

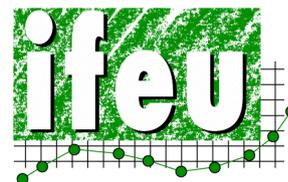
ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH



Wissenschaftlicher
Grundlagenbericht

gefördert durch das Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Heidelberg, Oktober 2011



ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH



UMBR_eLA

Umweltbilanzen Elektromobilität

Wissenschaftlicher

Grundlagenbericht

gefördert durch das Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Hinrich Helms
Julius Jöhrens
Jan Hanusch
Ulrich Höpfner
Udo Lambrecht
Martin Pehnt

Mitarbeit:
Lilith Henes, Benjamin Gugel, Alexander Schacht

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstr. 3, D – 69120 Heidelberg
Tel.: +49/(0)6221/4767-0, Fax: +49/(0)6221/4767-19
E-mail: ifeu@ifeu.de, Website: www.ifeu.de

Heidelberg, Oktober 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Einführung	5
3	Methodik der Umweltbilanzierung	7
3.1	Funktionelle Einheit	7
3.2	Berücksichtigte Lebenswegabschnitte	7
3.3	Umweltwirkungen	8
3.4	Realisierung und Datengrundlagen	10
4	Fahrzeugherstellung	12
4.1	Konventionelle Diesel- und Otto-Fahrzeuge	13
4.1.1	Grundlagendaten und Szenarioausprägungen für die Sachbilanz	13
4.1.2	Wirkungsabschätzung konventioneller Otto- und Diesel-Fahrzeuge	17
4.2	Batterien	22
4.2.1	Grundlagendaten und Szenarioausprägungen für die Sachbilanz	22
4.2.2	Wirkungsabschätzung der Batterieherstellung	24
4.2.3	Sensitivitäten der Batterieherstellung	26
4.3	Elektrofahrzeuge	28
4.3.1	Grundlagendaten und Szenarioausprägungen für die Sachbilanz	28
4.3.2	Wirkungsabschätzung für Elektrofahrzeuge	29
4.4	Brennstoffzellenfahrzeuge	33
4.4.1	Grundlagendaten für die Sachbilanz	33
4.4.2	Wirkungsabschätzung für Brennstoffzellenfahrzeuge	34
5	Fahrzeugnutzung	37
5.1	Fahr- und Nutzungsmuster	37
5.2	Übersicht Verbrauchsdaten	39
5.2.1	Verbrauchsdaten für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor	39
5.2.2	Emissionsfaktoren für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor	41
5.2.3	Verbrauchsdaten für Elektrofahrzeuge	43
5.2.4	Verbrauchsdaten für Brennstoffzellen-Pkw	44
5.3	Modellierung von Energieverbräuchen	45
5.3.1	Fahrzeugparameter	46
5.3.2	Wirkungsgrade des Antriebsstrangs	47
5.3.3	Nebenverbraucher	49
5.3.4	Abgleich für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor	51
5.3.5	Ergebnisse für Elektrofahrzeuge	52
5.3.6	Ergebnisse für Elektrofahrzeuge mit Range Extender	53
5.4	Sensitivitäten des Energieverbrauchs	57
6	Energiebereitstellung	60
6.1	Strombereitstellung	60
6.1.1	Datengrundlage	60

6.1.2	Szenarien zum 'Betankungsstrommix'	63
6.2	Bereitstellung von Wasserstoff	66
6.2.1	Relevante Bereitstellungspfade	67
6.2.2	Datengrundlage und Systemgrenze	68
6.2.3	Ergebnisse der untersuchten Bereitstellungspfade	73
6.3	Bereitstellung von Kraftstoffen	75
6.3.1	Datengrundlagen	76
6.3.2	Ergebnisse für die Kraftstoffbereitstellung	77
6.3.3	Kraftstoffmix für die Gesamtbilanzen	79
7	Bilanzen über den Lebensweg	82
7.1	Betrachtung der heutigen Situation	82
7.1.1	Wo stehen die verschiedenen Antriebskonzepte im direkten Vergleich?.....	82
7.1.2	Wie relevant sind die untersuchten Umweltwirkungen?	86
7.1.3	Welchen Einfluss hat der verwendete Strom und Kraftstoff <i>heute</i> auf die Klimabilanz?.....	87
7.1.4	Gibt es heute besonders vorteilhafte Fahrzeuge oder Nutzungsmuster?	90
7.2	Betrachtung der Entwicklungsperspektiven	98
7.2.1	Wie werden sich die Antriebskonzepte zukünftig entwickeln?	98
7.2.2	Welche Auswirkungen hat die zukünftige Entwicklung des Energiesektors?.....	102
7.2.3	Wo stehen Elektrofahrzeuge im Vergleich mit Brennstoffzellenfahrzeugen?.....	103
8	Ergänzende Aspekte der Elektromobilität	106
8.1	Kabelloses Laden.....	106
8.1.1	Infrastruktur für kabelloses Laden	107
8.1.2	Kabelloses Laden in der Nutzungsphase	108
8.1.3	Umweltbilanz kabellosen Laden	109
8.2	Schwerlastfahrzeuge zum Containertransport	111
9	Fazit und Ausblick	113
10	Literaturverzeichnis.....	117
11	Anlagen.....	124
11.1	Online-Tool	124
11.2	Tabellen.....	125
11.3	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	129

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts UMBReLA wurde eine umfassende Umweltbewertung der Elektromobilität vorgenommen. Diese stützt sich neben Literaturdaten auch auf umweltrelevante Ergebnisse aus aktuellen Forschungsprojekten, dabei insbesondere auf die in den letzten zwei Jahren mit Förderung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführten zahlreichen Feldversuche und Forschungsprojekte zur Elektromobilität.

Diese Projekte bilden durch ihren jeweils unterschiedlichen Forschungs- und Erprobungsansatz eine gute Grundlage für eine umfassende und praxisnahe Umweltbewertung der Elektromobilität. Zudem wurde eine vergleichende ökologische Betrachtung verschiedener Produktionsverfahren von Wasserstoff und dessen Nutzung in Brennstoffzellenfahrzeugen durchgeführt, um einen Systemvergleich von Elektromobilität mit Wasserstoff durchzuführen.

Die Umweltbewertung beruht auf umfangreichen Umweltbilanzen, die im Sinne eines ökobilanziellen Ansatzes den gesamten Lebensweg von Fahrzeugen abbilden. Hierfür wurde das umfassende Ökobilanzmodell eLCAr (Electric Car LCA) aufgebaut, das sowohl flexible Module für die Fahrzeug-, Batterie- und Brennstoffzellenherstellung umfasst, als auch die Nutzungsphase und Energiebereitstellungsketten differenziert abbildet.

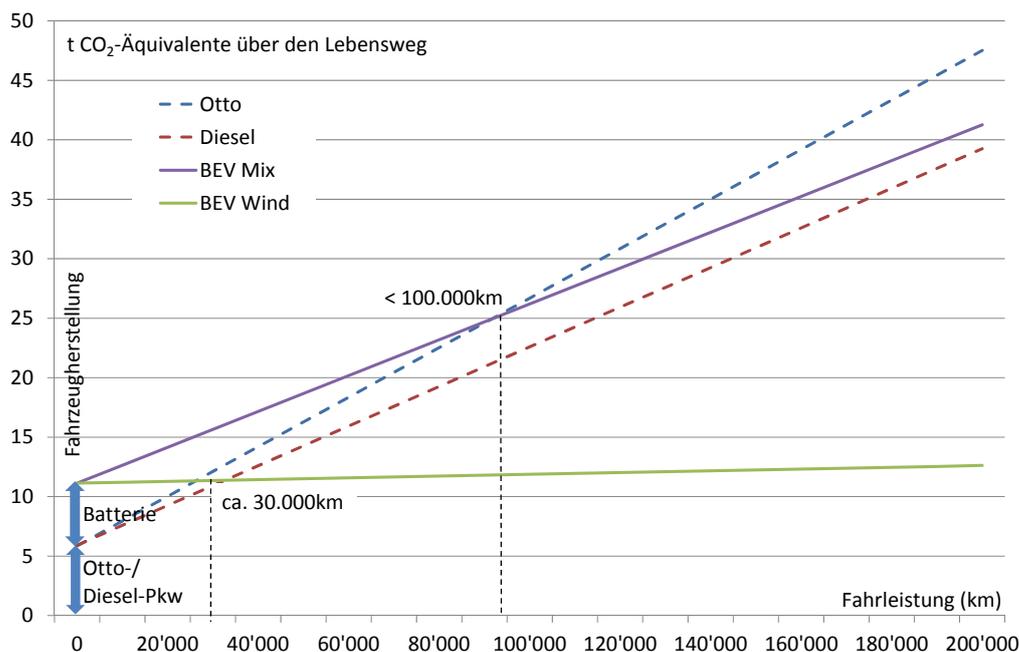
Die Datengrundlage der Modellierung sowie detaillierte Ergebnisse des Ökobilanzmodells sind im nachfolgenden „Grundlagenbericht“ dokumentiert. Wichtige Analyseergebnisse sowie eine strategische Bewertung der Antriebskonzepte wurden in einem Ergebnisbericht anschaulich dargestellt. Zusätzlich sind Informationen zur Umweltbewertung von Elektromobilität und zentrale Ergebnisse des Projektes auf der UMBReLA-Webseite dargestellt (www.emobil-umwelt.de). Hier ist auch ein Tool implementiert, das die Umweltbilanz für verschiedene konkrete und für den Nutzer variable Anwendungen darstellt.

