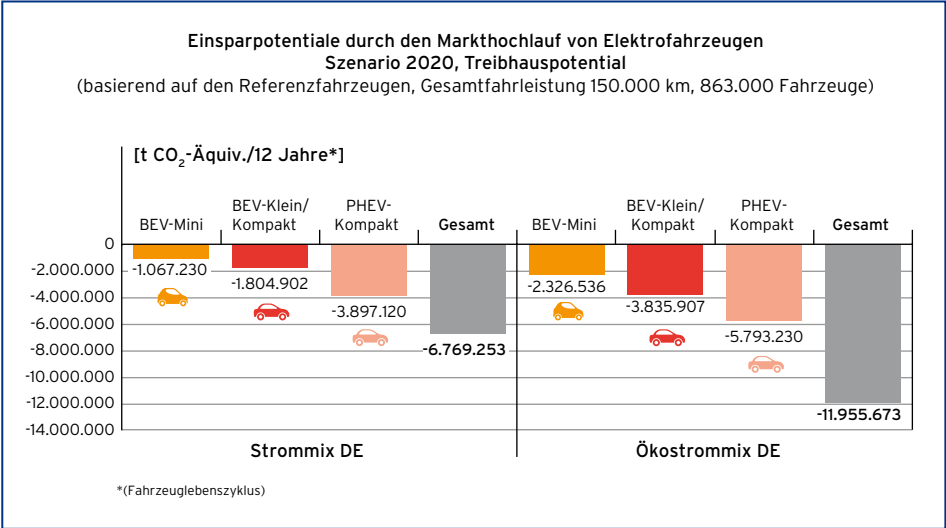


Abbildung 5.3: Einsparpotenzial durch Markthochlauf von Elektrofahrzeugen im Szenario 2020

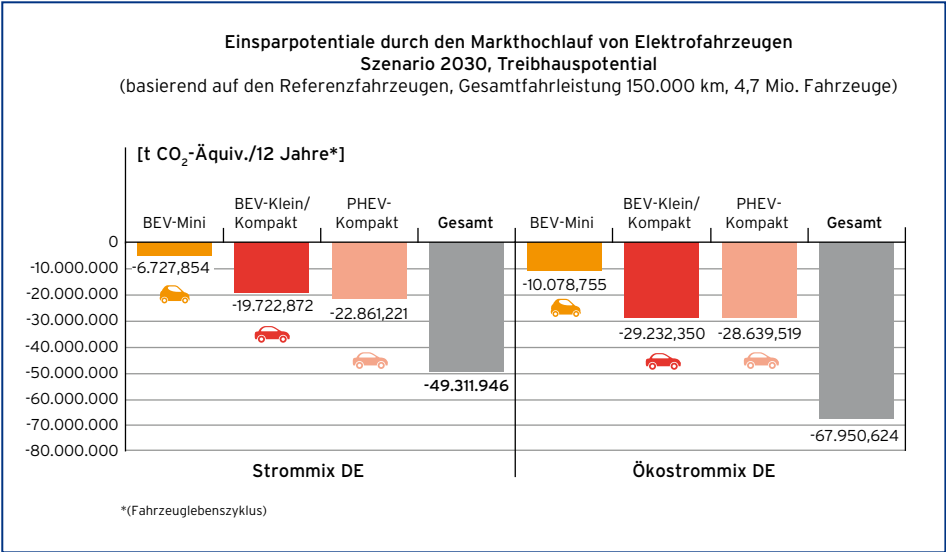


Abbildung 5.4: Einsparpotenzial durch Markthochlauf von Elektrofahrzeugen im Szenario 2030

Um die ermittelten Einsparpotenziale einzuordnen, werden diese den Treibhausgas-Emissionen in Deutschland im Jahr 2013 gegenübergestellt, die nach UBA [45][46] in Abbildung 5.5 dargestellt sind. Der deutsche PKW-Bestand lag zwischen 43 und 44 Mio. Fahrzeugen für das Jahr 2013 [34][35].

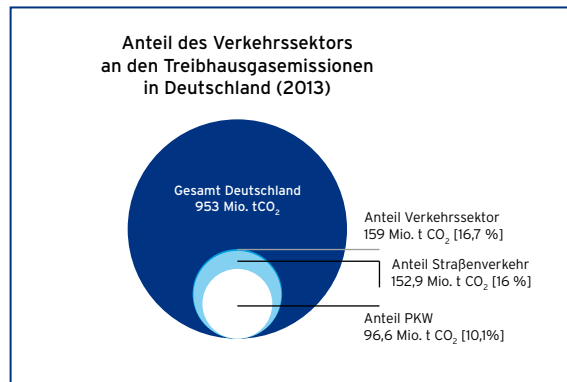


Abbildung 5.5: Anteil des Verkehrssektors an den Treibhausgas-Emissionen in Deutschland (2013) nach [45][46]

Unter den Annahmen des Szenarios 2020 (863 Tsd. Fahrzeuge, ca. 2 % des Fahrzeugbestands 2013) und dem deutschen Netzstrommix als Ladestrom lassen sich Einsparungen von 564.000 t CO<sub>2</sub>-Äquiv./Jahr durch die Substitution von konventionellen Fahrzeugen durch BEV und PHEV erreichen. Dies entspricht etwa 0,6 % der Treibhausgas-Emissionen der PKW des Jahres 2013. Wird der deutsche Ökostrommix als Ladestrom hinterlegt, liegt das Einsparpotenzial bei ca. 996.000 t CO<sub>2</sub>-Äquiv./Jahr, etwa 1 % der Treibhausgas-Emissionen der PKW im Jahr 2013.

Im Szenario 2030 (4,74 Mio. Fahrzeuge, ca. 11 % des Fahrzeugbestands 2013) können unter Verwendung des deutschen Strommix ca. 4,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv./Jahr eingespart werden. Dies entspricht ca. 4,3 % der Treibhausgas-Emissionen der PKW im Jahr 2013. Unter Verwendung des deutschen Ökostrommix als Ladestrom liegt das Einsparpotenzial sogar bei ca. 5,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv./Jahr, bzw. etwa 5,9 % der Treibhausgas-Emissionen der PKW.

Hierbei ist zu beachten, dass die in dieser Studie ermittelten Einsparpotenziale den gesamten Fahrzeuglebenszyklus inklusive Herstellung und Lebensende mitberücksichtigen, während die berichteten Treibhausgas-Emissionen des UBA lediglich auf Basis der Nutzungsphase ermittelt werden. Somit lassen sich diese Werte nicht direkt vergleichen und dienen ausschließlich der groben Einordnung der Größenordnung des Einsparpotenzials. Die Ergebnisse der Szenarien zeigen jedoch, dass mittelfristig nur dann eine signifikante Einsparung im Treibhauspotenzial im PKW-Verkehr erreicht werden kann, wenn eine hohe Durchdringung von Elektrofahrzeugen im PKW-Bereich erfolgt. Zusätzlich zeigt sich, dass auch zukünftig der bezogene Ladestrommix von hoher Relevanz ist. Durch den Einsatz von Ökostrom lassen sich im Szenario 2030 bei einem Elektrofahrzeuganteil von ca. 11 % an der gesamten PKW-Flotte Einsparungen im Treibhauspotenzial von rund 6 % erreichen, unter der Voraussetzung, dass die neu zugelassenen Elektrofahrzeuge konventionelle Fahrzeuge im jeweiligen Fahrzeugsegment ersetzen. Zudem muss der bezogene Ökostrom aus zusätzlich installierten Quellen erzeugt werden, sodass dieser nicht dem Netzstrommix entzogen wird und sich dadurch lediglich eine Verlagerung der Umweltwirkungen über die verschiedenen Sektoren ergeben.

Die Szenarien dieser Studie basieren auf der Annahme einer Gesamtfahrleistung der Fahrzeuge von 150.000 km. Wie aus den Ergebnissen in 3.1.1 ersichtlich wird, kann sich das Einsparpotenzial der elektrischen Fahrzeuge gegenüber den konventionellen Fahrzeugen bei geringeren Fahrleistungen deutlich verringern. Das bestätigt die Aussagen aus Kapitel 3.3.4, dass Elektrofahrzeuge vornehmlich dort eingesetzt werden sollten, wo hohe Fahrleistungen gewährleistet werden bzw. aufgrund der unterschiedlichen Charakteristika der elektrischen und verbrennungsmotorischen Antriebe signifikante Verringerungen im Energieverbrauch erreicht werden können.

