



Ein Kostenvergleich zwischen batterie- elektrischen und verbrennungsmotorischen Pkw als Klimaschutzoption für das Jahr 2030

Autor
Peter Kasten
Öko-Institut e.V.

13.02.2018

Projektleitung
Urs Maier
Agora Verkehrswende

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Einleitung.....	4
1.1 Die Vollkosten eines Pkw.....	5
2 Annahmen für den Kostenvergleich.....	6
2.1 Nutzungsszenario der Pkw.....	6
2.2 Kostenannahmen zur Fahrzeuganschaffung und Energieverbräuchen.....	7
2.3 Kostenannahmen für die Fixkosten der Fahrzeuge	9
2.4 Kostenannahmen zu den variablen Kosten.....	10
2.5 Annahmen zu den CO ₂ -Emissionen der Fahrzeuge	12
3 Ergebnisse des Kostenvergleichs	13
4 Schlussfolgerungen	14
Literaturverzeichnis	15

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Annahmen zu Energiekosten (ohne Steuern) in den Jahren 2030 und 2050	11
Abbildung 3-1: Vollkostenvergleich zwischen batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Pkw bei gleicher CO ₂ -Minderung für das Jahr 2030; Szenario „Steuersatz heute“	13
Abbildung 3-2: Vollkostenvergleich zwischen batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Pkw bei gleicher CO ₂ -Minderung für das Jahr 2030; Szenario „Steuersatz angepasst“	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Anschaffungspreise und Energieverbräuche der Vergleichs-Pkw im Jahr 2030	8
Tabelle 2-2: Annahmen zu den Fixkosten der Vergleichs-Pkw im Jahr 2030	9
Tabelle 2-3: Annahmen zur Energiebesteuerung für die Jahre 2030 bis 2050	12

Zusammenfassung

In dieser Kurzstudie werden zwei mögliche technische Konzepte der THG-Minderung im Pkw-Verkehr für das Jahr 2030 hinsichtlich der Kosten für Verbraucher miteinander verglichen. Auf Basis eines Kompaktklasse-Pkw (z. B. VW Golf) werden die Vollkosten (Fahrzeuganschaffung, Fixkosten und variable Kosten der Nutzung) für einen Erstbesitzer (Privatnutzer) eines batterieelektrischen Pkw (BEV) mit Reichweiten zwischen 150 und 450 km und eines verbrennungsmotorischen Pkw (Benzin und Diesel), welcher über die Zumischung von PtL-Kraftstoffen dieselben THG-Emissionen verursacht wie das batterieelektrische Vergleichsfahrzeug, für den Kostenvergleich bestimmt.

Unter heutigen steuerlichen Rahmenbedingungen liegen die Vollkosten der batterieelektrischen Pkw je nach Reichweitenkonfiguration und Möglichkeit der Heimladung im Jahr 2030 5 bis 23 % niedriger als bei der günstigsten verbrennungsmotorischen Option. Ausschlaggebend sind dafür die niedrigeren sonstigen variablen Kosten für Wartung und Reparatur sowie die geringeren Energiekosten der batterieelektrischen Fahrzeuge. Diese Kostenvorteile überkompensieren die v.a. bei höheren Reichweitenkonfigurationen anfallenden Mehrkosten der batterieelektrischen Fahrzeuge beim Fahrzeugkauf. Geringer fällt der Kostenvorteil der batterieelektrischen Fahrzeuge aus, wenn für alle Fahrzeuge dieselben Energiesteuern je Energieeinheit angesetzt werden (Annahme: heutiger Steuersatz für Benzin-Pkw). Für die Ladung batterieelektrischer Fahrzeuge würde sich der Steuersatz um das 3,5-fache erhöhen und es würden sich knapp 25 % höhere Strombezugskosten für die Batteriebeladung in Pkw einstellen. Dennoch bleibt der Kostenvorteil gegenüber dem günstigsten verbrennungsmotorischen Fahrzeug bestehen. Er verringert sich jedoch auf 2 bis 21 %.

Deutlich wird auch die Differenzierung der Kosten zwischen den verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen der batterieelektrischen Pkw, die sehr viel

stärker ausfällt als bei den untersuchten Varianten der verbrennungsmotorischen Pkw. Darin zeigt sich das Potenzial der batterieelektrischen Pkw für eine zielgruppenspezifische Kundenansprache mit einer starken Preisdifferenzierung. Auch sind im Gegensatz zu den verbrennungsmotorischen Pkw die effizienteren Fahrzeuge mit geringeren Anschaffungskosten verbunden und erleichtern somit die Kundenansprache für diese Fahrzeuge.

Die Grundlage für den Vergleich ist dieselbe THG-Minderung beider technischen Konzepte während der Nutzungsphase der Fahrzeuge. Die THG-Emissionen der batterieelektrischen Fahrzeuge ergeben sich aus den Emissionen des deutschen Stromsystems, für das von einer Verringerung der Durchschnittsemissionen auf 233 g CO₂/kWh im Jahr 2030 ausgegangen wird. Die verbrennungsmotorischen Pkw erreichen dieselbe THG-Minderung im Jahr 2030 durch das Zumischen von PtL-Kraftstoffen, die vollständig aus erneuerbarem Strom hergestellt werden. Für dieselbe THG-Minderung wie in den batterieelektrischen Pkw ist daher eine Zumischung von über 65 % an PtL angenommen.

Ein weiteres Grundprinzip des Kostenvergleichs ist die Etablierung eines Marktes für die miteinander verglichenen Pkw-Technologien, so dass für alle Technologien eine hohe Kostendegression hinterlegt ist. Auch sind weitere potenziell limitierende Faktoren wie die begrenzte Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Kraftstoffen nicht in dieser Kurzstudie berücksichtigt.

1 Einleitung

Für die Weiterentwicklung des Verkehrssektors stehen in Bezug auf den Klimaschutz und der sich daraus ableitenden Notwendigkeit der THG-Minderung richtungsweisende Entscheidungen an. Da Pkw rund zwei Drittel der THG-Emission des Verkehrs in Deutschland verursachen (BReg 2017), sind gerade deren zukünftige THG-Emissionen für den

Klimaschutz von enormer Bedeutung. In der Debatte, wie die notwendige THG-Minderung erreicht werden kann, werden u.a. zwei verschiedene Strategien für Pkw diskutiert. Während in batterieelektrischen Pkw Strom mit zukünftig immer geringerer THG-Intensität zum Einsatz kommen kann, bietet der Einsatz von strombasierten Flüssigkraftstoffen (PtL-Kraftstoffe¹) die Möglichkeit, die THG-Minderung mit verbrennungsmotorischen Pkw zu erreichen und THG-armen Strom indirekt über Kraftstoffe zu nutzen.