Die Analysen zeigen, dass batterie-elektrische Fahrzeuge heute bei der Bilanzierung des gesamten Lebensweges (inkl. Fahrzeugherstellung und Energiebereitstellung) und bei Nutzung des durchschnittlichen deutschen Strommixes eine ähnliche Klimabilanz haben wie Verbrennungsfahrzeuge. Die Klimawirkung der Batterieherstellung kann gegenüber Otto-Pkw etwa ab einer Lebensfahrleistung von 100.000 km ausgeglichen werden.

Die Bilanz hängt allerdings sehr von den CO₂-Emissionen des genutzten Stroms ab: Die Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Energien (z.B. Windstrom) führt zu deutlichen Klimavorteilen gegenüber konventionellen Pkw. Die Batterieaufwendungen werden dann ab einer Fahrleistung von 30.000 km ausgeglichen.

Besonders vorteilhaft stellen sich batterieelektrische Nutzungen im Innenstadtbereich dar: Hier ist der Elektroantrieb deutlich effizienter als der Verbrennungsmotor. Die Reichweite des Elektrofahrzeugs ist in der Regel für die täglichen Fahrten ausreichend. Andererseits ist bei rein städtischer Nutzung die Fahrleistung im Privatverkehr häufig gering, Daher wird der Umweltaufwand der Batterieherstellung schlechter ausgeglichen. Besonders vorteilhaft ist daher die Nutzung im städtischen Wirtschaftsverkehr, wo durch die intensive Nutzung der Fahrzeuge auch im Stadtbereich hohe Fahrleistungen erreicht werden.

Elektro-Pkw mit einem Verbrennungsmotor als Reichweitenverlängerer (Range Extender) können ebenfalls hohe Fahrleistungen bewältigen. Die Umweltbilanz dieser Fahrzeuge hängt stark vom Anteil des elektrischen Betriebs ab. Bei einer überwiegend elektrischen Nutzung werden hier die Vorteile des batterieelektrischen Antriebs mit den Vorteilen der durch die Reichweite uneingeschränkten Nutzung verbunden.



Treibhausgasemissionen eines mittleren Pkw nach Fahrleistung

Zukünftig werden sich die Umweltwirkungen durch Elektrofahrzeuge mit dem Ausbau erneuerbarer Energien und durch Verbesserungen bei den Batterien verbessern. Die zusätzliche Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge birgt jedoch die Gefahr, dass verstärkt fossile Kraftwerke eingesetzt werden – die Kopplung des Ausbaus von Elektromobilität mit einem Ausbau erneuerbarer Energien ist daher notwendig.

Auch Wasserstoff-Brennstoffzellen-Pkw haben bei Nutzung erneuerbarer Energiequellen deutliche Klimavorteile gegenüber konventionellen Pkw. Gegenüber Elektro-Pkw mit zusätzlichen erneuerbaren Energien ist die Klimabilanz geringfügig schlechter; die Primärenergiebilanz ist wesentlich schlechter.

Die Analysen und Auswertungen des UMBReLA-Projektes bieten eine umfassende Umweltbewertung von Elektromobilität über den gesamten Lebensweg sowie über eine große Breite an Fahrzeugen, Nutzungen und Szenarien. Die Ergebnisse des ökobilanziellen Vergleichs verschiedener Antriebsstränge können zukünftig - mit entsprechenden Anpassungen - auf alle Arten von batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeugen übertragen werden.

Die Umweltbewertung lässt dabei wichtige Umweltfragen und heutige Erkenntnislücken erkennen, denen in Zukunft nachgegangen werden sollte, z.B.:

- Wie werden sich Lebensdauer und Energiedichte von Batterien entwickeln?
- Welche Materialien werden in Batterien und Fahrzeugen eingesetzt, wie ist ihre Verfügbarkeit und welche Möglichkeiten des Recycling gibt es?
- Welche Fahrzeugkonzepte werden zukünftig wo und wie eingesetzt und wie ist die Wechselwirkung mit dem Energiesektor?
- Wie stellen sich die Umweltbilanzen der Elektromobilität unter anderen Rahmenbedingungen (z.B. in Schwellenländern) dar.
- Welchen Beitrag kann Elektromobilität zu neuen, zukünftigen Mobilitätsstrukturen leisten?

2 Einführung

Mobilität ist Voraussetzung für viele wirtschaftliche und private Aktivitäten und damit zentraler Bestandteil unseres Lebens. Aktuelle Studien gehen von einem weiteren Wachstum des Güter- und Personenverkehrs aus. Demnach werden die Transportleistungen im Güterverkehr in Deutschland zwischen 2004 und 2025 um etwa 80 % steigen, die Fahrleistungen im Pkw-Verkehr um 14 % ([ITP 2007]). Der Mobilitätsbedarf in Deutschland wird überwiegend durch den Straßenverkehr gedeckt. Hier ermöglichen moderne Fahrzeuge und ein gut ausgebautes Straßennetz individuelle Mobilität in hohem Ausmaß.

Dem stehen allerdings zugleich negative Aspekte gegenüber: So hatte der gesamte Verkehr 2009 einen Anteil von etwa 29 % am Endenergieverbrauch in Deutschland ([AGEB 2011a]). Die direkten CO₂-Emissionen des Verkehrs machten überdies im Jahr 2008 gut 20 % der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland aus ([UBA 2010]). Dabei ist der Straßenverkehr für über 80 % des Endenergieverbrauchs des Verkehrs verantwortlich und basiert derzeit fast vollständig auf fossilen Kraftstoffen. Die Reduktion und Diversifizierung des Energieverbrauchs des Verkehrs ist somit eine große Herausforderung. Laut Energiekonzept der Bundesregierung soll *„Im Verkehrsbereich ... der Endenergieverbrauch bis 2020 um rund 10 Prozent und bis 2050 um rund 40 Prozent gegenüber 2005 zurückgehen“* ([Bundesregierung 2010]).

Die weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte sowie die Einführung von CO₂-Grenzwerten sollen die Umweltwirkungen des Verkehrs verringern. Als weitere **Säule einer ‚Umweltstrategie für den Straßenverkehr‘** wird Elektromobilität angesehen. Der elektrische Antrieb ist leise, vor Ort emissionsfrei und erlaubt die Erschließung zahlreicher neuer und auch erneuerbarer Energiequellen für den Straßenverkehr.

Dabei zeigten die Ergebnisse der Ökobilanzen des IFEU-Institut im Rahmen der ‚Erprobung von Elektrofahrzeugen auf der Insel Rügen‘ in den 1990er Jahren (siehe [Eden et al. 1997]) zwar erhebliche lokale Umweltvorteile, die Gesamtbilanz unter Berücksichtigung der Batterieherstellung und Strombereitstellung fiel jedoch für einige Schadstoffe negativ aus. Auch die Klimagasemissionen der Elektrofahrzeuge lagen um etwa 20 % über denen konventioneller¹ Fahrzeuge.

Mittlerweile haben jedoch andere Technikbereiche wie Handys oder Laptops zu neuen Märkten und zu Entwicklungssprüngen bei den Batterien gesorgt. Elektroautos sind damit heute wieder eine ernstzunehmende Alternative zu konventionellen Fahrzeugen: **Zeit also für neue, umfassende Umweltbilanzen von Elektromobilität.** Ziel von UMBReLA war es deshalb, eine umfassende Bewertung der Umweltwirkungen von Elektro-Pkw im Vergleich zu Pkw mit Verbrennungsmotor durchzuführen. Hierzu wurde ein umfassendes Ökobilanz-Modell (eLCAr) aufgebaut, das in der Lage ist, umfassende Umweltbilanzen zu verschiedensten Konzepten und Aspekten von Elektromobilität zu erstellen.

Eingangsdaten des Modells waren u.a. die umweltrelevanten Ergebnisse aus den vom BMU initiierten Feldversuchen und Forschungsprojekten, die von IFEU gesammelt und ausgewertet wurden. Zusätzlich wurden auch (Teil-)Ergebnisse an den Erfahrungen der aktuellen Flottenversuche zur Elektromobilität gespiegelt. So konnten nach aktuellem Stand der Wissenschaft plausible und auch methodisch transparent abgeleitete Umweltbilanzen erstellt werden. Diese Umweltbilanzen bilden eine Grundlage um Chancen und

¹ Der Begriff ‚konventionelle‘ Fahrzeuge bezeichnet hier Kraftfahrzeuge mit Otto- oder Diesel-Verbrennungsmotor.

Risiken von Elektromobilität aus Umweltsicht zu erkennen und die vertiefte Bewertung von Elektromobilität aus Umweltsicht zu ermöglichen.

Der vorliegende Grundlagenbericht des UMBReLA-Projektes dokumentiert die Methodik und Datengrundlagen, die den Umweltbilanzen zugrunde liegen. Zusätzlich werden umfangreiche Umweltbilanzen dargestellt und interpretiert. Der für ein breiteres Fachpublikum ausgerichtete Ergebnisbericht des Projektes fasst die wichtigsten Schlussfolgerungen der Umweltbilanzen sowie eine strategische Bewertung der Antriebskonzepte zusammen. Weiterhin werden wichtige Ergebnisse auf der UMBReLA-Website (<http://www.emobil-umwelt.de/>) für eine breitere Öffentlichkeit aufbereitet dargestellt. Hier ist auch ein Tool implementiert, welches die Umweltbilanz für verschiedene konkrete und für den Nutzer variable Anwendungen darstellt.