## >> 6 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

Zum Stand 30. September 2015 lagen Betriebsdaten von insgesamt 735 Elektro-Fahrzeugen vor. Damit wurde die anvisierte Zielgröße der Datenerfassung von insgesamt rund 800 Fahrzeugen im vorliegenden Berichtszeitraum zu über 90 % erreicht. Bereits im September 2014 wurde mit rund 500 Fahrzeugen die Zahl der erfassten Fahrzeuge im Vergleich zum vorhergehenden Forschungszeitraum im Förderschwerpunkt Modellregionen Elektromobilität (345 Fahrzeuge, 2010–2011) übertroffen.

Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen konnten zusätzlich die Segmente Kleinwagen, Kompaktwagen und Lieferwagen, bei den Plug-In-Hybridfahrzeugen die Segmente Mini-Vans und Oberklasse spezifisch ausgewertet werden. Die differenzierte Auswertung nach Einsatzkontexten konnte dadurch neben den Minis auf das Segment Kompaktklasse ausgeweitet werden. Durch die Erweiterung der Datenbasis konnten zudem für verschiedene Segmente Aussagen über die Ladeverluste im Praxisbetrieb getroffen und der Einfluss verschiedener Parameter auf den Energieverbrauch untersucht werden.

Als wichtigstes Kriterium für die Praxistauglichkeit der eingesetzten E-Fahrzeuge wurde deren Auslastung in Form der Fahrleistung identifiziert. Zudem hat die erreichbare Fahrleistung im Einsatzkontext einen entscheidenden Einfluss auf die Umweltbewertung der Fahrzeuge in der Nutzungsphase. Auch zum aktuellen Datenstand liegen die mittleren Jahresfahrleistungen der elektrisch angetriebenen PKW- und Nutzfahrzeug-Segmente mit 4.600 bis 11.900 km noch unter dem bundesdeutschen Durchschnitt der privat genutzten Fahrzeuge [17]. Anhand der maximal zurückgelegten monatlichen Distanzen ließ sich erkennen, dass dies nicht auf die Reichweiten der Fahrzeuge zurückzuführen ist, da in fast allen Segmenten und Einsatzkontexten Fahrleistungen von über 1.000 km/Monat problemlos erreicht wurden.

Neben der zurückgelegten Fahrstrecke ist der Energieverbrauch der Fahrzeuge von entscheidender Bedeutung – und zwar sowohl für deren Praxistauglichkeit und Leistungsfähigkeit als auch für die Ökobilanz. Unter den realen Nutzungsbedingungen lag der Energieverbrauch bei den PKW zwischen 14,2 (Minis BEV) und 20,5 kWh/100 km (Mini-Vans PHEV) und etwa 23 (Kastenwagen) bzw. 32 kWh/100 km (LKW) bei den Nutzfahrzeugen. Die im Zwischenbericht vorgestellte Temperaturabhängigkeit des Verbrauchs wurde in den Analysen für weitere Modelle bestätigt. Für PHEV-Fahrzeuge zeigte sich diese Temperaturabhängigkeit vor allem bei den rein elektrischen Fahrten.

Hinsichtlich des Ladeverhaltens bestätigten sich die Ergebnisse des Zwischenberichts, nämlich dass batterieelektrische Fahrzeuge überwiegend bei noch weitgehend voller Batterie erneut geladen werden und die Batteriekapazität daher in der Regel bei Weitem nicht ausgeschöpft wird. Bei Plug-In-Hybriden erfolgt die Ladung dagegen häufig bei deutlich geringeren SOC-Werten. Fahrer von BEV achten stärker auf den Batterieladestand bei Fahrtbeginn, während der in vielen Fällen niedrige Batterieladestand der PHEV bei Fahrtbeginn darauf hindeutet, dass es für die Fahrer aufgrund ihrer Antriebsalternative weniger relevant ist, ob die Batterie für die geplante Fahrt ausreichend geladen ist. Bei beiden Antriebskonzepten wird die Batterie bei Ladevorgängen in der Regel vollgeladen.

Die Auswertungen zeigen, dass die Anforderungen an die Reichweite, die sich aus dem bundesdeutschen Durchschnitt [17] ergeben, in vielen Fällen durch die Fahrleistungen der eingesetzten Elektrofahrzeuge erfüllt werden und die Fahrzeuge somit bereits heute eine hohe Praxistauglichkeit aufweisen. Dies wird insbesondere bei der Betrachtung der Fahrdistanzen pro Fahrt ersichtlich. Im Bundesdurchschnitt sind über 80 % der Fahrten kürzer als 20 km [17], sodass die derzeit gegebene Reichweite auch für mehrere Fahrten ausreicht. Die Ladedaten bestätigen die in aller Regel noch vorhandene hohe Restkapazität der Batterie beim Ladevorgang, womit ein erheblicher Spielraum für die Bewältigung längerer Fahrdistanzen mit Elektrofahrzeugen besteht. Eine intensiviertere Nutzung von Elektrofahrzeugen und deren stärkere Marktdurchdringung sind nach den vorliegenden Ergebnissen daher bereits mit den heute verfügbaren Fahrzeugen möglich.

Die in der Praxis auftretenden Ladeverluste wurden anhand eines Vergleichs von Fahr- und Ladedaten zweier Fahrzeugmodelle ermittelt und liegen bei 9 % bzw. 13 % (von der Ladepunkt bis zum Antriebsstrang). Dies ist deutlich weniger als vielfach in der Literatur angegeben und liegt unter den aus Konsistenzgründen angenommenen 20 % der Ökobilanzuntersuchung. Die große Spannweite der fahrzeugindividuellen Ergebnisse von 1–33 % weist jedoch auf den weiterhin bestehenden Forschungsbedarf hin.

Neben der Bewertung der Praxistauglichkeit und der Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge stand die Bewertung der Umweltauswirkungen der Elektromobilität mittels Ökobilanzen im Fokus der Untersuchung.



Da keine Langzeitdaten von konventionellen Fahrzeugen unter direkt vergleichbaren Nutzungsbedingungen vorlagen, war keine vergleichende Analyse der Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen auf Basis von Betriebsdaten möglich. Daher wurde ein Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen auf Basis der NEFZ-Werte bei der Fahrzeugkonzepte durchgeführt. Die Analyse der Fahrzeugmodelle in der Mini- und Kompaktklasse zeigt, dass sich die Fahrzeuge eines Segments in ihren Fahrzeugauslegungen, der Dimensionierung der Antriebskomponenten und ihrem Energieverbrauch deutlich unterscheiden können. Wie am Beispiel der Bandbreiten des verbrauchsärmsten und verbrauchsstärksten Fahrzeugs in Kapitel 3.1 dargestellt wurde, ergeben sich dadurch in der Umweltbilanz der Fahrzeugmodelle Bandbreiten von bis zu 30 %.

Es zeigt sich, dass die verursachten Umweltwirkungen der Herstellungsphase von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor deutlich höher ausfallen. In der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial sind beispielsweise um über 60 % (BEV) höhere Ergebnisse zu verzeichnen. Das Batteriesystem stellt hierbei die Schlüsselkomponente dar. Im Vergleich zum restlichen Fahrzeug werden im Batteriesystem verstärkt High-Tech-Werkstoffe eingesetzt (z.B. die Aktivmaterialien der Kathode und Anode), welche mit vergleichsweise hohen Umweltwirkungen im Rohstoffabbau und in der Herstellung verbunden sind. Die hohen Beiträge der Herstellungsphase lassen sich über den Lebenszyklus durch geringere Umweltwirkungen in der Nutzungsphase kompensieren. Für BEV-Kompaktwagenfahrzeuge ergeben sich beispielsweise unter Annahme des aktuellen deutschen Strommix bereits nach einer Gesamtfahrleistung von etwa 60.000 km geringere Treibhauspotenziale gegenüber Benzinfahrzeugen und ab etwa 125.000 km gegenüber Dieselfahrzeugen. Bei PHEV liegen diese Break-Even-Punkte bei etwa 25.000 km und 60.000 km und werden somit deutlich früher erreicht.