Die Idee dieser Kurzstudie ist es, einen Kostenvergleich aus Sicht eines Pkw-Käufers zwischen batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Pkw mit dem Einsatz von PtL für das Jahr 2030 durchzuführen. Für den Kostenvergleich werden die folgenden Grundprinzipien formuliert:

- Die miteinander verglichenen Pkw der Kompaktklasse (z. B. VW Golf) weisen **dieselben CO₂-Emissionen** während der Nutzung der Fahrzeuge auf und die **spezifischen CO₂-Emissionen je zurückgelegten Kilometer** sind für beide Pkw-Typen **gleich**. Vernachlässigt sind die Emissionsvorkette der Fahrzeugproduktion sowie die Emissionsvorkette der Kraftstoffproduktion und der dafür benötigten zusätzlichen Stromerzeugungskapazitäten. Die Emissionsvorketten sind stark abhängig davon, in welchem Energiesorgungssystem, in welcher Größenordnung und mit welchen Technologien die Batterien bzw. die zusätzlich benötigten EE-Anlagen zukünftig hergestellt werden bzw. zum Einsatz kommen. Bei der Fahrzeugproduktion hängen die Emissionen beider Pkw-Typen auch von weiteren CO₂-Minderungsmaßnahmen wie beispielsweise dem Einsatz von Leichtbaumaterialien ab. Aus diesen Gründen ist die Abschätzung der Vorkettenemissionen nicht Teil dieser Kurzstudie. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die CO₂-Emissionen in der Vorkette für beide genannten Aspekte mengenmäßig nicht vernachlässigbar sind,

sich aber in einer ähnlichen Größenordnung bewegen.

- Der Kostenvergleich wird für jeweils einen batterieelektrischen und einen konventionellen Pkw auf Basis der **Vollkosten (Total Cost of Ownership)** für einen **privaten Erstkäufer** eines Pkw der Kompaktklasse durchgeführt. Dadurch werden neben den Kosten für den Kauf des Pkw auch die Kosten während der Nutzung des Pkw sowie der Wiederverkauf des Pkw an einen Zweitnutzer mit in der Berechnung berücksichtigt.
- Für den Kostenvergleich wird für beide miteinander verglichenen Konzepte die Annahme getroffen, dass sich ein Markt für die jeweilige THG-Minderungsstrategie entwickelt. Die Folge sind eine technische Weiterentwicklung des jeweiligen Konzepts und eine **starke Kostendegression** für die jeweils neuen Technologien.
- **Weitere Faktoren** wie die Verfügbarkeit der Fahrzeuge und der Kraftstoffe, die Akzeptanz für die unterschiedlichen THG-Minderungskonzepte sowie weitere Nachhaltigkeitsaspekte wie beispielsweise Flächen- und Rohstoffbedarfe spielen in dieser Kurzstudie keine Rolle und werden **nicht berücksichtigt**. In einem umfassenden Vergleich der hier miteinander verglichenen THG-Minderungsstrategien sind diese aber ebenfalls relevante Indikatoren.

1.1 Die Vollkosten eines Pkw

Die Kostenstruktur des Besitzes eines batterieelektrischen und eines verbrennungsmotorischen Pkw unterscheidet sich voneinander. Vor allem aufgrund der Batteriekosten sind batterieelektrische Pkw mit höheren Anschaffungskosten gegenüber den konventionellen, verbrennungsmotorischen Pkw verbunden. Die höhere Energieeffizienz des Elektroantriebs führt dagegen im Vergleich zu niedrigeren Kosten während der Nutzungsphase, so dass diese in der Nutzungsphase einen Kostenvorteil gegenüber den verbrennungsmotorischen Pkw besitzen. Aus diesem Grund wird in diesen Kurzpapier

¹ PtL: Power-to-Liquid

der Ansatz der Vollkostenrechnung eines Pkw gewählt, um die Kosten zwischen einem batterieelektrischen und einem verbrennungsmotorischen Pkw, welcher mit einem Gemisch aus PtL- und fossilen Kraftstoffen betrieben wird, miteinander zu vergleichen. Die Vollkostenberechnung besteht dabei aus den folgenden drei Kostenbestandteilen:

Fahrzeuganschaffung

Die Fahrzeuganschaffung umfasst die Kosten für die Fahrzeuganschaffung sowie die Einnahmen aus dem Wiederverkauf des Fahrzeugs. Bei dem batterieelektrischen Pkw kommen gegebenenfalls die Kosten für eine Wallbox zur Schaffung einer Heimlademöglichkeit hinzu.

Fixkosten im Betrieb des Fahrzeugs

Die Fixkosten im Betrieb der Fahrzeuge fallen unabhängig von der mit dem Pkw zurückgelegten Wegstrecke an. Sie setzen sich aus den Kosten für die Versicherung des Pkw, für die Haupt- und Abgasuntersuchung sowie aus der Kfz-Steuer zusammen.

Variable Kosten im Betrieb eines Fahrzeugs

Die variablen Kosten eines Pkw lassen sich unterteilen in die Energiekosten, d.h. die Kosten für den verbrauchten Kraftstoff bzw. Strom, und die sonstigen variablen Kosten für Wartung, Pflege und Reparatur der Pkw.

Die Gesamtkosten der Vollkostenrechnung stellen die Summe der genannten Kostenbestandteile dar und bilden in dieser Kurzstudie die Vergleichsgröße für die beiden untersuchten Fahrzeugkonzepte.

2 Annahmen für den Kostenvergleich

Die Vollkostenrechnung setzt sich aus den in Abschnitt 0 dargestellten Kostenbestandteilen zusammen, für deren Entwicklung bis zum Jahr 2030 und für die darauf folgende Nutzungsphase Annahmen getroffen werden müssen. Im Folgenden werden die getroffenen Annahmen sowie die Literaturquellen, aus denen diese Annahmen entnommen und

abgeleitet werden, vorgestellt. Vorangestellt wird die Annahme, dass die Mehrwertsteuer konstant bei 19 % verbleibt und sich nicht über die Nutzungsphase der Pkw verändert.

2.1 Nutzungsszenario der Pkw

Die Art der Nutzung und der Ladung der Pkw hat einen relevanten Einfluss auf die Vollkosten eines Pkw. In dieser Kurzstudie werden Durchschnittswerte für Jahresfahrleistungen und Haltedauern für den Kostenvergleich zugrunde gelegt. Andere Nutzungen, die hinsichtlich der zurückgelegten Kilometer und der Haltedauer stark von den angegebenen Werten abweichen, können daher andere Vollkosten aufweisen als die in dieser Studie aufgezeigten Werte. Die gezogenen Schlussfolgerungen dieser Kurzstudie gelten also für den typischen Gebrauch der Pkw, wobei Spezialanwendungen andere Kostencharakteristika besitzen können.