Dem ökobilanziellen Ansatz folgend (siehe Abbildung 1) werden in diesem Bericht nach einer Einführung in die Methodik (Kapitel 3) zunächst die Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge (Kapitel 4), die Fahrzeugnutzung (Kapitel 5) und die Bereitstellung der zur Nutzung notwendigen Energie (Kapitel 6) separat betrachtet. Anschließend erfolgt die Darstellung und Diskussion umfangreicher Bilanzen über den Lebensweg (Kapitel 7) für verschiedene Antriebskonzepte, Kraftwerke, Fahrzeugtypen und Nutzungsmuster sowie Szenarien. Ergänzend werden perspektivische Bilanzen für Wasserstoff-Pkw dargestellt. Ergänzende Aspekte der Elektromobilität wie kabelloses Laden, Zweiräder und Schwerlastverkehr werden abschließend in Abschnitt 8 betrachtet. Das Fazit fasst die Schlussfolgerungen aus den Umweltbilanzen zusammen (Kapitel 9).

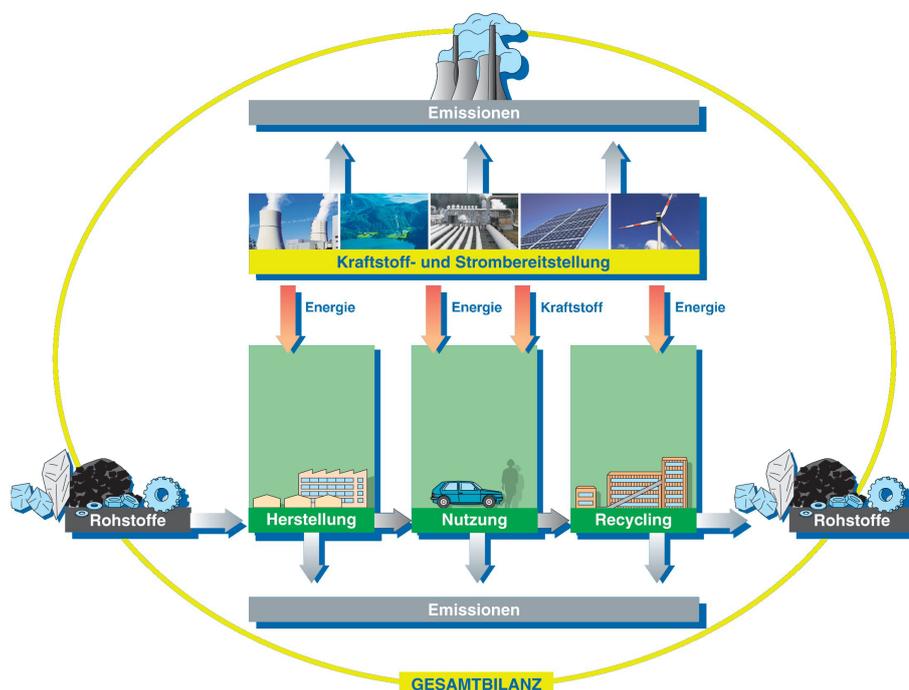


Abbildung 1: Schematischer Überblick über den Lebensweg

3 Methodik der Umweltbilanzierung

Grundlage für den Vergleich der Umweltwirkungen im UMBReLA-Projekt sind detaillierte Umweltbilanzen. Wichtige Randbedingungen der Umweltbilanzen sind dabei die funktionelle Einheit, die Bilanzgrenzen, die Datengrundlage und die berücksichtigten Umweltwirkungen, die in diesem Abschnitt kurz dargestellt werden.

3.1 Funktionelle Einheit

Die Umweltwirkungen werden auf den Nutzen von weitgehend vergleichbaren Fahrzeugen bezogen - die funktionelle Einheit. Dies ist in der Regel der gefahrene Kilometer von weitgehend vergleichbaren Fahrzeugen. Damit wird in dieser Studie die Mobilität in den Vordergrund gestellt. Bei der Analyse von Teilbereichen des Lebensweges werden jedoch auch andere Bezugsgrößen verwendet, wenn verschiedene Optionen eines Fahrzeugkonzepts miteinander verglichen werden (Batterie, Fahrzeug, kWh-Strom oder Liter Kraftstoff). Der geographische Bezugsrahmen ist in der Regel Deutschland. Zeitlich wird sowohl der aktuelle Stand der Technik abgebildet (Szenario 2010), als auch – in Szenarien – die Situation im Jahr 2030.

Trotz weitgehend vergleichbarer Fahrzeugtypen hinsichtlich Größe, Ausstattung etc. sind die untersuchten Fahrzeuge nicht vollständig mit einander vergleichbar und können dies aufgrund ihrer unterschiedlichen Antriebskonzepte auch nicht sein: So weisen batterieelektrische Fahrzeuge ein anderes Fahrverhalten auf als konventionelle Fahrzeuge, haben z.B. ein höheres Anfahrtdrehmoment (Stichwort ‚Fahrspaß‘). Auf der anderen Seite bleiben batterieelektrische Fahrzeuge bis auf weiteres durch die begrenzte Reichweite in ihrem Nutzungsspektrum gegenüber konventionellen Fahrzeugen eingeschränkt. Diesbezüglich wird davon ausgegangen, dass Elektrofahrzeuge konventionelle Fahrzeuge nur dort ersetzen, wo ihr Nutzungsspektrum (insbesondere hinsichtlich der Reichweite) auch für sie geeignet ist. In diesem Fall findet auch keine Umstellung des Mobilitätsverhaltens statt.

3.2 Berücksichtigte Lebenswegabschnitte

Die Umweltbilanzen folgen einem ökobilanziellen Ansatz², bei dem der gesamte Lebensweg verschiedener Fahrzeugkonzepte betrachtet wird. Dabei werden alle relevanten Phasen des Lebensweges von Elektrofahrzeugen und den jeweiligen Vergleichsfahrzeugen berücksichtigt:

- Zur **Herstellung von Fahrzeugen und Batterien** sind detaillierte Informationen zum Materialeinsatz für die Fahrzeuge sowie den mit der Produktion zusammenhängendem Energie- und Transportaufwand hinterlegt. Eine Differenzierung nach Bauteilen erlaubt die individuelle Bilanzierung von Fahrzeugen verschiedener Größe und mit verschiedenen Antriebskonzepten (Otto, Diesel, Range Extender, batterieelektrisch).
- Der Energieverbrauch der Fahrzeuge in der **Nutzungsphase** kann direkt vorgegeben oder auf Basis sekundenfeiner Geschwindigkeitsprofile berechnet werden. So können verschiedenste Nutzungsmuster für alle Fahrzeugtypen definiert werden und es können auch Fahrzeuge einbezogen werden, für die bisher nur wenige

² Es handelt sich dabei jedoch nicht um standardisierte Ökobilanzen nach ISO 14040/14044.

Verbrauchsdaten vorliegen (z.B. Elektrofahrzeuge). Die Differenzierung der Fahrzeugparameter erlaubt zusätzlich die transparente Darstellung von Szenarien.

- Für die **Strombereitstellung** ist eine Vielzahl von Kraftwerkstypen definiert. Damit kann ein beliebiger Kraftwerkspark mit verschiedenen Eigenschaften abgebildet werden. Bei den **Kraftstoffen** können neben fossilem Otto- und Dieselmotorkraftstoff auch Biokraftstoffe als Beimischung oder Reinkraftstoff gewählt werden.

Für alle Abschnitte des Lebensweges können somit der Material- und Energieeinsatz sowie die damit verbundenen Emissionen flexibel bilanziert werden. Durch die hoch differenzierte Modellierung können verschiedenste Parameter variiert und damit beliebige Szenarien berechnet werden. Infrastruktur zu Fahrzeugherstellung, -entsorgung bzw. Energiebereitstellung wird in der Regel nicht bilanziert, einzige Ausnahme bilden Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms.

3.3 Umweltwirkungen

Neben dem Verbrauch an Energie und Ressourcen werden in den Umweltbilanzen auch die Emissionen über den Lebensweg eines Fahrzeugs berücksichtigt. Diese entstehen sowohl bei der Fahrzeugherstellung und der Entsorgung bzw. dem Recycling, als auch bei der Herstellung von Kraftstoff oder Strom, den das Fahrzeug für den Betrieb benötigt. Hier tragen die sogenannten Treibhausgasemissionen, insbesondere Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Stickstoffmonoxid (N₂O, auch Lachgas genannt) zum globalen Treibhauseffekt bei und schädigen dadurch indirekt Mensch und Natur. Zusätzlich zu den Treibhausgasen werden jedoch auch zahlreiche Substanzen mit direkten negativen Wirkungen auf die Natur und die menschliche Gesundheit emittiert (Schadstoffe).