Da die Ökobilanz der Nutzungsphase stark vom Umweltprofil des bezogenen Ladestroms abhängig ist, muss sichergestellt werden, dass die Fahrzeuge mit einem Ladestrom mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien versorgt werden, was in dieser Studie am Beispiel des deutschen Ökostrommix dargestellt wird. Bei beiden Antriebsarten kann der Break-even zu konventionellen Fahrzeugen unter Verwendung von Ökostrom bereits nach Laufleistungen von unter 40.000 km erreicht werden. Die Szenario-Analyse zur Entwicklung des deutschen Netzstrommix zeigt, dass sich die Umweltwirkungen der Stromerzeugung durch die fortschreitende Energiewende weiter verringern lassen. Somit kann zukünftig auch unter Verwendung des deutschen Netzstrommix eine deutliche Verbesserung erreicht werden, vor allem in der Klimabilanz der Fahrzeuge. Gleichzeitig zeigen die Szenarien,

dass auch weiterhin der größte ökologische Mehrwert durch den Bezug von Ladestrom aus erneuerbaren Energien erreicht werden kann.

Bei den PHEV der Kompaktklasse verliert das Batteriesystem aufgrund der geringeren Auslegung der Speicherkapazität im Vergleich zu den BEV in der Herstellungsphase an Relevanz, wobei auch bei den PHEV die Ergebnisse der Herstellungsphase im Treibhauspotenzial knapp 30 % höher sind als bei konventionellen Fahrzeugen. Allerdings zeigt sich bei den PHEV die hohe Komplexität einer realitätsnahen Berechnung der Umweltwirkungen der Nutzungsphase. Durch die Verteilung der Betriebsmodi der Hybridfahrzeuge, der Fahrsituationen im Realbetrieb und aufgrund der spezifischen Betriebsstrategien der Fahrzeugmodelle können die Ökobilanzergebnisse unter Betrachtung realer Rahmenbedingungen und Einsatzgebiete stark von den Ergebnissen auf Basis des NEFZ abweichen.

Somit sind genauere Analysen unter den spezifischen Rahmenbedingungen und Nutzungsprofilen der untersuchten Einsatzkontexte notwendig, um belastbare Aussagen über die Umweltprofile treffen zu können. Die Ergebnisse der Langzeitdatenerfassung haben zudem ein dynamisches Zusammenspiel einer Vielzahl von Einflussfaktoren aufgezeigt, welches auf eine große Bandbreite an möglichen Umweltprofilen von Elektrofahrzeugen schließen lässt. So variiert beispielsweise das Treibhauspotenzial von PHEV Fahrzeugen der Kompaktklasse pro Fahrkilometer abhängig von der tatsächlich erreichten Lebenslaufleistung, dem elektrischen Fahranteil und dem verwendeten Strommix in verschiedenen Einsatzkontexten zwischen 210 und 236 g CO<sub>2</sub>/km. Für die Umweltanalyse von Elektromobilitätskonzepten steigt damit die Komplexität. Entsprechend lassen sich keine pauschalen Aussagen hinsichtlich der Ökobilanz der Elektrofahrzeuge eines Segments treffen, sondern lediglich Tendenzen aufzeigen. Für belastbare Einschätzungen der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen sind Detailuntersuchungen der jeweiligen, spezifischen Fahrzeugauslegungen und Einsatzkontexte unter Berücksichtigung der spezifischen Nutzungsbedingungen und technischen Anforderungen vorzuziehen.

Für eine aus ökologischer Sicht optimale Dimensionierung, Auswahl und Auslastung von Elektrofahrzeugen ist es zukünftig wichtig, Abhängigkeiten von Nutzerverhalten besser zu verstehen. Die Datenbasis der Umweltbegleitforschung der Modellregionen des BMVI bildet die dafür notwendige Grundlage.

## Empfehlungen

- Die Energieversorgung des Fahrzeuges ist soweit möglich durch Strom aus zusätzlich installierten Kapazitäten erneuerbarer Quellen abzudecken. Die ökologischen Auswirkungen des Fahrzeugs können so über seine gesamte Lebenszeit deutlich reduziert werden.
- Bei der Ladung ist auf eine möglichst hohe Effizienz der Ladekette zu achten. Diese beeinflusst den absoluten Verbrauch des Fahrzeugs am Stromnetz und somit auch das Umweltprofil der Fahrzeugnutzung. Unterschiede verschiedener Ladetechnologien sind hierbei noch weiterführend zu untersuchen. Die Auswahl und Entwicklung von Ladesystemen sollte dahingehend gesteuert werden, dass die Ladeeffizienz neben Praktikabilität und Zeitdauer eine weitere Entscheidungsdimension bildet. Detaillierte Evaluation der spezifischen Ladeverluste unter Berücksichtigung von Ladetechnologie und Ladeleistung sollten hierzu zukünftig die fundierte Basis bilden.
- Die Herstellung des Batteriesystems verursacht einen großen Teil der ökologischen Wirkungen der batterieelektrischen Fahrzeuge. Deshalb kommt es darauf an, dass auf das tatsächliche Nutzungsprofil der Fahrzeuge abgestimmte Batteriekapazitäten angeboten und ausgewählt werden. Aus den Nutzungsdaten der Modellregionen werden je nach Einsatzkontext große Unterschiede im Energieverbrauch und der Laufleistung deutlich. Um diesen großen Bandbreiten gerecht zu werden, sollte auf Fahrzeug- und/oder Flottenebene ermöglicht werden, nutzungsgerechte Modelle und/oder Modellversionen auszuwählen, um eine möglichst hohe Auslastung der Fahrzeuge sicherzustellen. Dadurch kann ein ökologischer Mehrwert gegenüber konventionellen Fahrzeugen erreicht werden. Ziel eines systematischen Flottenaufbaus sollte daher eine angepasste, zielgerichtete Fahrzeuganzahl zugunsten einer höheren Laufleistung der Einzelfahrzeuge sein. Flexible Modellgestaltung auf Fahrzeugebene sowie anwendungsspezifische Flottenportfolios sind hierbei zielführend.
- Zur besseren Auslastung können geeignete einsatzkontextspezifische Kommunikationsmaßnahmen über das Reichweitenpotenzial des Fahrzeugs aufklären, zudem können Anreizsysteme zur weiteren Erhöhung der Fahrzeuglaufleistung eingeführt werden. Ebenso deuten die Auswertungen der Langzeitdaten darauf hin, dass die Kombination bestimmter Einsatzkontexte mit unterschiedlichen Nutzungsintensitäten im Wochenverlauf zu einer höheren Fahrzeugauslastung führen kann. Die aufgezeigten Bandbreiten der Nutzungsdaten verdeutlichen, dass eine Bewertung ohne Detailunter-

suchungen in den untersuchten Einsatzkontexten und unter den jeweiligen spezifischen Rahmenbedingungen nicht zielführend ist. Zukünftig sollte auch die Untersuchung von Wegeketten, die mittels kombinierten Verkehrsmitteln im Sinne der integrierten Mobilität zurückgelegt werden, in den Fokus rücken. Dabei ist zukünftig auch die Integration von Nutz- und Sonderfahrzeugen in die detaillierte Betrachtung notwendig. Damit gelänge beispielsweise die kondensierte Abbildung des Wirtschaftsverkehrs. Für einen Vergleich zwischen elektrischen und konventionellen Mobilitätsangeboten und deren Nutzung und um eine valide Bewertung der Praxistauglichkeit und der Umweltauswirkungen der Elektrofahrzeuge zu ermöglichen, wird für zukünftige Auswertungen eine parallele Datenaufnahme von Verbrennungsfahrzeugen in identischen realen Nutzungsprofilen empfohlen.