Für die allgemeinen Nutzungsdaten von Pkw der mittleren Pkw-Segmente wird auf die Auswertungen verschiedener deutscher Mobilitätshebungen von Plötz et al. (2013) zurückgegriffen:

- Die Jahresfahrleistung der Pkw wird auf 15.000 km gesetzt und es wird eine Haltedauer von 6 Jahren für den Erstnutzer angenommen. Die Fahrzeuge sind insgesamt 12 Jahre im deutschen Bestand aufzufinden, was einer Fahrleistung von 180.000 km über die genannten 12 Jahre entspricht. Es ist bekannt (z. B. Follmer et al. 2010, Knörr et al. 2014), dass Pkw zu Beginn ihrer Nutzung stärker genutzt werden und die Jahresfahrleistung über die Lebensdauer der Pkw abnimmt. Aus Gründen der Vereinfachung wird in dieser Kurzstudie aber auf eine Differenzierung der Jahresfahrleistung über die Zeit verzichtet.

Des Weiteren wird für batterieelektrische Pkw zwischen zwei Szenarien hinsichtlich der Ladung der Pkw unterschieden:

- Im Szenario „Heimladung“ wird eine Wallbox am Wohnort angeschlossen. Dementsprechend findet der überwiegende Teil der Batterieladung an der eigenen Wallbox statt (90 %) und die übrige Beladung verteilt sich auf die gewöhnliche öffentliche Ladeinfrastruktur (5 %) und die Schnellladeinfrastruktur (5 %).
- Im Szenario „ohne Heimlademöglichkeit“ wird angenommen, dass die Ladung des batterieelektrischen Pkw vollständig an im öffentlichen Raum zugänglichen Ladepunkten stattfindet. In diesem Szenario findet 90 % der Ladung an gewöhnlichen Ladepunkten des öffentlichen Raums statt und 10 % des Strombedarfs wird über Schnellladepunkte bezogen.

2.2 Kostenannahmen zur Fahrzeuganschaffung und Energieverbräuchen

Für den Kostenvergleich werden jeweils drei Benzin-, drei Diesel- und drei batterieelektrische Pkw mit verschiedenen technischen Konfigurationen miteinander verglichen, die je nach Konfiguration unterschiedliche Anschaffungspreise und Energieverbräuche besitzen. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um verschiedene Entwicklungsschritte bei den verbrennungsmotorischen Pkw im Kostenvergleich abzudecken und somit die kostengünstigste verbrennungsmotorische Fahrzeugoption im Kostenvergleich berücksichtigen zu können. Für die batterieelektrischen Pkw werden verschiedene Reichweiten der Fahrzeuge für den Kostenvergleich zugrunde gelegt.²

Die Annahmen zu Preisen der Fahrzeuganschaffung und den Energieverbräuchen der Fahrzeuge basieren auf Studien und Einschätzungen des ICCT. Als Basisfahrzeug wird ein Benzin-Fahrzeug der

Kompaktklasse des Jahres 2015 verwendet (siehe Mock 2016), welches mit Technologie-Paketen zur CO₂-Minderung bis zum Jahr 2030 versehen wird. Die Kosten der Technologie-Pakete beziehen sich auf die Werte des „Lower-Bound“ in Meszler et al. (2016) und stellen eine niedrige, aber realistische Kostenschätzung für zukünftige CO₂-Minderungstechnologien dar. Der Basispreis eines Dieselfahrzeugs des Jahres 2015 ist rund 1.500 € höher als der des Benzin-Fahrzeugs. Für die Weiterentwicklung bis 2030 sind bei Diesel-Pkw geringere CO₂-Reduktionen möglich als bei Benzin-Fahrzeugen, deren entsprechende Kosten Meszler et al. (2016) entnommen sind. Zusätzlich werden die Kosten einer verbesserten Abgasnachbehandlung (SCR-Technologie) auf 500 € abgeschätzt. Für die Batteriekosten, die der zentrale Kostentreiber für batterieelektrische Pkw sind, werden 100 €/kWh Batteriekapazität unterstellt („Lower Bound“ in Meszler et al. 2016), so dass sich entsprechend der angenommenen Reichweiten unterschiedliche Anschaffungspreise der batterieelektrischen Fahrzeuge ergeben.³ Eine Übersicht über die angenommenen Anschaffungspreise für alle im Vergleich berücksichtigten Fahrzeuge ist in Tabelle 2-1 gegeben.

Tabelle 2-1 weist ebenfalls die spezifischen Energieverbräuche auf, die maßgeblich in die Berechnungen der variablen Energiekosten der Fahrzeuge mit einfließen. Darin wird der Effizienzvorteil der batterieelektrischen Pkw deutlich, die 2 – 3 Mal niedrigere Energieverbräuche aufweisen als die verbrennungsmotorischen Pkw. Für die batterieelektrischen Pkw werden neben dem Energieverbrauch beim Fahren auch Ladeverluste von 10 % an allen Ladepunkten außer an den Schnellladepunkten unterstellt. An Schnellladestationen beträgt der Ladeverlust 20 %.

² Es wird davon ausgegangen, dass die angegebenen Reichweiten reale Reichweiten darstellen.

³ Im Impact Assessment der EU-Kommission zum Vorschlag der Weiterführung der CO₂-Regulierung für Pkw (EC 2017) wird im

Szenario Very Low costs for EV (VLxEV) von 65 €/kWh als Batteriekosten im Jahr 2030 ausgegangen.

Tabelle 2-1: Anschaffungspreise und Energieverbräuche der Vergleichs-Pkw im Jahr 2030

	Batteriereichweite	Anschaffungspreis (netto)	Energieverbrauch (Fahren)	Energieverbrauch (inkl. Ladeverluste)
	km	€	MJ/km	MJ/km
Benzin-Pkw 1	–	20.890	1,38	–
Benzin-Pkw 2	–	21.600	1,28	–
Benzin-Pkw 3	–	22.260	1,22	–
Diesel-Pkw 1	–	22.880	1,13	–
Diesel-Pkw 2	–	23.240	1,11	–
Diesel-Pkw 3	–	23.490	1,12	–
BEV 150	150	22.050	0,43	0,48 / 0,54
BEV 300	300	24.360	0,44	0,49 / 0,55
BEV 450	450	26.500	0,46	0,51 / 0,57

Quelle: Eigene Annahmen auf Basis von Meszler et al. (2016) und Mock (2016)

Für den Kostenblock der Fahrzeuganschaffung ist der Wiederverkaufswert der zweite relevante Bestandteil der Kostenrechnung. Wie die Entwicklung der Restwerte für Dieselfahrzeuge infolge der Diskussion um innerstädtische Fahrverbote zeigt, sind Annahmen bezüglich der Restwerte für den Zeitraum nach 2030 nicht nur für batterieelektrische Pkw mit Unsicherheiten verbunden. Dennoch kann für verbrennungsmotorische Fahrzeuge auf empirische Erhebungen über den Wiederverkaufswert der Pkw in der Vergangenheit zurückgegriffen werden. Plötz et al. (2013) geben auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes eine Regression für verbrennungsmotorische Fahrzeuge an, die auch in dieser Kurzstudie angewendet wird.