Wichtige Schadstoffe sind dabei Partikel (Feinstaub, PM), Stickstoffdioxid (NO₂, bzw. zusammen mit Stickstoffmonoxid (NO) auch als NO_x geführt), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC) und Schwefeldioxid (SO₂). Die Substanzen sind dabei für unterschiedliche - teilweise aber sich überschneidende - Wirkungen verantwortlich. Um diese Wirkungen bewerten zu können, werden in Ökobilanzen 'Umweltwirkungskategorien' verwendet. Dabei werden die einzelnen Schadstoffe zu einem einzigen gewichtet (siehe Tabelle 1). Es werden folgende Umweltwirkungen betrachtet:

- Die **Klimawirkung** bzw. der Treibhauseffekt steht für die negative Umweltwirkung der anthropogen verursachten Erwärmung der Erdatmosphäre durch Treibhausgasemissionen. Die Berechnung des Treibhauseffekts richtet sich nach den Vorgaben des Intergovernmental Panel on Climate Change ([IPCC 2007]) und erfolgt über das Treibhausgaspotential (Global Warming Potential; GWP) der klimawirksamen Gase mit einem Zeitbezug von 100 Jahren. Um die Klimawirkung zusammenzufassen werden CO₂-Äquivalente verwendet.
- Der **Kumulierte Energieaufwand (KEA)** wird zur primärenergetischen Bewertung des untersuchten Bilanzsystems verwendet und in Joule angegeben. Dabei stellt er nach [Klöppfer & Grahl 2009] nicht im eigentlichen Sinne eine Umweltwirkung, sondern vielmehr eine Bilanzgröße dar. Diese drückt die Summe der Energiemengen aller im System genutzten Primärenergiequellen aus. Dabei umfasst der 'KEA nicht erneuerbare' sowohl den 'KEA fossil' (Summe aller Verbräuche fossiler Energieträger) als auch 'KEA nuklear' (Berechnung des Uranverbrauch über den verbrauchten Atomstrom und einen Wirkungsgrad von 33 %). Der 'KEA erneuerbar' stellt demgegenüber die Summe der Energiemengen aus erneuerbaren Energiequellen (z.B. Sonne, Wind etc.) dar.

Bei der Berechnung des erneuerbaren KEA von EE-Strom gibt es unterschiedliche Definitionen. [VDI1997] setzt die physischen Abmessungen der EE-Kraftwerke als Bilanzgrenzen an. Danach zählt bei Windkraftanlagen die Energie des durch den Rotorquerschnitt strömenden Windes, bei Photovoltaikanlagen die auf die Modulfläche einfallende Globalstrahlung als Berechnungsgrundlage. Da dies jedoch den Vergleich zwischen verschiedenen EE-Kraftwerkstypen stark verzerrt und gleichzeitig „erneuerbare Primärenergie“ in Form von Wind und Sonne als gegeben angesehen werden kann, wird in dieser Untersuchung für den erneuerbaren KEA die Energieabgabe der EE-Anlagen ins Stromnetz betrachtet.

- **Versauerung** bedeutet eine Absenkung des pH-Wertes und kann sowohl ein natürlicher Prozesse sein, als auch durch menschliche Aktivitäten verursacht oder beschleunigt werden. Verantwortlich sind dann vor allem Emissionen von Salzsäure, Schwefeloxiden, Schwefelwasserstoffen, Stickoxiden und Ammoniak. Die Versauerung kann dabei sowohl in Gewässern als auch in Böden (saurer Regen) auftreten und schränkt u.a. das Pflanzenwachstum ein bzw. mindert landwirtschaftliche Erträge. Um die Versauerungswirkung der unterschiedlichen Substanzen für einen Prozess zusammenfassen, werden SO_2 -Äquivalente verwendet.
- **Eutrophierung** steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß. Verantwortlich dafür sind vor allem Phosphat und Nitrat, die meist vom Menschen ausgebracht werden, z.B. bei Düngung in der Landwirtschaft. Eine solche Überdüngung bzw. Überernährung von Pflanzen und anderen Organismen (z.B. Algen) hat eine erhöhte Produktivität zur Folge, die aber auch mit Sauerstoffzehrung verbunden ist. Betrachtet wird hier eine Boden-Eutrophierung (**terrestrische Eutrophierung**). Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass alle luftseitig emittierten Nährstoffe eine Überdüngung des Bodens darstellen. Um die Eutrophierungswirkung der unterschiedlichen Substanzen für einen Prozess zusammenzufassen, werden Phosphat-Äquivalente (PO_4^{3-} -Äquivalente) verwendet.
- Mit **Sommersmog** wird eine hohe Konzentration bodennahen Ozons bezeichnet. Ozon ist ein schädliches Spurengas das zu Vegetations- und Materialschäden führt sowie Gesundheitsbeschwerden hervorruft. Die Ozonbildung wird unter anderem durch UV-Strahlung begünstigt, also durch sonniges Wetter – daher der Name Sommersmog. Die Umweltwirkung Sommersmog wird als POCP (Photochemical Ozone Creation Potential = Photooxidantienbildung) angegeben. Photooxidantien sind dabei reaktive Stoffe und können in der Umwelt vielfache chemische Reaktionen auslösen, die zur Luftverschmutzung beitragen. Um die Sommersmogwirkung verschiedener Stoffe für einen Prozess zusammenzufassen, wird der POCP auf die Wirkung des Referenzstoffes Ethen (C_2H_4) bezogen und in C_2H_4 -Äquivalenten angegeben.
- Die **Feinstaubbelastung** wird als weiterer Indikator für negative Wirkungen auf die menschliche Gesundheit herangezogen. Eine Reihe von internationalen Studien zeigt, dass eine Erhöhung der Feinstaubkonzentration mit einer starken Erhöhung der Sterblichkeit infolge von Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen einhergeht. Studien international anerkannter Organisationen haben auch ein hohes Mortalitätsrisiko durch Feinstäube bestätigt ([IIASA 2005]). Feinstaub bezeichnet dabei Staub, dessen Partikel einen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer (μm) aufweisen und wird daher auch als PM_{10} (Particulate Matter < 10 μm) bezeichnet. Betrachtet werden nur Emissionen aus Verbrennungsprozessen, nicht aber solche durch Abrieb und Aufwirbelung. Die Feinstaubbelastung wird durch

Addition der PM₁₀-Emissionen, ohne Berücksichtigung von Äquivalenzfaktoren, ermittelt.

Die Datenlage für die verschiedenen Wirkungskategorien ist unterschiedlich: Treibhausgasemissionen und Energieaufwand können mit hoher Zuverlässigkeit bilanziert werden. Bei den Versauerungs- und Eutrophierungsemissionen ist die Datenlage demgegenüber etwas schlechter, mehr noch bei den Sommersmog- und Feinstaubemissionen.

Tabelle 1: Überblick über die betrachteten Wirkungsindikatoren

	Wirkungsindikator	Sachbilanzparameter	Wichtungsfaktor
Klimawirkung	CO ₂ -Äquivalente	CO ₂ fossil	1
		CH ₄	27,75
		N ₂ O	298
Versauerung	SO ₂ -Äquivalente	SO ₂	1
		NO _x	0,7
		NH ₃	1,88
		HCl	0,88
		HF	1,6
Eutrophierung	PO ₄ ³⁻ -Äquivalente	NO _x	0,13
		N ₂ O	0,27
		NH ₃	0,35
Sommersmog	C ₂ H ₄ -Äquivalente	NMHC	1

IFEU 2011

3.4 Realisierung und Datengrundlagen

Zur umfassenden Bilanzierung der Umweltwirkungen in verschiedenen Szenarien wurde von IFEU das Ökobilanzmodell eLCAR (Electric Car LCA) aufgebaut. Die Modellierung wurde mit der Software UMBERTO durchgeführt, die vom Hamburger Institut für Umweltinformatik (ifu) entwickelt wird. Mit UMBERTO ist es möglich, komplexe Stoff- und Energieströme nachzuvollziehen und dabei sämtliche relevanten Parameter zu variieren. Die stoffliche Datengrundlage bildet in der Regel die Datenbank EcoInvent ([Ecoinvent 2008]), die vom Swiss Center for Life Cycle Assessment betreut wird.

Weitere Datengrundlagen waren eine umfangreiche Literaturlauswertung und Daten aus den verschiedenen aktuellen vom BMU geförderten Forschungsprojekten zur Elektromobilität (siehe Tabelle 39 im Anhang). So wurden sowohl die Eingangsdaten, als auch die (Teil-)Ergebnisse an den Erfahrungen der aktuellen Flottenversuche zur Elektromobilität (siehe Abbildung 2) gespiegelt.