- In Kapitel 4 wurde im Rahmen der AG PKW und Nfz (Themenfeld Innovative Antriebe und Fahrzeuge) eine Liste mit Merkmalen (Planungsindikatoren) zusammengetragen, die künftig zur Charakterisierung von unterschiedlichen Einsatzkonzepten herangezogen werden kann. In einem nächsten Schritt ist eine umfangreiche Quantifizierung und Qualifizierung dieser Merkmale sinnvoll. Durch deren Analyse können die Ausprägungen der Merkmale identifiziert werden, die im jeweiligen Einsatzkontext vorteilhaft sind. Im Umkehrschluss kann abgeleitet werden, welche Rahmenbedingungen für einen sinnvollen Einsatz von Elektrofahrzeugen gegeben sein müssen.
- Eine Erweiterung des Minimaldatensets um eine Differenzierung von tatsächlichen Lade- und reinen Standzeiten an den Ladesäulen sowie des zeitlichen Verlaufs des Batterie-ladezustands würde die Untersuchung weiterer Forschungsfragen wie die Nutzung von Elektrofahrzeugen als Pufferspeicher im Smart Grid ermöglichen. Hierzu liegen bereits verschiedene Projektansätze etwa im Rahmen der Modellregionen Elektromobilität vor, deren Übertragbarkeit auf unterschiedliche Flottenzusammensetzungen und Einsatzkontexte zu analysieren wäre.
- Schließlich können aus den Erfahrungen mit der Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten Empfehlungen zur Optimierung der Datenerfassung abgeleitet werden. So hat sich im Verlauf der Programmbegleitforschung herausgestellt, dass eine weitere Präzisierung der Messmethoden für die Höhenmessung (derzeit über GPS) und zur Bestimmung der Fahrdauer (etwa zur Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit) sinnvoll ist, um weiterführende und zuverlässigere Auswertungen durchführen zu können.

## &gt;&gt; LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **AAA Automotive Research Center:** Extreme Temperatures Affect Electric Vehicle Driving Range, AAA Says. <http://newsroom.aaa.com/2014/03/extreme-temperatures-affect-electric-vehicle-driving-range-aaa-says/>; abgerufen 2014-12-10.
- [2] **Adolf, J.; Balzer, C.; Joedicke, A.; Schabla, U.; Wilbrand, K.; Rommerskirchen, S.; Anders, N.; Auf der Maur, A.; Ehrentraut, Oo.; Krämer, L.; Straßburg, S.:** Shell PKW-Szenarien bis 2040 - Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität; Shell Deutschland Oil GmbH; Hamburg, 2014.
- [3] **AG PKW & Nfz:** Projektstammdaten. 4. Treffen der AG PKW und Nfz. Präsentation am 20.02.2014 in Berlin.
- [4] **Arbeitsgemeinschaft DLR, IWES und IFNE:** Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Schlussbericht, BMUB - FKZ 03MAP146, März 2012.
- [5] **Arbeitskreis Ökobilanz der AG PKW und Nfz:** Ergebnisse AK Ökobilanz vom 11.12.13. Interner Bericht. 2014.
- [6] **Beermann et al.:** Quo vadis Elektroauto? - Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich; TU Graz; Johanneum Research; April 2010.
- [7] **Bloch, A.:** auto motor und sport: Bis zu 47 Prozent geringere Reichweite. <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/elektroauto-reichweite-bis-zu-47-prozent-geringere-reichweite-im-winter-3295701.html>; abgerufen 2014-12-10.
- [8] **Büchner, S.:** Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen. Cuvillier; Göttingen; 2008 (Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss.)
- [9] **Bullis, K.:** MIT Technology Review: Electric Vehicles Out in the Cold; <http://www.technologyreview.com/news/522496/electric-vehicles-out-in-the-cold/>; abgerufen 2014-12-10
- [10] **Centre of Environmental Science - Leiden University (CML):** Characterization and normalization factors. Leiden, 2001; URL: <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>
- [11] **Das Erste:** Elektroautos im Winter. <http://www.daserste.de/information/ratgeber-service/auto-reise-verkehr/sendung/swr/030313-elektroautos-102.html>; abgerufen 2014-12-10.
- [12] **DAT:** Leitfaden über den Kraftstoffverbrauch, die CO<sub>2</sub> Emissionen und den Stromverbrauch aller neuen Personenkraftwagenmodelle, die in Deutschland zum Verkauf angeboten werden; 2. Quartal 2014; DAT Deutsche Automobil Treuhand GmbH; 2014.
- [13] **De Haan, P.; Zah, R.:** Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich, 2013.
- [14] **Europäisches Parlament:** Verordnung über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen(Euro5 und Euro6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge. Fassung (715/2007/EG). 2007.
- [15] **European Union Seventh Framework Programme:** eLCAr - Guidelines for the LCA of electric vehicles; Del Duce et al.; Januar 2013.
- [16] **Follmer, R. et al.:** Mobilität in Deutschland 2002, Projektbericht; ifas/DIW; Bonn und Berlin; 2004.
- [17] **Follmer, R. et al.:** Mobilität in Deutschland 2008, Projektbericht; ifas/DLR; Bonn und Berlin; 2010.
- [18] **Forward, E., Glitman, K., Roberts, D.:** An Assessment of Level 1 and Level 2 Electric Vehicle Charging Efficiency. Vermont Energy Investment Corporation - Transportation Efficiency Group, Burlington, 2013.
- [19] **GaBi 6:** Software-System und Datenbanken zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Thinkstep AG in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik. Stuttgart und Echterdingen 2012.
- [20] **Garche, J.:** Präsentation auf dem BMUB-Workshop. Elektromobilität - Antriebstechnologie. Berlin: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), 19. Oktober 2007.
- [21] **Graf, R. et al.:** Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen - Zwischenbericht. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.), Berlin, 2015.
- [22] **Guttenberg, P.:** Der Autarke Hybrid am Prüfstand - Funktion Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse. Technische Universität München, München, 2004.
- [23] **Held, M.:** Methodischer Ansatz und Systemmodell zur ökologischen Analyse zukünftiger Elektrofahrzeugkonzepte. Fraunhofer Verlag. Stuttgart, 2014.

- [24] **Helmers, Eckard:** Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe - auf dem Weg vom Diesel-PKW-Boom zu Elektroautos. Umweltwiss Schadst Forsch (2010) 22:564-578.
- [25] **Helms, H.; Jöhrens, J.; Hanusch, J.; Höpfner, U.; Lambrecht, Udo; Pehnt, Martin:** UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität - Wissenschaftlicher Grundlagenbericht. ifeu -- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (Hrsg.), Heidelberg, 2011.
- [26] **Helms et al.:** Twin Drive Flottenversuch Elektromobilität; Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität - Endbericht. Heidelberg: ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (Hrsg.), Heidelberg, 2013.
- [27] **Herold, D.:** Bestimmung der Ladeverluste von Elektrofahrzeugen nach verschiedenen Einflusskriterien, thinkstep AG, unveröffentlicht, Leinfelden-Echterdingen, 2015.
- [28] **Hesse, B.; Hiesgen, G.; Koppers, M.; Schramm, D.:** Einfluss verschiedener Nebenverbraucher auf Elektrofahrzeuge. In: Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität: betriebswirtschaftliche und technische Aspekte. Springer Gabler; Wiesbaden; 2012 (pp 91-104).
- [29] **Horst, Juri; Frey, Günther; Lepich, Uwe:** Auswirkungen von Elektroautos auf den Kraftwerkspark und die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland. WWF Deutschland (Hrsg.), Frankfurt am Main, 2009.
- [30] **Kendall, Gary:** Plugged In - The End of the Oil Age. WWF-World Wide Fund for Nature (Hrsg.), Brüssel, 2008.
- [31] **Kraftfahrt-Bundesamt:** Fachartikel: Marken und Modelle; Kraftfahrt Bundesamt; Flensburg; Mai 2011.
- [32] **Kraftfahrt-Bundesamt:** Fahrzeugzulassungen Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2014; Kraftfahrt Bundesamt; Flensburg; April 2015.
- [33] **Kraftfahrt-Bundesamt:** Fahrzeugzulassungen Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2013; Kraftfahrt Bundesamt; Flensburg; April 2014.
- [34] **Kraftfahrt-Bundesamt:** Webseite: „Personenkraftwagen am 1. Januar 2013 nach ausgewählten Merkmalen“ letzter Zugriff 14.8.2015; URL [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Ueberblick/2013/2013\\_b\\_bestandsbarometer\\_teil1\\_absolut.html?nn=793588](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Ueberblick/2013/2013_b_bestandsbarometer_teil1_absolut.html?nn=793588)
- [35] **Kraftfahrt-Bundesamt:** Webseite: Personenkraftwagen am 1. Januar 2014 nach ausgewählten Merkmalen, letzter Zugriff 14.8.2015; URL [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Ueberblick/2014/2014\\_b\\_bestandsbarometer\\_teil1\\_absolut.html?nn=1112446](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Ueberblick/2014/2014_b_bestandsbarometer_teil1_absolut.html?nn=1112446)
- [36] **Linssen et al.:** Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen. Advances in Systems Analyses 1; Bd. 150; Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.); Jülich; 2012.
- [37] **Mazza, P., Hammerschlag, R. (2005).** Wind-to-Wheel Energy Assessment. Seattle (USA): Institute for Lifecycle Environmental Assessment.
- [38] **Pehnt, Martin; Höpfner, Ulrich; Merten, Frank:** Elektromobilität und erneuerbare Energien. Arbeitspapier, Heidelberg, Wuppertal, 2007.
- [39] **Pötscher, F.; Winter, R.; Pölz, W.; Lichtblau, G.; Schreiber, H.; Kutschera, U.:** Ökobilanz alternativer Antriebe - Elektrofahrzeuge im Vergleich. Umweltbundesamt GmbH (Hrsg.), Wien, 2014.
- [40] **Raskin, Amy; und Shah, Saurin.:** The Emergence of Hybrid Vehicles - Ending Oil's Stranglehold on Transportation and the Economy. Alliance Bernstein, New York, 2006.
- [41] **Shell 2009:** Shell PKW-Szenarien bis 2030. Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität. Shell Deutschland Oil GmbH (Hrsg.), Hamburg 2009.
- [42] **TAB. Büro für Technikfolgen-Abschätzung des Deutschen Bundestags.** Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt, Peters et al., Oktober 2012.
- [43] **Trechow, P.; Pester, W.:** Komfortable Elektroautos gewünscht. <http://www.ingenieur.de/Themen/Elektromobilitaet/Komfortable-Elektroautos-gewuenscht>; abgerufen 2014-12-10
- [44] **Umezu, K.:** Air-Conditioning System for Electric Vehicles (i-MiEV). Präsentation; SAE Automotive Refrigerant & System Efficiency Symposium 2010.
- [45] **Umweltbundesamt:** Schriftliche Auskunft zur Verteilung der verkehrsbedingten Emissions-quellen nach Verkehrsmitteln, 14.08.2015.