Im Gegensatz dazu existieren bisher keine empirischen Daten für den Wiederverkaufswert batterieelektrischer Pkw für einen etablierten Gebrauchtwagenmarkt. Aus diesem Grund wird für die Abschätzung der zukünftigen Wiederverkaufswerte

der batterieelektrischen Pkw auf bekannte methodische Ansätze in anderen Studien verwiesen. Eine eher konservative Schätzung des Wiederverkaufswerts ergibt sich aus der Annahme, dass der relative Wertverlust eines batterieelektrischen Pkw derselbe ist wie bei den verbrennungsmotorischen Pkw (u.a. Hacker et al. 2015). Je nach Fahrzeugkonfiguration und Reichweite des batterieelektrischen Pkw würde der Wiederverkaufswert des batterieelektrischen Pkw in der Größenordnung der verbrennungsmotorischen Pkw oder leicht darüber liegen. Eine optimistischere Annahme ist in Pfahl (2012) hinterlegt. Bei diesem Vorgehen für die Abschätzung des Wiederverkaufswerts bildet das günstigste verbrennungsmotorische Fahrzeug des Kostenvergleichs die Basis, zu der der Energiekostenvorteil der Gebrauchtwagenutzung eines batterieelektrischen

Pkw hinzuaddiert wird.⁴ Die Kostenvorteile batterieelektrischer Pkw werden in der Nutzung stärker hervorgehoben, so dass sich höhere Wiederverkaufswerte als in der zuvor genannten Abschätzung ergeben. Für diese Kurzstudie werden beide Ansätze in der Herleitung verwendet und der Mittelwert der über beide Verfahren ermittelten Wiederverkaufswerte für die Kostenrechnung als Grundlage herangezogen.

Im Szenario „Heimladung“ ist zudem noch eine Wallbox Teil der Anschaffungskosten der batterieelektrischen Pkw, die mit 315 € allerdings nur einen geringen Anteil der Anschaffungskosten eines batterieelektrischen Pkw ausmacht (Noeren et al. 2015).

2.3 Kostenannahmen für die Fixkosten der Fahrzeuge

Die Fixkosten der Pkw setzen sich aus den jährlich anfallenden Kfz-Steuern und den jährlichen Versicherungskosten sowie den alle 2 Jahre zu bezahlenden Kosten für die Haupt- und Abgasuntersuchung⁵ zusammen. Die Abschätzung dieser Kostenblöcke bezieht sich jeweils auf die heutige Situation bzw. auf die heutigen politischen Rahmensetzungen.

Die heutige Besteuerungsgrundlage der Kfz-Steuern bezieht sich bei verbrennungsmotorischen Pkw auf die Angaben zum Hubraum der Fahrzeuge sowie zu den spezifischen CO₂-Emissionen der Fahrzeuge. Für die batterieelektrischen Pkw läuft die heute gewährte Steuerbefreiung bis zum Jahr 2030 aus und es wird eine Berechnung auf Basis der Fahrzeugmasse durchgeführt. Neben den Annahmen zur

Tabelle 2-2: Annahmen zu den Fixkosten der Vergleichs-Pkw im Jahr 2030

	Kfz-Steuern	Versicherungs-kosten (netto)	Haupt-/Abgasuntersuchung (netto)
	€	€	€
Benzin-Pkw 1	30	665	80
Benzin-Pkw 2	14	665	80
Benzin-Pkw 3	4	665	80
Diesel-Pkw 1	105	686	80
Diesel-Pkw 2	103	686	80
Diesel-Pkw 3	103	686	80
BEV 150	39	693	53
BEV 300	39	693	53
BEV 450	39	693	53

Quelle: Eigene Annahmen auf Basis verschiedener Quellen (siehe Text)

⁴ Bei dieser Herleitungslogik wird nicht der komplette Betriebskostenvorteil der Gebrauchtwagennutzung berücksichtigt. Wäre dies der Fall, müssten auch noch die Kostenvorteile bei den Fix- und den sonstigen variablen Kosten hinzugefügt werden.

⁵ Nach der Erstzulassung müssen die Pkw das erste Mal nach drei Jahren die Haupt- und Abgasuntersuchung bestehen. Danach fällt die Überprüfung der Fahrzeuge alle zwei Jahre an.

Preisentwicklung der Fahrzeuge wurden Abschätzungen zu den technischen Spezifika der Vergleichsfahrzeuge bezüglich des Hubraums und der Masse der Fahrzeuge getroffen, auf deren Basis die Kfz-Steuern für das Jahr 2030 abgeschätzt werden (siehe Tabelle 2-2).

Die Versicherungskosten der verschiedenen Fahrzeuge werden mit Hilfe der Datenbank ADAC-Autokosten⁶ abgeschätzt, in dem die dort hinterlegten Angaben zu den Versicherungskosten als Berechnungsgrundlage genutzt werden. Dafür wird der Mittelwert der Versicherungskosten der heute am häufigsten verkauften Fahrzeuge der Kompaktklasse bestimmt und als Annahme für die jeweiligen Pkw hinterlegt.

Für die Abschätzung der Kosten für die Haupt- und Abgasuntersuchung wird ebenfalls ein Mittelwert über die Preise bei verschiedenen Prüforganisationen gebildet (Krohn 2016), wobei die Abgasuntersuchung für die batterieelektrischen Pkw entfällt.

In der Darstellung der verschiedenen Kostenbestandteile der Fixkosten der miteinander verglichenen Fahrzeuge (Tabelle 2-2) wird deutlich, dass sich die Fixkosten der verschiedenen Fahrzeuge nicht erheblich unterscheiden und somit einen geringen Einfluss auf das Ergebnis des Kostenvergleichs besitzen.