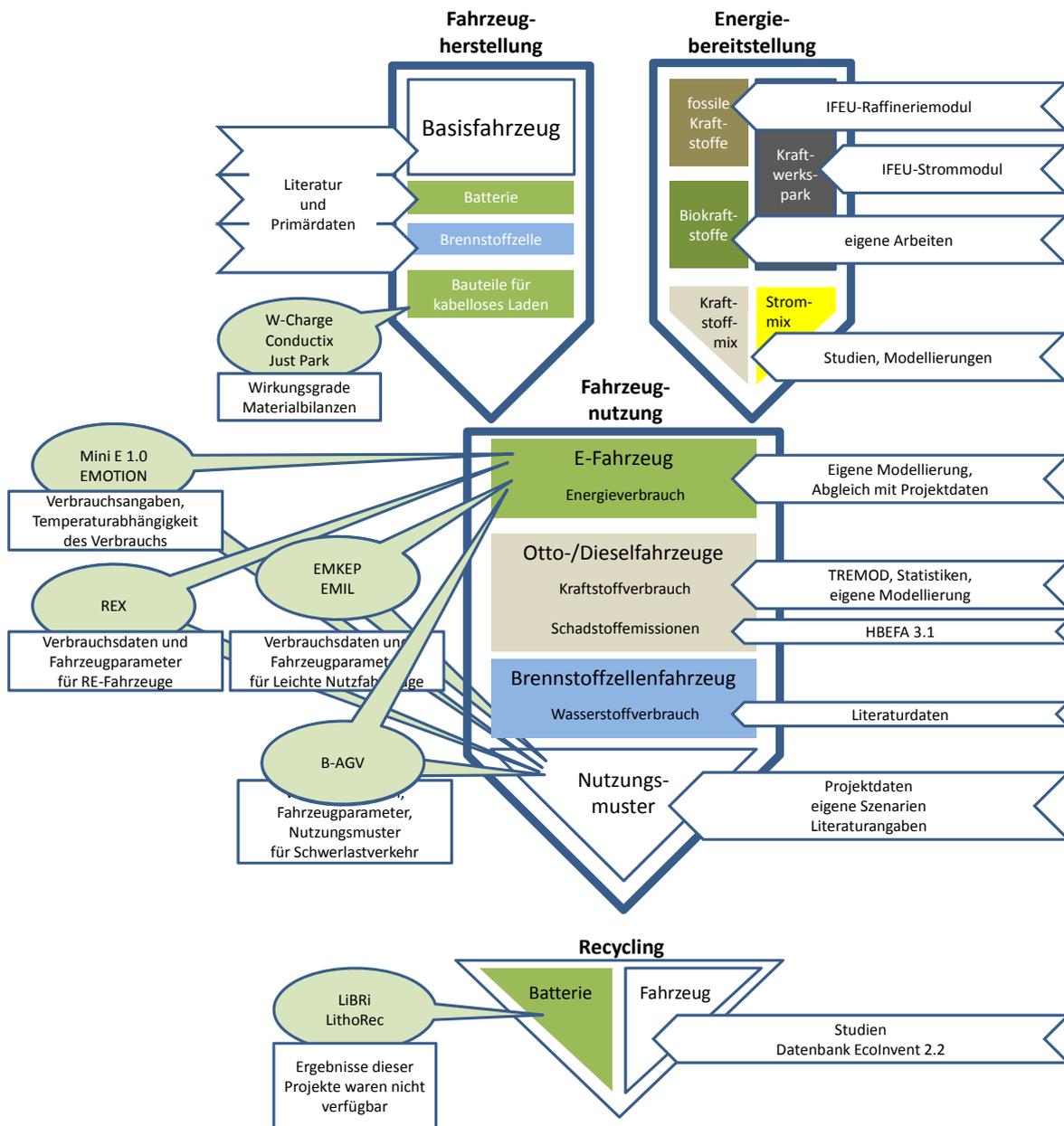


Abbildung 2: Schematischer Überblick der Datengrundlagen und besuchten Projekte

4 Fahrzeugherstellung

Schwerpunkt der Umweltbilanzen ist die Betrachtung unterschiedlicher Antriebskonzepte. Dabei werden Fahrzeuge mit Diesel- und Otto-Motor sowie batterieelektrische Fahrzeuge (auch mit Otto-Motor als Range Extender) und Fahrzeuge mit Brennstoffzelle betrachtet.

Für diese Antriebskonzepte werden vier verschiedenen Fahrzeuggrößen bilanziert: Kleine, mittlere und große Pkw sowie leichte Nutzfahrzeuge (siehe Tabelle 2). Diese Fahrzeuge orientieren sich dabei grob an den KBA-Segmenten ‚Mini‘, ‚Kompaktklasse‘ und ‚Obere Mittelklasse‘ sowie den N1-Nutzfahrzeugen. Es handelt sich dabei um generische Fahrzeugtypen und keine Fahrzeugmodelle eines bestimmten Herstellers.

Tabelle 2: Betrachtete Fahrzeugtypen

Fahrzeugkategorie	KBA-Segmente	Beispiele	Gewicht/Hubraum (typisch)
Pkw klein	Mini	Fiat Panda, Renault Twingo, Citroen C1	900-1100 kg/ 1-1,4 l
Pkw mittel	Kompaktklasse	VW Golf, Opel Astra, Audi A3,	1100 - 1400 kg/ 1,4-2 l
Pkw groß	Obere Mittelklasse	Mercedes E-Klasse, Audi A6, BMW 5er	1400 – 1800 kg/ 2-3 l
Leichtes Nutzfahrzeug	N1-Fahrzeuge	VW Transporter, Mercedes Vito	1600 – 2200 kg

IFEU 2011

Die betrachteten Antriebskonzepte unterscheiden sich insbesondere durch ihren Antrieb und den mitgeführten Energiespeicher. Die Gesamtbilanz der Fahrzeugherstellung weist daher deutliche Unterschiede auf, die insbesondere durch Motor, Batterie und Brennstoffzelle bedingt sind. Zur vergleichenden Bilanzierung der Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten, werden die Prozessbereiche der Fahrzeugherstellung in einen einheitlichen Fahrzeugrumpf, der für alle Antriebskonzepte angesetzt wird, und konzeptspezifische Bauteilgruppen differenziert (siehe Abbildung 3).

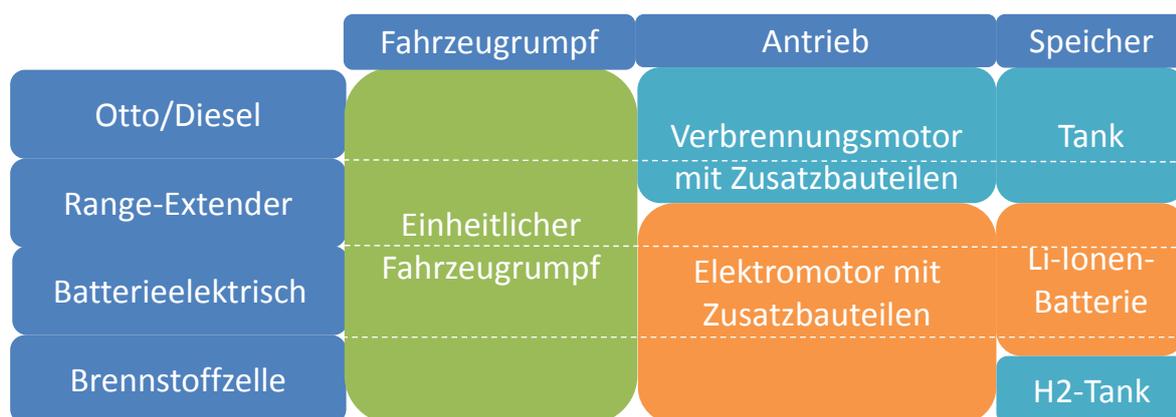


Abbildung 3: Übersicht der bilanzierten Bauteilgruppen

Das konventionelle Referenzfahrzeug setzt sich aus dem Fahrzeugrumpf sowie dem Verbrennungsmotor und weiteren spezifischen Zusatzbauteilen zusammen und wird in Kapitel 4.1 dargestellt. Als ein Schwerpunkt in diesem Projekt wird anschließend die Batterie detailliert betrachtet (Kapitel 4.2). Darauf aufbauend werden batterieelektrische Fahrzeuge (auch mit Range Extender) bilanziert (Kapitel 4.3). Zur vergleichenden Systembewertung von Wasserstoff-Mobilität wird zusätzlich ein Brennstoffzellen-Pkw betrachtet.

Neben dem Ressourcenverbrauch und Energieeinsatz zur Fahrzeugherstellung wird auch die Entsorgung der Fahrzeuge bzw. Recycling von Materialien berücksichtigt. Die Entsorgung des Fahrzeugs wird auf Basis von [Ecoinvent 2008] Datensätzen für Verbrennungspkw bilanziert. Das Recycling von Materialien in eingeschwungenen Märkten wird dabei als Cut-off-Ansatz abgebildet. Das bedeutet, dass Sekundärmaterialien (z.B. Stahlschrott) dem System ohne Umweltlasten zugeführt werden, verwertbare Materialien das System auf der anderen Seite ohne Gutschriften verlassen (siehe z.B. [Klöpffer & Grahl 2009]).

Bei spezifischen Materialien der Zukunftstechnologien (z.B. Neodym, Lithium, Nickel, Kobalt, Kupfer) wird angenommen, dass sie direkt aus den Rohstoffen gewonnen wurden (Primärmaterialien). Bei steigender Nachfrage nach diesen Materialien werden hier wahrscheinlich Recyclingsysteme aufgebaut. Eine umfangreiche Modellierung der Entsorgung und des Recyclings der Batterien konnte jedoch im Projektrahmen nicht vorgenommen werden, da entsprechende Daten und Informationen aus den geförderten Projekten (Libri und Lithorec) nicht zur Verfügung standen.

4.1 Konventionelle Diesel- und Otto-Fahrzeuge

4.1.1 Grundlegenden Daten und Szenarioausprägungen für die Sachbilanz

Bezugsjahr 2010

Grundlage für die Bilanzierung von Pkw ist das aktuelle Golf-Modell VI, das mit einem Marktanteil von 32 % in 2010 ([KBA 2011a]) ein guter Repräsentant der Kompaktklasse ist. Offizielle Herstellerangaben zum Werkstoffeinsatz sind in der Regel nur auf der Ebene von aggregierten Baugruppen und Werkstoffen erhältlich. Die detaillierte Gewichts- und Materialzusammensetzung einzelner Bauteile des Rumpffahrzeugs wurden daher auf Basis von Primärdaten von Volkswagen ([VW 2010a]), Studien ([UBA 1999]) und eigenen Abschätzungen ermittelt und mit der Materialbilanz nach dem Volkswagen Umweltprädiikat ([VW 2008]) abgeglichen (siehe Tabelle 40). Das Fahrzeuggewicht der mittleren Pkw liegt damit bei etwa 1200 kg (siehe Tabelle 3).