[46] **Umweltbundesamt:** Webseite: Emissionsquellen; letzter Zugriff 14.8.2015 <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen>

[47] **UN/ECE:** Regelung Nr. 101. Amtsblatt der Europäischen Union. 2012

[48] **Unverzerrt.de:** Warum die Elektroautos so viel Energie verbrauchen. <http://unverzerrt.de/elektromobilitaet/energieverbrauch-des-elektroautos/warum-die-elektroautos-so-viel-energie-verbrauchen/>; abgerufen 2015-07-27.

[49] **Weiss, Malcolm; Heywood, John; Drake, Elisabeth; Schafer, Andreas; AuYeung, Felix:** ON THE ROAD IN 2020 - A life-cycle analysis of new automobile technologies. Energy Laboratory Report # MIT EL 00-003, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2000.

[50] **Wuppertal Institut:** Modellregionen Elektromobilität; Umweltbegleitforschung Elektromobilität; Schallaböck et al.; Wuppertal Report; Wuppertal Institut, August 2012.

>> NOMENKLATUR

Abkürzungen	
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
AG	Arbeitsgruppe
AK	Arbeitskreis
AP	Versauerungspotenzial (englisch: Adification Potential)
BEV	Batterieelektrisches Elektrofahrzeug (englisch: Battery Electric Vehicle)
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CAN-Bus	Serielles Bussystem (englisch: Controller Area Network)
CCS	Kombiniertes Ladesystem (englisch: Combined Charging System)
CHAdemo	Handelsname einer markenübergreifenden elektrischen Schnittstelle eines Batteriemanagementsystems für Elektroautos
CML	Centrum voor Milieuwetenschappen, Universität Leiden
CS	Carsharing
DAT	Deutsche Automobil Treuhand
DE	Länderkürzel für Deutschland
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungs-Verein
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EE	Erneuerbare Energien
eICar	E-Mobility Life Cycle Assessment Recommendations
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EOL	Lebensende (englisch End of Life)
EP	Eutrophierungspotenzial (englisch: Eutrophication Potential)
EV	Elektrofahrzeug (englisch: Electric Vehicle)
FSEM	Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität
FTP	Dateiübertragungsprotokoll (englisch: File Transfer Protocol)
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
GWP	Treibhausgaspotenzial (englisch: Global Warming Potential)
Herst.	Herstellungsphase
HST	Herstellung
IBP	Institut für Bauphysik
ICE	Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (englisch: Internal Combustion Engine)
ID	Identifikator
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KoPa II	Konjunkturpaket II
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Ökobilanz (englisch: Life Cycle Assessment)
LKW	Lastkraftwagen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NFZ	Nutzfahrzeug
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
ÖPNV	Öffentlicher Personen-Nahverkehr
PE	Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Quellen (unterer Heizwert)
PHEV	Hybridfahrzeug mit Anschlussmöglichkeit an das Stromnetz (englisch: Plug-In-Hybrid Electric Vehicle), Plug-In-Hybrid

PKW	Personenkraftwagen
POCP	Photochemisches Oxidationsbildungspotenzial (englisch: Photochemical Ozone Creation Potential)
REEV	Hybridfahrzeug mit Range-Extender (englisch: Range Extended Electric Vehicle)
SOC	Ladezustand (englisch: State of Charge)
SoFi	Nachhaltigkeitssoftware für automatisierte Datenerfassung und Berichterstattung
TAB	Büro für Technikfolgen-Abschätzung
TCO	Gesamtbetriebskosten (englisch: Total Cost of Ownership)
UBA	Umweltbundesamt
UTC	Koordinierte Weltzeit (englisch: Universal Coordinated Time, französisch: temps universel coordonné)
Util.	Abkürzung für Nutzfahrzeuge (Utility)
Zul. Ggw.	Zulässiges Gesamtgewicht

Chemische Formelzeichen

C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethen
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt (Kathode)
NMVOC	Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
VOC	Flüchtige organische Verbindungen

Formelzeichen, Einheiten, Indices

[%]	Prozent
[°C]	Grad Celsius
[g/km]	Gramm pro Kilometer
[g/kWh]	Gramm pro Kilowattstunde
[g]	Gramm
[h]	Stunde
[kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.]	Kilogramm CO <sub>2</sub> -Äquivalent
[kg Ethen-Äquiv.]	Kilogramm Ethen-Äquivalent
[kg Phosphat-Äquiv.]	Kilogramm Phosphat-Äquivalent
[kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.]	Kilogramm SO <sub>2</sub> -Äquivalent
[kg]	Kilogramm
[km/h]	Kilometer pro Stunde
[km]	Kilometer
[kWh/100 km]	Kilowattstunden pro 100 Kilometer
[kWh]	Kilowattstunde
[l/100 km]	Liter pro 100 Kilometer
[l]	Liter
[m]	Meter
[min]	Minute
[MJ]	Megajoule
[Stk.]	Stück
[tkm]	Tonnenkilometer

>> ANHANG

Kategorie	Beschreibung	Referenz-einheit	Potentielle Auswirkungen
Umweltwirkungskategorien			
Versauerungspotenzial (AP)	Maß für den Beitrag zur Versauerung („saurer Regen“)	[kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.]	Verringerung des pH-Wertes des Niederschlagswassers, welche zu Waldsterben, Übersäuerung der Böden und somit Freisetzung von Schwermetallen und Artenverarmung in Gewässern und Beschädigung von Bauwerken führen kann.
Eutrophierungspotenzial (EP)	Maß für die Überdüngung von Böden und Gewässern	[kg Phosphat-Äquiv.]	Übermäßiger Nährstoffeintrag in Gewässer und auf Landgebiete, welcher zu überdüngten Gewässern, einer Artenverschiebung in den Gewässern, dem Verlust der Pufferfunktion für Nähr- und Giftstoffe sowie dem Verlust von Arbeitsplätzen im Bereich der Fischerei und im Tourismus führen kann.
Treibhauspotenzial (GWP)	Maß für den Beitrag zum Treibhauseffekt (Reflexion von Wärmestrahlung durch Gase, die zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre führen)	[kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.]	Bildung von anthropogenen Treibhausgasen, die zu einer zunehmenden Erwärmung der Troposphäre, dem sogenannten Klimawandel, führen können.
Photochemisches Ozonbildungspotential (POCP)	Maß für die Bildung von bodennahem Ozon (Sommersmog)	[kg Ethen-Äquiv.]	Bildung von Sommersmog, welcher zu Husten, Augenreizungen, Kopfschmerzen und Lungenfunktionsstörungen führen kann.
Andere Auswertungskategorien			
Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Quellen (unterer Heizwert)	Maß für den Verbrauch von nicht erneuerbaren (fossilen) Energieträgern	[MJ]	Verknappung fossiler energetischer Ressourcen.