2.4 Kostenannahmen zu den variablen Kosten

Die sonstigen variablen Kosten sind die Fahrzeugkosten für die Wartung, Reparatur und Reifen, die in Abhängigkeit der angefallenen Fahrleistung höher oder auch niedriger ausfallen. Wie bei den Versicherungskosten sind die Abschätzungen aus den in der Datenbank ADAC-Autokosten hinterlegten Kostensätze für die sonstigen variablen Kosten der am

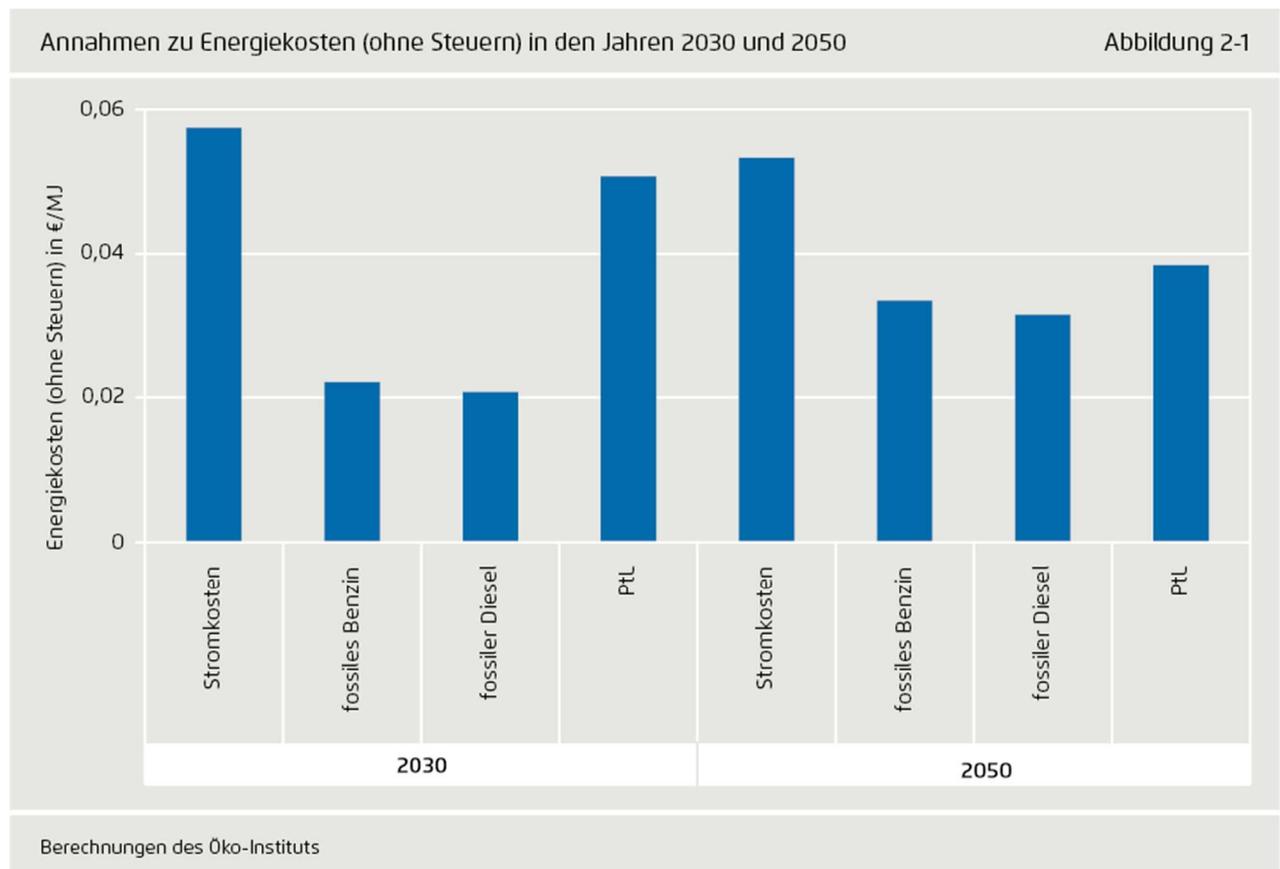
häufigsten verkauften verbrennungsmotorischen Pkw der Kompaktklasse abgeleitet. Die Diesel-Pkw weisen mit 3,3 €/ct/km dabei 14 % niedrigere Kosten je km auf als Benzin-Pkw (3,9 €/ct/km). Expertenschätzungen von Praktikern in eigenen Forschungsvorhaben schätzen die sonstigen variablen Kosten von batterieelektrischen Pkw wegen der geringeren Anzahl an Verschleißteilen auf bis zu 50 % niedriger als die von vergleichbaren verbrennungsmotorischen Pkw (siehe auch Öko-Institut 2017). Daher werden die sonstigen variablen Kosten bei batterieelektrischen Pkw mit 1,9 €/ct/km auf die Hälfte des Wertes der Benzin-Pkw gesetzt.

Die Energiekosten setzen sich zusammen aus den Preisen der Kraftstoffe bzw. des Stroms, die sich neben den Herstellungs- und Systemkosten der Energieträger auch aus den jeweiligen Energiesteuersätzen ergeben, sowie den in Tabelle 2-1 aufgeführten Energieverbräuchen der miteinander verglichenen Pkw. Die Kostenentwicklung (inkl. Vertrieb und Verteilung) für fossile Benzin- und Dieselmotorkraftstoffe wird der Studie Renewability III entnommen und geht von über die Zeit steigenden Kraftstoffkosten aus (Zimmer et al. 2016). Für die strombasierten Kraftstoffe wird auf Daten des Referenzszenarios aus Agora Verkehrswende et al. (2018) zurückgegriffen. Dabei wird angenommen, dass die Kraftstoffe zur Hälfte in Nordafrika und zur anderen Hälfte im Nahen Osten hergestellt werden und die Kosten wegen der in Agora Verkehrswende et al. (2018) angenommenen Kostendegressionen über die Zeit stark absinken.⁷ Die Stromkosten werden auf Basis des erneuerbaren Stromsystems in Matthes et al. (2017) abgeleitet. Dort werden die gesamten Stromsystemkosten eines auf erneuerbaren Energien aufbauenden Stromsystems mit einer Stromnachfrage von 550 TWh auf 63,3 bis 67,3 Mrd. € pro Jahr abgeschätzt. Dieser Abschätzung liegen ähnlich wie in

⁶ <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/su-chergebnis.aspx>

⁷ Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass im Jahr 2030 nur neu gebaute Anlagen an idealen Standorten die Flüssigkraftstoffe herstellen werden, wird für das Jahr 2030 angenommen, dass die Kosten der Kraftstoffherstellung im Jahr 2030 sich zu 30 % aus denen für das Jahr 2020 angenommenen, zu 60 % aus

denen für das Jahr 2025 angenommenen und zu 10 % aus denen für das Jahr 2030 angenommenen Kraftstoffkosten bei Neuanlagen zusammensetzen. Für das Jahr 2050 wird die folgende Kostenzusammensetzung angenommen: 25 % aus Neuanlagen des Jahres 2030, 50 % aus Neuanlagen des Jahres 2040, 25 % aus Neuanlagen des Jahres 2050.



Agora Verkehrswende et al. (2018) sinkende Investitionskosten der EE-Anlagenkapazitäten, aber auch steigende Netz- und Speicherkosten zugrunde. Für das Jahr 2030 werden in dieser Kurzstudie die höheren Stromsystemkosten angesetzt, die bis 2050 auf die niedrigeren Systemkosten aus Matthes et al. (2017) fallen. Zu diesen Stromsystemkosten wird noch der heute übliche Satz für die Marge und den Vertrieb von rund 2,5 €ct/kWh hinzugefügt (BDEW 2017).