Zusätzlich wird auch die Herstellung von kleinen und großen Pkw sowie von leichten Nutzfahrzeugen bilanziert. Da der Fokus des Projektes auf den differierenden Komponenten liegt, werden Unterschiede im Fahrzeugrumpf nur grob abgebildet. Literaturlauswertungen (vgl. ([Öko Institut 2009], [VW 2008], [VW 2010b]) zeigen trotz der relevanten Unterschiede im Gesamtgewicht nur geringe Unterschiede zwischen den Fahrzeugkategorien hinsichtlich der Materialzusammensetzung (Abbildung 4). Grundlage der Bilanzierung verschiedener Fahrzeugkategorien ist daher eine Skalierung des Materialeinsatzes (siehe Tabelle 4). Die Skalierung orientiert sich dabei an Beispielfahrzeugen der KBA-Segmente ‚Mini‘, ‚Kompaktklasse‘ und ‚Obere Mittelklasse‘ (siehe Tabelle 4). Es zeigt sich, dass ‚Leichte Nutzfahrzeuge‘ und große Pkw ein vergleichbares Leergewicht aufweisen. Dabei ist die Ausstattung der Pkw jedoch in der Regel höherwertiger als bei den Nutzfahrzeugen.

Tabelle 3: Skalierung des Materialeinsatz verschiedener Fahrzeugklassen 2010

Fahrzeugkategorie	Skalierung	Gewicht Otto* (kg)	Gewicht Diesel* (kg)
Pkw klein	80 %	961	970
Pkw mittel	100 %	1196	1207
Pkw groß	150 %	1789	1806
Leichtes Nutzfahrzeug	150 %	1815	1832
* geringfügige Abweichungen zur Skalierung durch geänderten Aluminiumeinsatz			IFEU 2011

Tabelle 4: Leergewicht von Beispielfahrzeugen (teilweise mit Fahrergewicht)

Fahrzeugkategorie	Beispiel	Gewicht Otto (kg)	Gewicht Diesel (kg)
Pkw Klein	Renault Twingo	1019-1124	1055
	Ford KA	940	1055-1095
	VW Fox	979-1018	1087
Pkw Mittel	VW Golf	1217-1260	1314-1340
Pkw Groß	Mercedes E-Klasse	1720-1985	
	Audi A6 (Limousine)	1660-1815	1650-1795
	BMW 5er (Limousine)	1670-1975	1695-1870
Leichtes Nutzfahrzeug	VW Transport (Kastenwagen)	-	1773-1982
	Mercedes Vito (Kastenwagen)	-	1800-1880
Quellen: Herstellerangaben			IFEU 2011

Unterschiede in der Materialzusammensetzung des Fahrzeugumpfes von Pkw bestehen nach [Öko Institut 2009] insbesondere im stärkeren Einsatz von Leichtbaumaterialien in größeren Fahrzeugen. Auf Basis der Angaben in [Öko Institut 2009] wird der Aluminiumanteil in kleinen Fahrzeugen daher 20 % niedriger und in großen Fahrzeugen 10 % höher angesetzt als beim mittleren Pkw. Der Stahleinsatz sinkt entsprechend.

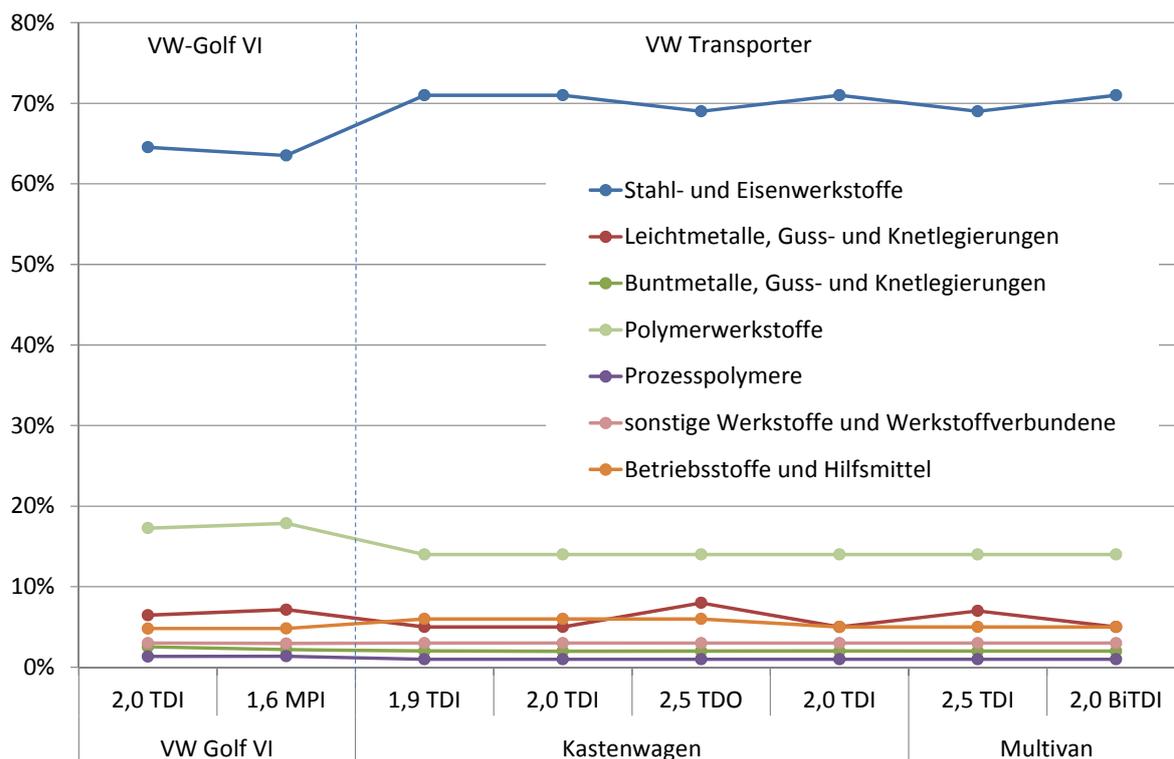


Abbildung 4: Werkstoffanteile VW Golf und VW-Transporter nach [VW 2008] und [VW 2010b]

Zur Materialbilanz leichter Nutzfahrzeuge liegen nur wenige Angaben vor. In [Öko Institut 2009] wird die Materialverteilung daher analog zu großen Diesel-Pkw angenommen. Auch die Anteile verschiedener Werkstoffgruppen in den Umweltbilanzen von VW ([VW 2008] [VW 2010b]) zeigen für verschiedene leichte Nutzfahrzeuge nur geringe Abweichungen in der Materialzusammensetzung gegenüber einem mittleren Pkw (vgl. Abbildung 4). Es zeigt sich jedoch systematisch ein höherer Anteil von Stahl- und Eisenwerkstoffen zu Lasten des Einsatzes von Polymerwerkstoffen. Auf dieser Basis wird der Materialeinsatz bei leichten Nutzfahrzeugen entsprechend Tabelle 5 angepasst. Der angenommene Anteil an Sekundärmaterialien ist in Tabelle 6 dokumentiert. Energieeinsatz und Transporte für die Fertigung des Fahrzeugs beruhen auf Daten aus [Ecoinvent 2008] für einen Golf IV.

Tabelle 5 Abweichungen der Materialanteile nach Fahrzeugtyp

	Aluminiumeinsatz	Polymerwerkstoffe	Stahl
Pkw klein	5,7 %	18 %	64,5 %
Pkw mittel	7,2 %	18 %	63 %
Pkw groß	7,9 %	18 %	62,3 %
Leichtes Nutzfahrzeug	5 %	14 %	69,2 %
Quelle: IFEU auf Basis [Öko Institut 2009] (gerundete Werte)			IFEU 2011

Tabelle 6: Anteil Sekundärmaterialien

	Sekundärmaterial
Aluminium	32 %
Kupfer	44 %
Blei	75 %
Platin	5 %
Quelle: [Ecoinvent 2008]	IFEU 2011

Zusätzlich gibt es Unterschiede zwischen den Fahrzeuggrößen im Einsatz der Platingruppenmetalle Platin und Palladium, die in der Abgasnachbehandlung verwendet werden. Da Abgasnachbehandlung nur bei Verbrennungs-Pkw eingesetzt wird, ist der Platineinsatz auch im Vergleich der Antriebskonzepte von Bedeutung. Hier werden die Materialanteile nach [Öko Institut 2009] zugrunde gelegt und auf die Gewichte der bilanzierten Fahrzeuge angewendet (Tabelle 7). Diese wurden zwar für das Bezugsjahr 2005 (Euro-4) ermittelt, aktuellere Daten zu Euro-5 und Euro-6-Pkw lagen jedoch nicht vor.

Tabelle 7 Einsatz von Platin und Palladium

	Otto		Diesel
	Platin	Palladium	Platin
Pkw klein	0,5 g	1 g	2 g
Pkw mittel	0,5 g	2,5 g	4 g
Pkw groß	0,5 g	5 g	7,5 g
Leichtes Nutzfahrzeug	0,5 g	5 g	7,5 g
Quelle: Berechnung auf Basis von [Öko Institut 2009] (gerundete Werte)			IFEU 2011

Szenarien 2030

Im Fahrzeugbau sind vielfältige Entwicklungen denkbar, diese sind jedoch nicht Fokus dieser Studie. In den Szenarien werden folgende Änderungen bei den Fahrzeugen berücksichtigt: Strommix 2030 für die Fahrzeugfertigung sowie Reduzierung des Materialeinsatzes und damit des Fahrzeuggewichtes durch Leichtbau. In allen Szenarien wird der durchschnittliche deutsche Strommix 2030 (siehe Kapitel 6.1.2) für die Fertigung des Fahrzeugs angesetzt. Die Fertigung umfasst dabei die Montage im Werk. Der zur Gewinnung und Verarbeitung der Materialien eingesetzte Strom wird dagegen nicht variiert, da diese Prozesse nur zum Teil in Deutschland stattfinden.