Tabelle 6.1: Beschreibung der betrachteten Umweltwirkungskategorien

Datenpunkt	Einheit
Fahrzeug-ID	Fahrgestellnummer (ggf. eindeutige Alternativkennung)
Start-/Enddatum	TT.MM.JJJJ
Start-/Endzeit nach UTC	hh:mm:ss (24 h)
Start-/End Kilometerstand	km
Start-/End-SOC	%
Verbrauchte elektrische Energie	kWh
GPS-Start- und End-Koordinaten	Grad° Bogenminute' Bogensekunde'' (mit Dezimalstellen)
Gefahrene Höhenmeter	m (positive und negative Höhenmeter jeweils als Summe)
Anzahl der Stopps (Ereignis, wenn die Geschwindigkeit unter 3 km/h sinkt, d. h. Eintritt in den Geschwindigkeitsbereich 0-3 km/h. Verbleibt das Fahrzeug z. B. im Stop-and-Go-Verkehr im Bereich 0-3 km/h, gilt dies weiterhin als nur 1 Stopp. Jeder neue Eintritt in den Bereich 0-3 km/h entspricht einem weiteren Stopp.)	Stk.
Verweildauer in Geschwindigkeitsklassen (0-3 km/h, 3-30 km/h, 30-60 km/h, 60-90 km/h, 90-120 km/h, > 120 km/h)	hh:mm:ss (je Geschwindigkeits- klasse)
Max. Geschwindigkeit	km/h
Start-, Min-/Max-Außentemperatur	°C
Start-, Min-/Max-Batterietemperatur	°C
Betriebsstunden Verbrennungsmotor/Range-Extender	h
Erzeugte elektrische Energiemenge	kWh
Kraftstoffverbrauch	l

grau: zusätzliche Datenpunkte für Hybridfahrzeuge

[Tabelle 6.2:](#) Minimaldatenset Fahrt

Datenpunkt	Einheit
Fahrzeug-ID	Fahrgestellnummer (ggf. eindeutige Alternativkennung)
Ladeinfrastrukturkoordinaten	Grad° Bogenminute' Bogensekunde'' (mit Dezimalstellen)
Start-/Enddatum	TT.MM.JJJJ
Start-/Endzeit nach UTC	hh:mm:ss (24 h)
Kilometerstand Ladung	km
Aufgenommene Energiemenge	kWh
Start-/End-SOC	%
Kilometerstand Betankung	km
Getankte Kraftstoffmenge	l

grau: zusätzliche Datenpunkte für Hybridfahrzeuge

[Tabelle 6.3:](#) Minimaldatenset Ladung



Segment/ Einsatzkontext	gesamt				je Fahrt		täglich je Fahrzeug			monatlich je Fahrzeug			jährlich je Fahrzeug
	Fahrzeuge [Stk.]	Fahrten [Stk.]	Fahrdistanz [km]	Fahrdauer [Std.]	Strecke [km]	Dauer [Std.]	Anz. Fahrten	Strecke [km]	Dauer [Std.]	Nutzungstage	Strecke [km]	Dauer [Std.]	Strecke [km]
Minis BEV													
CS (fester P.)	59	6.900	143.384	23.427	20,8	3,4	2	34	6	9	302	49	3.630
CS (Float)	49	22.537	135.234	17.847	6,0	0,8	2	12	2	14	165	22	1.977
CS (mehrere P.)	5	3.953	68.696	11.652	17,4	2,9	2	33	6	24	781	132	9.368
Dienst	45	55.471	373.484	11.225	6,7	0,2	4	30	1	19	562	17	6.740
Flotte (Firmen)	149	181.852	1.106.042	52.823	6,1	0,3	5	30	1	15	453	22	5.442
Flotte (kommunal)	16	5.896	51.843	3.700	8,8	0,6	3	31	2	13	390	28	4.678
Privat	69	92.200	702.711	19.991	7,6	0,2	5	35	1	20	674	19	8.093
Total	392	368.809	2.581.394	140.663	7,0	0,4	4	29	2	16	456	25	5.471
Kleinwagen BEV													
CS (mehrere P.)	10	3.351	40.016	3.703	11,9	1,1	3	36	3	15	541	50	6.489
Dienst	1	490	8.710	163									
Flotte (Firmen)	51	20.540	152.297	5.412	7,4	0,3	4	33	1	16	529	19	6.346
Flotte (kommunal)	3	1.385	6.764	203									
Total	65	25.766	207.787	9.481	8,1	0,4	4	34	2	15	523	24	6.281
Kompakt BEV													
CS (mehrere P.)	4	872	9.627	457									
Flotte (Firmen)	38	19.711	191.255	7.651	9,7	0,4	3,7	36,1	1,4	12	416	17	4.989
Flotte (kommunal)	2	2.410	21.666	720									
Total	44	22.993	222.547	8.828	9,7	0,4	3,7	35,8	1,4	11	380	15	4.565
Kompakt PHEV													
CS (fester P.)	29	3.848	207.767	31.827	54,0	8,3	2	113	17	7	828	127	9.933
Flotte (Firmen)	24	9.056	198.760	10.389	21,9	1,1	3	74	4	11	832	43	9.980
Flotte (kommunal)	1	718	7.024	211									
Flotte (Mietwagen)	1	2.134	23.708	599									
Privat	55	46.600	711.500	16.715	15,3	0,4	3	53	1	20	1.075	25	12.897
Total	110	62.356	1.148.760	59.740	18,4	1,0	3	62	3	16	967	50	11.604
Mini-Vans PHEV													
Flotte (Firmen)	19	24.059	328.776	8.729	13,7	0,4	4,6	62,4	1,7	13	781	21	9.371
Flotte (kommunal)	2	1.848	45.118	773									
Total	21	25.907	373.894	9.503	14,4	0,4	4,5	64,8	1,6	12	809	21	9.712

Segment/ Einsatzkontext	gesamt				je Fahrt		täglich je Fahrzeug			monatlich je Fahrzeug			jährlich je Fahrzeug
	Fahrzeuge [Stk.]	Fahrten [Stk.]	Fahrdistanz [km]	Fahrdauer [Std.]	Strecke [km]	Dauer [Std.]	Anz. Fahrten	Strecke [km]	Dauer [Std.]	Nutzungstage	Strecke [km]	Dauer [Std.]	Strecke [km]
Oberklasse PHEV													
Flotte (Firmen)	12	7.800	124.764	2.424	16,0	0,3	3,1	50,2	1,0	10	485	9	5.826
Kraftrad BEV													
Flotte (Firmen)	5	1.328	7.661	269	5,8	0,2	2,7	15,4	0,5	10	156	5	1.876
Util. (Kasten) BEV													
CS (mehrere P.)	1	704	5.235	224	7,4								
Dienst	1	511	4.062	153	7,9								
Flotte (Firmen)	55	73.325	309.175	22.850	4,2	0,3	6	26	2	15	386	28	4.626
Flotte (kommunal)	9	4.353	32.131	6.058	7,4	1,4	4	32	6	10	318	60	3.818
Total	66	78.893	350.603	29.286	4,4	0,4	6	27	2	14	380	32	4.563
Util. (Liefer) BEV													
Flotte (Firmen)	8	6.706	40.043	8.352	6,0	1,2	4,9	29,3	6,1	16	477	99	5.720
LKW (3,5 - 12 t) BEV													
Flotte (Firmen)	10	1.694	126.380	39.563	74,6	23,4	1,1	80,5	25,2	12	995	312	11.941