Abbildung 2-1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Energiekosten ohne Steuern für die Jahre 2030 und 2050, die in dieser Kurzstudie für den Kostenvergleich angenommen werden. Für die Jahre zwischen 2030 und 2050 wird eine lineare Interpolation vorgenommen, um eine jahresscharfe Kostenentwicklung in der Vollkostenrechnung berücksichtigen zu können.

Preisunterschiede der verschiedenen Kraftstoffe ergeben sich nicht alleine auf Basis unterschiedlicher Herstellungs- und Systemkosten der verschiedenen Energieträger, sondern auch durch die unterschiedliche Besteuerung der Energieträger. Für den Kostenvergleich werden zwei unterschiedliche Energiesteuerszenarien angenommen. Einerseits wird unterstellt, dass bis zum Ende der Kostenbetrachtung keine steuerlichen Änderungen zu heute durchgeführt werden und die heutigen Steuersätze für Benzin- und Dieselmotorkraftstoffe sowie die heutige Stromsteuer ihre Gültigkeit beibehalten. Da Diesel-Pkw und v.a. auch die batterieelektrischen Pkw mit niedrigeren Steuersätzen einen Kostenvorteil besitzen, wird in einem zweiten Szenario eine Anpassung der Steuersätze vorgenommen, so dass alle in den Pkw eingesetzten Energieträger denselben Steuersatz je

Tabelle 2-3: Annahmen zu den Fixkosten der Vergleichs-Pkw im Jahr 2030

	Steuersatz heute		Steuersatz angepasst	
	€/l	€/ct/MJ	€/l	€/ct/MJ
Benzin (fossil/PtL)	0,65	2,03	0,65	2,03
Diesel (fossil/PtL)	0,47	1,32	0,72	2,03
Strom	–	0,57	–	2,03

Quelle: Eigene Annahmen

Energieeinheit besitzen.⁸ Die Ladung elektrischer Pkw würde beispielsweise einen 3,5-fach so hohen Steuersatz im Vergleich zu heute bedeuten (siehe Tabelle 2-3).

Bei der Nutzung batterieelektrischer Pkw hängen die Energiekosten zudem davon ab, an welchen Ladepunkten der Pkw mit Strom wiederbeladen wird (siehe Abschnitt 0). Für die Ladung an gewöhnlichen öffentlichen und an Schnellladepunkten wird für den Betrieb der Ladeinfrastruktur ein Kostenaufschlag gegenüber den in Abbildung 2-1 aufgeführten Stromkosten angenommen. Dieser Kostenaufschlag wird aus der heute bestehenden Zahlungsbereitschaft für die Ladung an öffentlichen Ladepunkten abgeleitet (Harendt et al. 2017) und beträgt 33 % (gewöhnlicher öffentlicher Ladepunkt) bzw. 67 % (Schnellladepunkt) des in dieser Kurzstudie angenommenen Strompreises.

2.5 Annahmen zu den CO₂-Emissionen der Fahrzeuge

Eine Grundvoraussetzung für den Kostenvergleich ist es, dass bei den verglichenen Pkw dieselben CO₂-Emissionen in der Nutzung der Pkw anfallen. Im gewählten Vorgehen wird der Maßstab für die CO₂-Emissionsentwicklung durch die CO₂-Emissionen des batterieelektrischen Pkw vorgegeben. Für die Stromerzeugung in Deutschland wird dafür auf die CO₂-Intensität der Stromerzeugung des Szenarios

„KS95“ im Vorhaben Klimaschutzszenario 2050 zurückgegriffen (Repenning et al. 2015), mit dem bis zum Jahr 2050 eine 95 %-ige Reduktion der THG-Emissionen gegenüber 1990 erreicht wird und somit ein anspruchsvolles, für die Ziele des Pariser Abkommens aber notwendiges Szenario darstellt. Im Jahr 2030 besitzt die Stromerzeugung in Deutschland in diesem Szenario die CO₂-Intensität von 233 g CO₂/kWh, die sich bis zum Jahr 2050 auf 17 g CO₂/kWh reduziert (Greiner & Hermann 2016). Im Durchschnitt ergeben sich bei dem batterieelektrischen Pkw für den Ersthalter (6 Jahre Haltedauer) spezifische CO₂-Emissionen von 28 g CO₂/km, über die gesamte Dauer im Bestand (12 Jahre) verringert sich dieser Durchschnittswert auf 24 g CO₂/km.

Die Eigenschaften der fossilen Kraftstoffe⁹ werden in dieser Kurzstudie aus TREMOD übernommen (Knörr et al. 2014); den PtL-Kraftstoffen werden keine Emissionen zugeordnet, da diese entsprechend der Studie Agora Verkehrswende et al. (2018) vollständig auf Basis erneuerbarer Energien produziert werden. Um dieselben CO₂-Emissionen wie die batterieelektrischen Pkw zu erreichen, wird eine Mischung von fossilen und PtL-Kraftstoffen angenommen. Bei den Benzin-Pkw ergibt sich je nach Energieeffizienz des Pkw für den Ersthalter (6 Jahre) ein durchschnittlicher PtL-Anteil zwischen 68 – 71 %. Wegen des geringeren Verbrauchs der