Die zukünftige Entwicklung des Fahrzeuggewichtes ist noch nicht absehbar. In der Vergangenheit ist das Fahrzeuggewicht durch steigende Komfort- und Sicherheitsansprüche gestiegen. Zukünftige Anforderungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs dürften dem entgegenwirken. Im konservativen Fall wird von gleichbleibendem Materialeinsatz und damit Fahrzeuggewicht ausgegangen; im moderaten Fall von Aluminium-Leichtbau in der Karosserie. In einem innovativen Fall werden zusätzliche sekundäre Effekte wie z.B. Motordownsizing berücksichtigt:

- Nach Angaben des International Aluminium Institut ([Alcan 2004]) werden zwischen 0,5 und 0,8 kg Aluminium benötigt um 1 kg Stahl zu ersetzen. In dieser Studie wird darauf basierend ein Wert von 0,6 angesetzt. Die sich daraus ergebende Gewichts Differenz zwischen konservativem und moderatem Szenario von 14 % (Tabelle 8) stimmt gut mit Angaben in [JICA 2003] überein, wo das Alu-Leichtbaupotential eines typischen Mittelklasse-Pkw untersucht wird.

- Durch das verringerte Fahrzeuggewicht reduziert sich die Belastung einzelner Fahrzeugkomponenten (v.a. Karosserie, Fahrwerk und Motor), bei denen sich somit (sekundäre) Materialeinsparungen realisieren lassen. Die Grundlage für deren Modellierung in eLCAr bilden die Ergebnisse von [ika 2003]. Die Einsparung wurde dabei gleichmäßig auf Karosserie, Fahrwerk und Motor aufgeteilt. Insgesamt ergibt sich damit durch primäre und sekundäre Leichtbaumaßnahmen beim mittleren Pkw eine Gewichtsreduktion um 24 %.

Tabelle 8: Szenarioausprägungen für die Herstellung des Rumpffahrzeugs

	Konservativ	Moderat	Innovativ
Energiemix Fertigung	Energiemix 2030	Energiemix 2030	Energiemix 2030
Materialeinsatz	Unverändert	Reine Aluminium Karosserie (Gewichtsreduktion 14 %*)	+ sekundäre Gewichtsreduzierung (Gewichtsreduktion 24 %*)
* bezogen auf den mittleren Pkw			IFEU 2011

4.1.2 Wirkungsabschätzung konventioneller Otto- und Diesel-Fahrzeuge

Abbildung 5 zeigt die Treibhausgasemissionen zur Herstellung der betrachteten Fahrzeugtypen für den Stand 2010. Die Ergebnisse für konventionelle Otto- und Diesel-Fahrzeuge werden, entsprechend des Anteils am Gesamtgewicht, von der Herstellung des Fahrzeugumpfes dominiert und liegen zwischen 5 und 8 Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Fahrzeug. Die Unterschiede zwischen Otto- und Diesel-Fahrzeugen sind gering, da von überwiegender Baugleichheit der Fahrzeuge ausgegangen wird³.

Im Vergleich mit einigen Herstellerbilanzen für typische Fahrzeugmodelle wird diese Größenordnung bestätigt (siehe Abbildung 6): So liegen die Ergebnisse für das mittlere Fahrzeug bei der Klimawirkung nur geringfügig unter den Volkswagen-Ergebnissen für den Golf ([VW 2008]), der Mercedes A150 ([Daimler 2008]) liegt demgegenüber ein wenig niedriger. Die Klimabilanz des großen Pkw stimmt nahezu exakt mit der Bilanz der Mercedes E-Klasse ([Daimler 2009]) überein. Das hier bilanzierte leichte Nutzfahrzeug (1.849 kg Leergewicht) wird dem Volkswagen Transporter ([VW 2010b]) gegenübergestellt und liegt entsprechend des Materialeinsatzes etwa zwischen der Version als Kastenwagen (1.710 kg Leergewicht) und dem Multivan (2.185 kg Leergewicht).

Bei den anderen Umweltwirkungskategorien ergibt sich tendenziell ein ähnliches Bild, insbesondere beim kumulierten Energieaufwand, der fast ausschließlich von nicht erneuerbaren Energien geprägt ist. Es zeigen sich aber starke Unterschiede im Beitrag der einzelnen Komponenten (Abbildung 7):

- Bei der Versauerung und dem Sommersmog haben die Zusatzbauteile einen hohen Anteil, der auf den Platin- und Palladium-Einsatz in der Abgasnachbehandlung zurückgeht. Hier gibt es auch relevante Unterschiede zwischen Otto- und Diesel-Pkw, die auf den Palladium-Einsatz in Otto-Pkw zurückgehen.
- Eutrophierung und Feinstaubemissionen werden überwiegend durch die Herstellung des Fahrzeugumpfes verursacht.

³ Zwar sind in der Fahrzeugflotte Diesel-Pkw in der Regel schwerer als Otto-Pkw, dies geht aber u.a. auf eine höhere Motorisierung zurück. Bei gleicher Motorisierung nähert sich das Fahrzeuggewicht in vielen Fällen an.

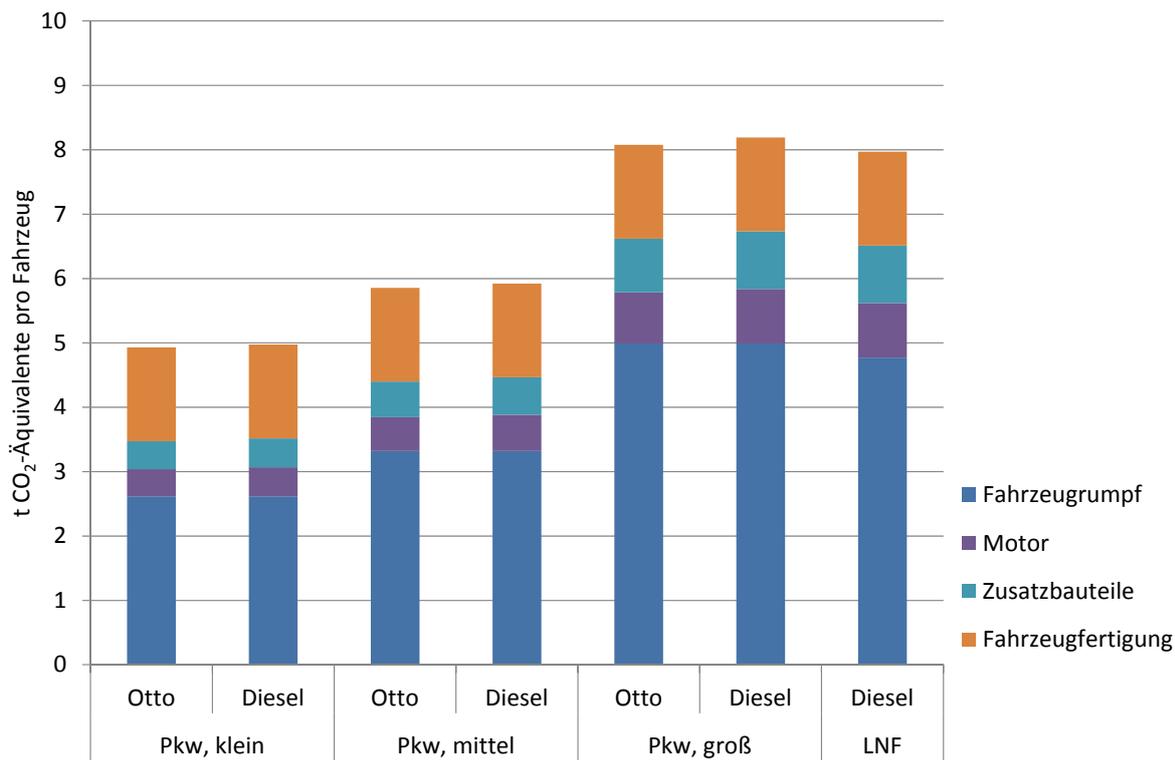


Abbildung 5: Treibhausgasemission der Herstellung konventioneller Pkw (2010)