Tabelle 6.4: Nutzungsübersicht der Segmente nach Einsatzkontext (Fahrdaten)

Segment/ Einsatzkontext	gesamt				je Ladung		täglich je Fahrzeug			monatlich je Fahrzeug		
	Fahrzeuge [Stk.]	Ladevorgänge [Stk.]	Ladeenergie [kWh]	Ladedauer [Std.]	Energie [kWh]	Dauer [Std.]	Anz. Ladevor- gänge	Energie [kWh]	Dauer [Std.]	Ladungstage	Energie [kWh]	Dauer [Std.]
Minis BEV												
CS (fester P.)	8	1.255	5.676	82.555	4,5	65,8	1	5	75	6,5	33,6	488,5
CS (mehrere P.)	5	3.640	11.925	44.181	3,3	12,1	2	6	22	22,5	135,5	502,1
Dienst	45	10.329	58.604	27.098	5,7	2,6	1	8	4	11,7	88,8	41,1
Flotte (Firmen)	118	37.623	156.739	66.610	4,2	1,8	2	7	3	10,4	78,1	33,2
Flotte (Kommunal)	8	642	1.710	1.478	2,7	2,3	2	4	4	8,3	34,2	29,6
Privat	69	23.058	111.391	56.190	4,8	2,4	2	8	4	13,5	107,1	54,0
Total	253	76.547	346.045	278.112	4,5	3,6	2	7	6	11,5	86,2	69,3

Segment/ Einsatzkontext	gesamt				je Ladung		täglich je Fahrzeug			monatlich je Fahrzeug		
	Fahrzeuge [Stk.]	Ladevorgänge [Stk.]	Ladeenergie [kWh]	Ladedauer [Std.]	Energie [kWh]	Dauer [Std.]	Anz. Ladevor- gänge	Energie [kWh]	Dauer [Std.]	Ladungstage	Energie [kWh]	Dauer [Std.]
<b>Kleinwagen BEV*</b>												
CS (mehrere P.)	9	1.052										
Dienst	1	41										
Flotte (Firmen)	37	738										
Flotte (kommunal)	2	602										
<b>Total</b>	<b>49</b>	<b>2.433</b>										
<b>Kompakt BEV</b>												
CS (mehrere P.)	4	388	2.073	1.761								
<b>Flotte (Firmen)</b>	<b>34</b>	<b>5.216</b>	<b>30.970</b>	<b>18.265</b>	<b>5,9</b>	<b>3,5</b>	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>8,7</b>	<b>81,7</b>	<b>48,2</b>
Flotte (kommunal)	1	705	4.062	2.240								
<b>Total</b>	<b>39</b>	<b>6.309</b>	<b>37.105</b>	<b>22.266</b>	<b>5,9</b>	<b>3,5</b>	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>8,1</b>	<b>74,1</b>	<b>44,4</b>
<b>Kompakt PHEV</b>												
CS (fester P.)	6	41	452	12.952	11,0	315,9	1	12	332	2,0	22,6	647,6
<b>Flotte (Firmen)</b>	<b>6</b>	<b>1.284</b>	<b>6.346</b>	<b>15.996</b>	<b>4,9</b>	<b>12,5</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>17</b>	<b>9,9</b>	<b>66,8</b>	<b>168,4</b>
Flotte (kommunal)	1	197	759	6.111								
Flotte (Mietwagen)	1	588	2.285	1.579								
Privat	1	1.238	5.610	2.643								
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>3.348</b>	<b>15.452</b>	<b>39.281</b>	<b>4,6</b>	<b>11,7</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>20</b>	<b>10,9</b>	<b>87,8</b>	<b>223,2</b>
<b>Mini-Vans PHEV</b>												
<b>Flotte (Firmen)</b>	<b>19</b>	<b>5.195</b>	<b>18.526</b>	<b>10.320</b>	<b>3,6</b>	<b>2,0</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>8,7</b>	<b>44,7</b>	<b>24,9</b>
Flotte (kommunal)	2	457	1.479	886								
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>5.652</b>	<b>20.005</b>	<b>11.206</b>	<b>3,5</b>	<b>2,0</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>8,6</b>	<b>44,0</b>	<b>24,6</b>
<b>Oberklasse PHEV</b>												
<b>Flotte (Firmen)</b>	<b>12</b>	<b>2.351</b>	<b>6.763</b>	<b>2.767</b>	<b>2,9</b>	<b>1,2</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>7,0</b>	<b>28,5</b>	<b>11,7</b>
<b>Util. (Kasten) BEV</b>												
CS (mehrere P.)	1	37	270	132								
Dienst	1	32	214	72,5								
<b>Flotte (Firmen)</b>	<b>28</b>	<b>4.986</b>	<b>35.875</b>	<b>16.487</b>	<b>7,2</b>	<b>3,3</b>	<b>2</b>	<b>12</b>	<b>5</b>	<b>8,6</b>	<b>100,5</b>	<b>46,2</b>
Flotte (kommunal)	6	422	4.076	6.847	9,7	16,2	2	18	31	8,6	156,8	263,3
<b>Total</b>	<b>36</b>	<b>5.477</b>	<b>40.434</b>	<b>23.538</b>	<b>7,4</b>	<b>4,3</b>	<b>2</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>8,6</b>	<b>103,4</b>	<b>60,2</b>
<b>Util. (Liefer) BEV</b>												
<b>Flotte (Firmen)</b>	<b>5</b>	<b>1.488</b>	<b>6.543</b>	<b>2.152</b>	<b>4,4</b>	<b>1,4</b>	<b>3</b>	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>12,9</b>	<b>142,2</b>	<b>46,8</b>
<b>LKW (3,5 - 12 t) BEV</b>												
<b>Flotte (Firmen)</b>	<b>10</b>	<b>1.612</b>	<b>93.036</b>	<b>73.842</b>	<b>57,7</b>	<b>45,8</b>	<b>1</b>	<b>62</b>	<b>50</b>	<b>12,3</b>	<b>768,9</b>	<b>610,3</b>

Tabelle 6.5: Nutzungsübersicht der Segmente nach Einsatzkontext (Ladedaten)

\* Segment wird bei den Auswertungen nicht berücksichtigt, da Ladeenergiekosten unplausibel

Segment	Fahrzeuge [Stk.]	Fahrten [Stk.]	Fahrdistanz [km]	Projekte [Stk.]
Minis BEV	320	350.759	2.351.173	11
Kleinwagen BEV	64	24.844	204.546	4
Kompakt BEV	43	21.958	213.048	5
Kompakt PHEV	63	55.408	830.432	3
Mini-Vans PHEV	21	25.907	373.894	1
Oberklasse PHEV	12	7.800	124.764	1
Kraftrad BEV	5	1.328	7.661	1
Util. (Kasten) BEV	56	65.862	293.443	7
Util. (Liefer) BEV	6	4.667	18.186	3
Gesamt	590	558.533	4.417.148	17

Tabelle 6.6: Datengrundlage für die Auswertungen zum SOC bei Fahrtbeginn (Segmente)

Segmente	Fahrzeuge [Stk.]	Ladevorgänge [Stk.]	Ladeenergie [kWh]	Projekte [Stk.]
Minis BEV	240	73.055	330.243	7
Kleinwagen BEV*	48	1.854	24.067	3
Kompakt BEV	39	6.309	37.105	2
Kompakt PHEV	9	3.291	14.999	2
Mini-Vans PHEV	21	5.093	20.005	1
Oberklasse PHEV	12	2.061	6.763	1
Util. (Kasten) BEV	34	5.129	37.082	4
Util. (Liefer) BEV	5	1.488	6.543	3
Gesamt	408	98.280	476.806	12

\* Segment wird bei den Auswertungen nicht berücksichtigt, da Ladeenergiedaten unplausibel waren.