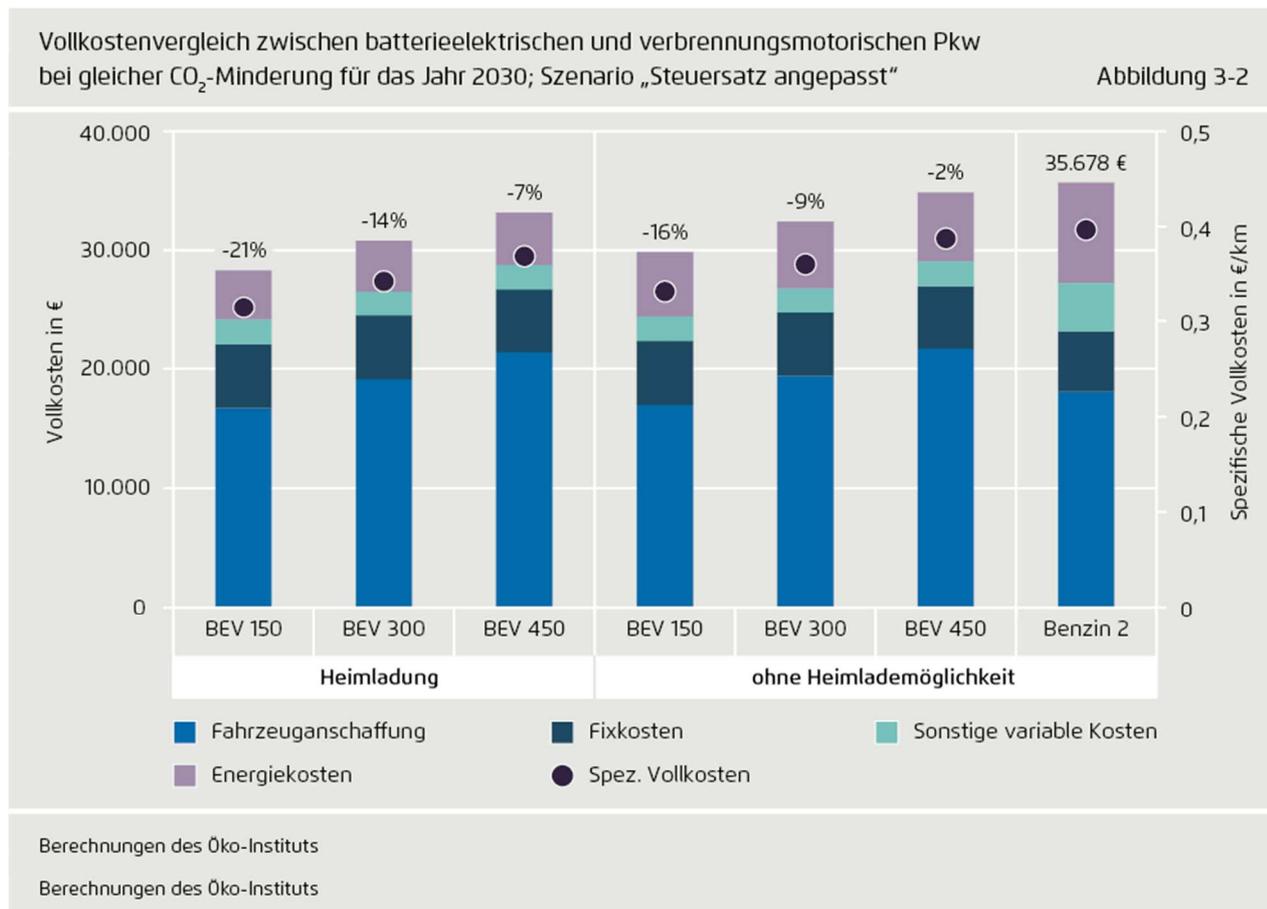
⁸ Durch den Anstieg der Energiebesteuerung von Diesel und Benzin könnten zumindest zum Teil die Mindereinnahmen des

Staates durch die Effizienzsteigerung der Fahrzeuge ausgeglichen werden.

⁹ Benzin: 72 g CO₂/MJ; Diesel: 74 g CO₂/MJ

Dieselfahrzeuge wird für dieselben CO₂-Emissionen mit 66 % ein leicht geringerer PtL-Anteil benötigt. Zum Ende der Bestandzugehörigkeit nach 12 Jahren würden die PtL-Anteile bereits über 80 % liegen, um dieselben CO₂-Emissionen je Kilometer wie ein vergleichbares batterieelektrisches Fahrzeug zu besitzen.

Pkw zu Hause am Wohnstandort zu laden, berücksichtigt (siehe Abschnitt 0). Zusätzlich wird ein Szenario, welches die heutigen Energiesteuersätze voraussetzt („Steuersatz heute“), und ein Szenario, in dem die Energiesteuersätze je Energieeinheit gleich groß sind („Steuersatz angepasst“), für den Kostenvergleich zwischen den verschiedenen Konzepten zugrunde gelegt.



3 Ergebnisse des Kostenvergleichs

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Vollkostenrechnung für die verschieden konfigurierten batterieelektrischen Pkw und jeweils ein verbrennungsmotorisches Vergleichsfahrzeug für das Jahr 2030 vorgestellt. Dafür wird je nach Szenario und Annahmensatz der in der Vollkostenrechnung jeweils günstigste verbrennungsmotorische Pkw den batterieelektrischen Pkw gegenüber gestellt. Bei der Kostenrechnung ist zusätzlich jeweils eine Variante mit und ohne Möglichkeit, den batterieelektrischen

Im Vergleich sind bei unveränderten Steuersätzen zu heute („Steuersatz heute“) im Jahr 2030 die Vollkosten der batterieelektrischen Pkw in allen betrachteten Konfigurationen niedriger als das günstigste verbrennungsmotorische Vergleichsfahrzeug (Abbildung 3-1). Der größte Kostenvorteil ergibt sich in dem Vergleich der Vollkosten in den sonstige variablen Kosten (-42 % ggü. Diesel-Pkw 1) und den Energiekosten (-26 bis -47 % ggü. Diesel-Pkw 1), in denen der Energieeffizienzvorteil des Elektro-Antriebs eindeutig sichtbar wird. Durch die Kostenvorteile beim Energiebezug wird im Kostenblock

Fahrzeuganschaffung auch der teilweise höhere Anschaffungspreis beim Fahrzeugkauf überkompensiert, indem sich durch die geringeren Energiekosten der Gebrauchtwagennutzung relativ gesehen ein geringerer Wertverlust einstellt als bei dem verbrennungsmotorischen Pkw.

Eine Änderung wird bei der Kostenrechnung der verbrennungsmotorischen Pkw deutlich. Die steuerliche Bevorteilung für die Diesel-Pkw fällt in diesem Szenario weg, so dass die günstigste verbrennungsmotorische Option nicht mehr ein Diesel-Pkw, sondern ein Benzin-Pkw ist. Hinsichtlich der Energiekosten behalten die Diesel-Pkw wegen ihrer höheren Energieeffizienz und des geringeren PtL-Anteils zwar einen Kostenvorteil gegenüber den Benzin-Pkw, sie überkompensieren aber nicht mehr den höheren Anschaffungspreis der Diesel-Pkw.

4 Schlussfolgerungen

Der Vergleich zwischen den Vollkosten eines batterieelektrischen und eines verbrennungsmotorischen Pkw, der durch PtL-Anteile von über 65 % dieselbe Klimaschutzwirkung erzielt wie vergleichbare batterieelektrische Pkw, zeigt auf, dass batterieelektrische Pkw im Jahr 2030 für die Nutzer mit geringeren Kosten über die Haltedauer der Fahrzeuge verbunden sind als verbrennungsmotorische Pkw. Für die Erstnutzer ergibt sich bei denselben steuerlichen Rahmenbedingungen wie heute je nach Fahrzeugkonfiguration ein Kostenvorteil zwischen 5 und 23 % gegenüber verbrennungsmotorischen Pkw. Die entscheidenden Faktoren für den Kostenvorteil der batterieelektrischen Pkw sind die geringeren variablen Kosten (Energiekosten und sonstige variable Kosten), die die teilweise höheren Anschaffungspreise der batterieelektrischen Pkw überkompensieren und somit die Vollkosten entscheidend reduzieren. Der Energiekostenvorteil entsteht dabei aus der 2 – 3 mal so hohen Energieeffizienz der batterieelektrischen Pkw (geringere Energiekosten) und der geringeren Anzahl an Verschleißteilen, aus der sich niedrigere Wartungs- und Reparaturkosten gegenüber den konventionellen Pkw einstellen. Der berechnete

Kostenvorteil batterieelektrischer Pkw bleibt auch bestehen, wenn alle Energieträger je Energieeinheit gleich besteuert werden.

Die Batteriekosten sind der relevante Faktor für die Anschaffungspreise batterieelektrischer Pkw, so dass sich die Vollkosten bei unterschiedlicher Reichweite der batterieelektrischen Pkw wesentlich unterscheiden. Während batterieelektrische Pkw mit einer Reichweite von 150 km und bei Verfügbarkeit einer Wallbox um mehr als 20 % niedrigere Vollkosten als die günstigste verbrennungsmotorische Option aufweisen, sinkt der Kostenvorteil auf unter 10 %, wenn eine Reichweite von 450 km für die batterieelektrischen Pkw angenommen wird. Der Kostenvorteil der batterieelektrischen Pkw wird also vor allem erzielt, wenn die Pkw mit kleinen Batterien ausgestattet sind und diese häufig geladen werden. Im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Pkw entsteht bei batterieelektrischen Pkw also ein weiterer Unterschied. Die Fahrzeuge können durch verschiedene Reichweitenkonfigurationen für unterschiedliche Nutzungen und Nutzergruppen kostenseitig stärker differenziert werden als verbrennungsmotorische Pkw, so dass die zielgruppenspezifische Kundenanfrage leichter möglich ist als bei verbrennungsmotorischen Pkw. Auch sind die effizienteren Pkw anders als bei den verbrennungsmotorischen Pkw im Anschaffungspreis günstiger und erleichtern die Kundenansprache für effizientere und bedarfsgerechte Pkw.

Literaturverzeichnis

- Agora Verkehrswende, Agora Energiewende & Frontier Economics (2018):** Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Im Auftrag von Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.
- BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2017):** BDEW-Strompreisanalyse Februar 2017. Haushalte und Industrie.
- BReg – Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2017):** Projektionsbericht 2017 für Deutschland. gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013.
- EC – European Commission (2017):** Impact Assessment. Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council setting emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles as part of the Union's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light duty vehicles and amending Regulation (EC) No 715/2007 (recast) (SWD(2017) 650 final).
- Follmer, R., Gruschwitz, D., Jesske, B., Quandt, S., Lenz, B., Nobis, C., Köhler, K. & Mehlin, M. (2010):** Mobilität in Deutschland 2008. Datensätze der MiD 2008. Berlin, Bonn: Infas; DLR.
- Greiner, B. & Hermann, H. (2016):** Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Stromerzeugung. Arbeitspaket 1.2 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung „Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050“ (FKZ UM 15 41 1860). Berlin: Öko-Institut.
- Hacker, F., Waldenfels, R. von & Mottschall, M. (2015):** Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO₂-Minderung im Auftrag der Begleitforschung zum BMWi Förderschwerpunkt IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic. Berlin: Öko-Institut.
- Harendt, B. et al. (2017):** Schaufenster-Programm Elektromobilität. Abschlussbericht der Begleit- und Wirkungsforschung 2017. Ergebnispapier Nr. 30. DDI, VDE, bit
- Knörr, W., Bergk, F., Gores, S. & Heidt, C. (2014):** „Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2015 (Berichtsperiode 1990-2013). IFEU.
- Krohn, B. (Auto Bild, Hrsg.) (2016):** Was kostet die Plakette? Online verfügbar: <http://www.autobild.de/artikel/hauptuntersuchung-kosten-960034.html>; letzter Abruf am 03.11.2017.
- Matthes, F., Heinemann, C., Ludig, S. & Cook, V. (2017):** Erneuerbare vs. fossile Stromsysteme: ein Kostenvergleich. Stromwelten 2050 – Analyse von Erneuerbaren, kohle-, und gasbasierten Elektrizitätssystemen (Agora Energiewende, Hrsg.). Berlin: Öko-Institut.
- Meszler, D., German, J., Mock, P. & Bandivadekar, A. (2016):** CO₂ reduction technologies for the European car and van fleet, a 2025-2030 assessment. Methodology and Summary of Compliance Costs for Potential EU CO₂ Standards. ICCT.
- Mock, P. (2016):** European vehicle market statistics. Pocketbook 2016/2017. Berlin: ICCT.
- Noeren, D., Michaelis, J., Helms, H., Dallmer-Zerbe, K., Gnann, T., Haendel, M., Reinhard, C. & Marwitz, S. (2015):** Energie und Umwelt. Elektromobilität in Baden-Württemberg im Jahr 2030. Projektübergreifende Forschung im Schaufenster Elektromobilität Baden-Württemberg. ISE; ISI; IFEU.

Öko-Institut (2017): Dokumentation des TCO-Kostenrechner Elektromobilität im Forschungsvorhaben ePoweredFleets. Online verfügbar: <http://elektromobilitaethamburg.de/laufende-projekte/flottenprojekte/epowered-fleets-hamburg/dokumentation/>; letzter Abruf am 03.11.2017.

Pfahl, S. (2012): Alternative Antriebskonzepte: Stand der Technik und Perspektiven – Die Sicht der Automobilindustrie. In: P. Jochem et al. (Hg.), *Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen. Tagungsbandbeiträge vom 08. und 09. März 2012 am KIT, Karlsruhe (KIT)*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

Plötz, P., Gnann, T., Kühn, A. & Wietschel, M. (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Langfassung. Karlsruhe: ISI.

Repenning, J., Emele, L., Blanck, R., Böttcher, H., Dehoust, G., Förster, H., Greiner, B., Harthan, R., Henneberg, K., Hermann, H., Jörß, W., Loreck, C., Ludig, S., Scheffler, M., Schumacher, K., Zell-Ziegler, C., Braungardt, S., Eichhammer, W., Esland, R., Fleiter, T., Hartwig, J., Kockat, J., Pfluger, B., Schade, W., Schlomann, B., Sensfuß, F. & Ziesing, H.-J. (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Berlin.

Zimmer, W., Blanck, R., Bergmann, T., Mottschall, M., Waldenfels, R. von, Förster, H., Schumacher, K., Cyganski, R., Wolfermann, A., Winkler, C., Heinrichs, M., Dünnebeil, F., Fehrenbach, H., Kämper, C., Biemann, K., Kräck, J., Peter, M., Zandonella, R. & Bertschmann, D. (2016): Endbericht Renewability III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Öko-Institut; DLR; IFEU; Inf-ras.

Agora Verkehrswende
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
P +49. (0) 30. 7001435-000
F +49. (0) 30. 7001435-129
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de