Tabelle 6.7: Datengrundlage für die Auswertungen zum SOC bei Ladebeginn (Segmente)

Segment	Fahrzeuge [Stk.]	Fahrten [Stk.]	Fahrdistanz [km]	Projekte [Stk.]
Minis BEV	272	308.451	2.140.305	12
Kleinwagen BEV	46	3.429	24.631	2
Kompakt BEV	24	18.386	181.582	2
Kompakt PHEV	60	45.996	689.326	2
Mini-Vans PHEV	21	24.661	372.236	1
Oberklasse PHEV	12	6.085	102.529	1
Kraftrad BEV	5	1.296	7.609	1
Util. (Kasten) BEV	24	3.244	14.693	4
Util. (Liefer) BEV	6	2.129	21.575	3
Gesamt	470	413.677	3.554.485	1

Tabelle 6.8: Datengrundlage für die Auswertungen zum Energieverbrauch (Segmente)

Wirkungskategorie	Versauerungs- potenzial (AP)	Eutrophie- rungs- potenzial (EP)	Treibhaus- potenzial (GWP)	Photochem. Ozonbil- dungspoten- zial (POCP)	Primärener- giebedarf, nicht erneu- erbare (PE)
	[kg SO <sub>2</sub> -Äquiv./km]	[kg PhosphatÄquiv./ km]	[kg CO <sub>2</sub> -Äquiv./km]	[kg EthenÄquiv./km]	[MJ/km]
Emissionsprofil je Fahrkilometer (Annahme: 150.000 km Gesamtfahrleistung, Strommix DE als Ladestrom)					
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Segmentdurchschnitt					
Mini	4,27 E-04	3,67 E-05	0,151	3,08 E-05	2,03
Kleinwagen	4,89 E-04	4,67 E-05	0,192	3,76 E-05	2,60
Kompaktwagen	4,99 E-04	4,81 E-05	0,198	3,84 E-05	2,69
Utilities (Kastenwagen)	5,18 E-04	5,40 E-05	0,227	4,07 E-05	3,09
Utilities (Lieferwagen)	9,14 E-04	8,02 E-05	0,331	6,64 E-05	4,46
Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV), Segmentdurchschnitt					
Kompaktwagen, hohe elektrische Reichweite (Batterie >10kWh)	4,64 E-04	4,67 E-05	0,213	5,29 E-05	2,872
Emissionsprofil je Fahrkilometer (Annahme: 150.000 km Gesamtfahrleistung, Ökostrommix DE als Ladestrom)					
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Segmentdurchschnitt					
Mini	3,89 E-04	4,08 E-05	0,063	2,73 E-05	0,79
Kleinwagen	4,42 E-04	5,18 E-05	0,083	3,33 E-05	1,073
Kompaktwagen	4,50 E-04	5,34 E-05	0,084	3,39 E-05	1,084
Utilities (Kastenwagen)	4,57 E-04	6,06 E-05	0,085	3,50 E-05	1,09
Utilities (Lieferwagen)	8,28 E-04	8,94 E-05	0,132	5,84 E-05	1,66
Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV), Segmentdurchschnitt					
Kompaktwagen, hohe elektrische Reichweite (Batterie >10 kWh)	4,33 E-04	5,00 E-05	0,141	5,00 E-05	1,857

Tabelle 6.9: Übersicht Wirkungskategorien und Emissionsprofile je Fahrkilometer (Gesamtfahrleistung: 150.000 km)

Wirkungskategorie	Versauerungs- potenzial (AP)	Eutrophie- rungs- potenzial (EP)	Treibhaus- potenzial (GWP)	Photochem. Ozonbil- dungspoten- zial (POCP)	Primärener- giebedarf, nicht erneu- erbare (PE)
	[kg SO <sub>2</sub> -Äquiv./km]	[kg PhosphatÄquiv./ km]	[kg CO <sub>2</sub> -Äquiv./km]	[kg EthenÄquiv./km]	[MJ/km]
Emissionsprofil je Fahrkilometer unter Annahme der segmentspezifischen Realfahrleistungen (Tabelle 3.8)					
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Segmentdurchschnitt, Strommix DE					
Mini	7,56 E-04	5,52 E-05	0,210	5,39 E-05	2,81
Kleinwagen	7,64 E-04	6,58 E-05	0,255	5,92 E-05	3,43
Kompaktwagen	9,82 E-04	8,16 E-05	0,309	7,63 E-05	4,15
Utilities (Kastenwagen)	9,38 E-04	8,53 E-05	0,330	7,54 E-05	4,46
Utilities (Lieferwagen)	1,54 E-03	1,16 E-04	0,444	1,11 E-04	5,92
Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV), Segmentdurchschnitt					
Kompaktwagen, hohe elektrische Reichweite (Batterie >10kWh)	4,84E-04	4,82E-05	0,218	5,46E-05	2,941
Emissionsprofil je Fahrkilometer unter Annahme der segmentspezifischen Realfahrleistungen (Tabelle 3.8)					
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Segmentdurchschnitt, Ökostrommix					
Mini	7,18 E-04	5,93 E-05	0,123	5,03 E-05	1,57
Kleinwagen	7,17 E-04	7,08 E-05	0,146	5,49 E-05	1,91
Kompaktwagen	9,33 E-04	8,69 E-05	0,195	7,18 E-05	2,55
Utilities (Kastenwagen)	8,77 E-04	9,18 E-05	0,188	6,97 E-05	2,46
Utilities (Lieferwagen)	1,45 E-03	1,25 E-04	0,245	1,03 E-04	3,13
Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV), Segmentdurchschnitt					
Kompaktwagen, hohe elektrische Reichweite (Batterie >10 kWh)	4,53 E-04	5,15 E-05	0,146	5,17 E-05	1,925

Tabelle 6.10: Übersicht Wirkungskategorien und Emissionsprofile je Fahrkilometer (Realfahrleistung)

## ANSPRECHPARTNER

### **Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)**

Referat G21 Elektromobilität  
Invalidenstraße 44  
10115 Berlin

**Telefon:** +(49) 30 18 300-0  
**Telefax:** +(49) 030 18 300-1920  
**Email:** Ref-g21@bmvi.bund.de

### **Leitung des Themenfelds**

#### **Innovative Antriebe und Fahrzeuge**

NOW GmbH - Nationale Organisation Wasserstoff-  
und Brennstoffzellentechnologie  
Oliver Braune  
Fasanenstraße 5  
10623 Berlin

**Telefon:** +49 (0)30 311 6116-42  
**Email:** oliver.braune@now-gmbh.de

### **Wissenschaftliche Begleitung der AG PKW und Nutzfahrzeuge**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung  
Dipl.-Ing. Roberta Graf  
Wankelstraße 5  
70563 Stuttgart

**Telefon:** +49 (0) 711 970-3166  
**Telefax:** +49 (0) 711 970-3190  
**Email:** roberta.graf@ibp.fraunhofer.de

thinkstep AG  
Dr. Stefan Eckert  
Hauptstraße 111  
70711 Leinfelden-Echterdingen

**Telefon:** +49 (0) 711 341817-473  
**Telefax:** +49 (0) 711 341817-25  
**Email:** stefan.eckert@thinkstep.com

## IMPRESSUM

### **Herausgeber**

Bundesministerium für Verkehr  
und digitale Infrastruktur (BMVI)  
Invalidenstraße 44  
10115 Berlin

### **Koordination**

NOW GmbH - Nationale Organisation Wasserstoff-  
und Brennstoffzellentechnologie  
Fasanenstraße 5  
10623 Berlin

### **Autoren**

Dr. Michael Held,  
Dipl.-Ing. Roberta Graf,  
Dipl.-Ing. Daniel Wehner,  
Dr. Stefan Eckert,  
Dr. Michael Faltenbacher,  
Dipl.-Ing. Simone Weidner,  
Dipl.-Ing. Oliver Braune

### **Realisation / Gestaltung**

[www.agenturfuerstrahlkraft.de](http://www.agenturfuerstrahlkraft.de)

### **Lektorat**

[www.lektorat-textlabor.de/](http://www.lektorat-textlabor.de/)

### **Druck**

Ruksaldruck, Berlin

### **Erscheinungsjahr**

2016

### **Bildnachweise:**

Alle Bilder in der vorliegenden Veröffentlichung wurden  
von den einzelnen Projekten oder der NOW GmbH zur  
Verfügung gestellt.