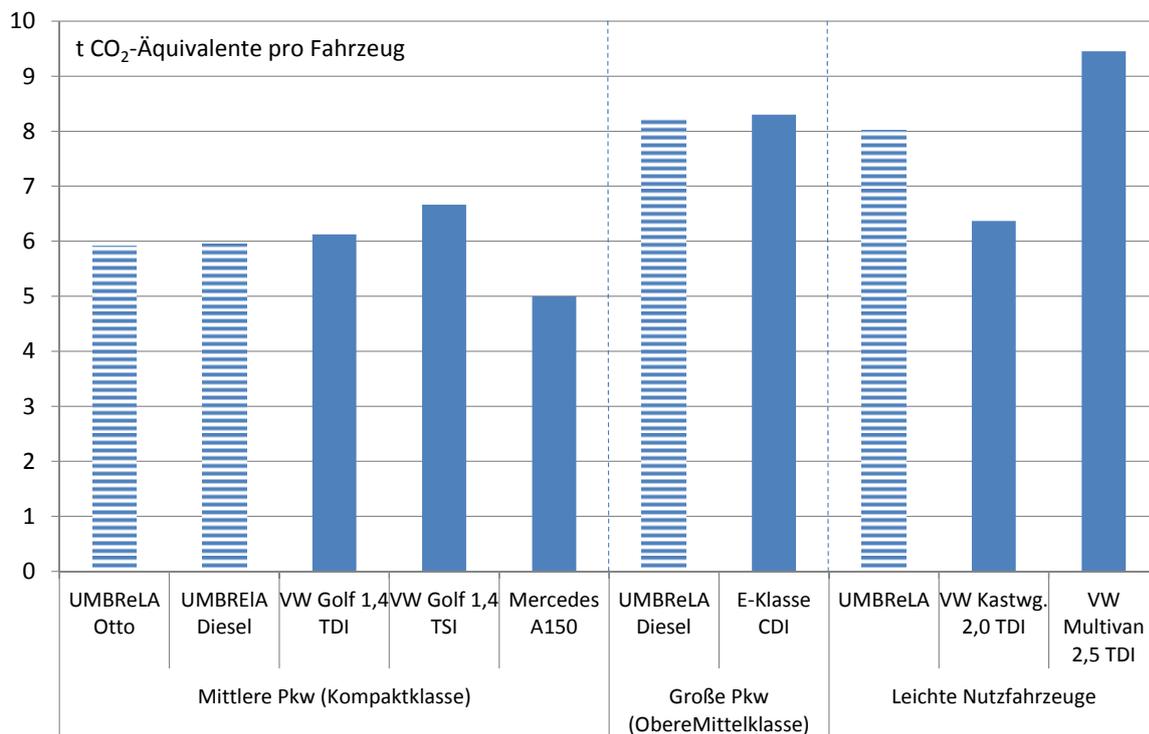


Abbildung 6: Vergleich der Treibhausgasbilanz mit Herstellerbilanzen ([VW 2008], [VW 2010b], [Daimler 2008], [Daimler 2009])

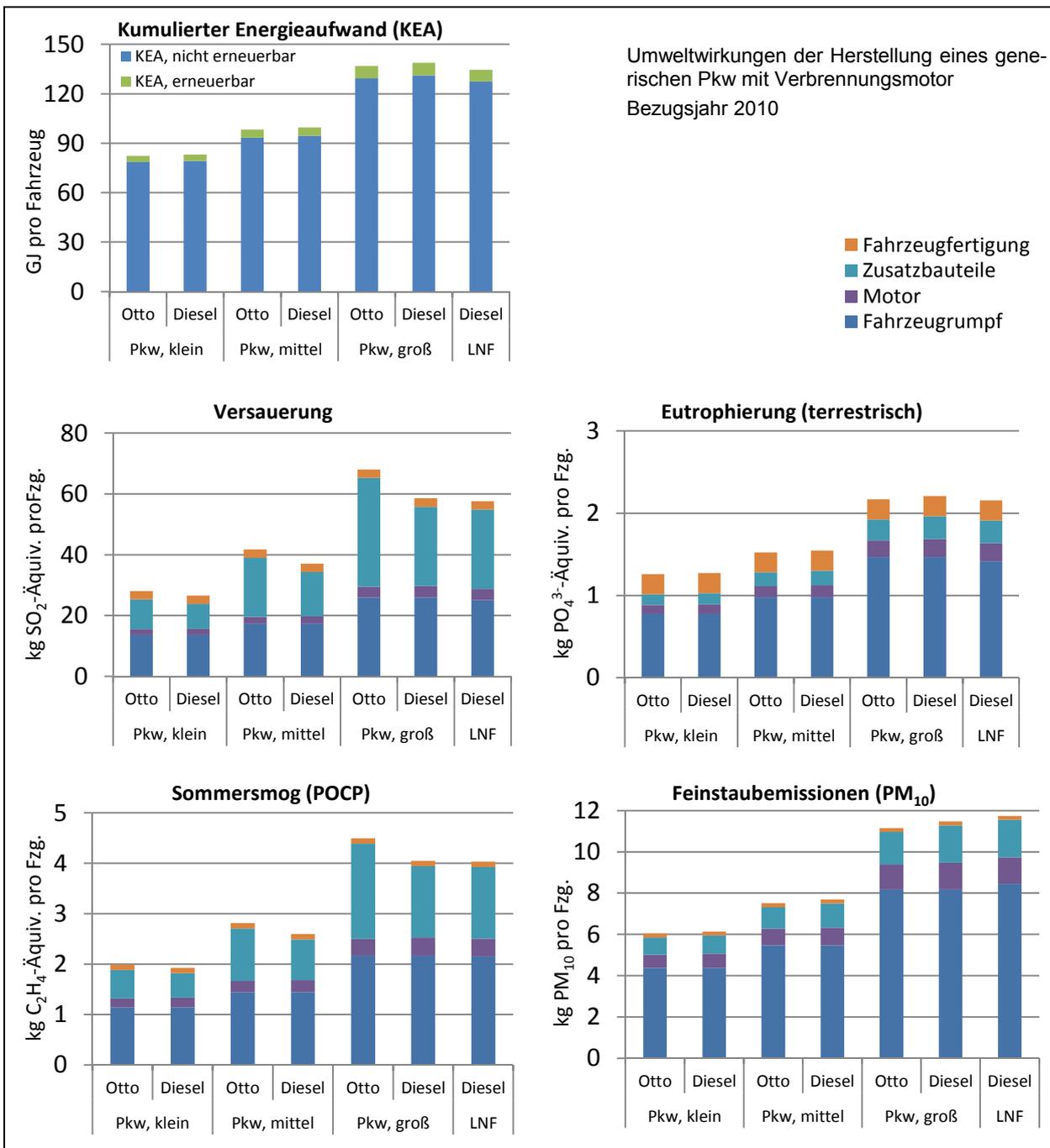


Abbildung 7: Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung für verschiedene Fahrzeugtypen

Zukünftig sinken auf der einen Seite die mit der Fertigung verbundenen Treibhausgas-Emissionen durch steigende Anteile erneuerbarer Energien im Strommix (siehe Konservatives Szenario in Abbildung 8), die Minderung ist jedoch relativ gering bezogen auf die gesamte Klimawirkung. Durch den Aluminium-Leichtbau (Aluminium ersetzt Stahl) im moderaten Szenario erhöht sich die Klimawirkung der Fahrzeugherstellung dagegen deutlich. Auf der anderen Seite verringert sich der Energieverbrauch in der Nutzungsphase (siehe Kapitel 5.3). Durch weiteren, sekundären Leichtbau sinkt die Klimawirkung der Fahrzeugherstellung dann wieder etwas, liegt aber immer noch über dem konservativen Fahrzeug mit Stahl-Karosserie. Ein ähnliches Muster zeigt sich bei den anderen Wirkungskategorien (Abbildung 9), die Unterschiede zwischen den Szenarien sind dabei gering.

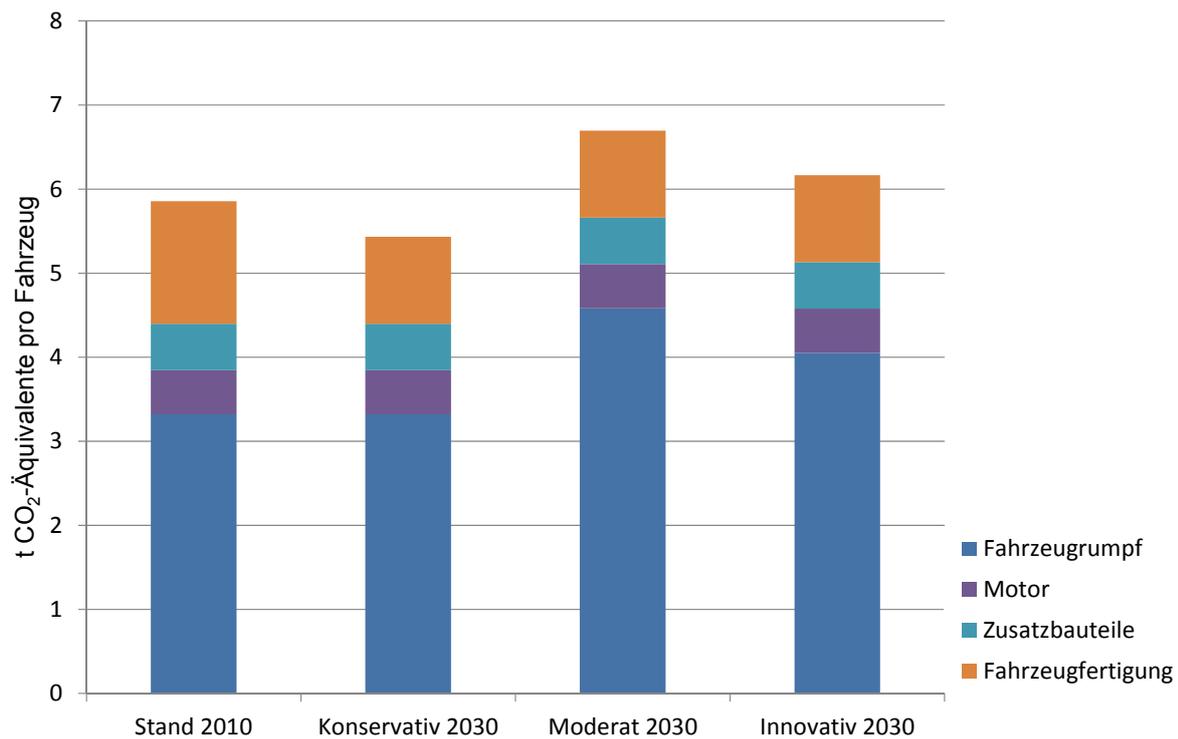
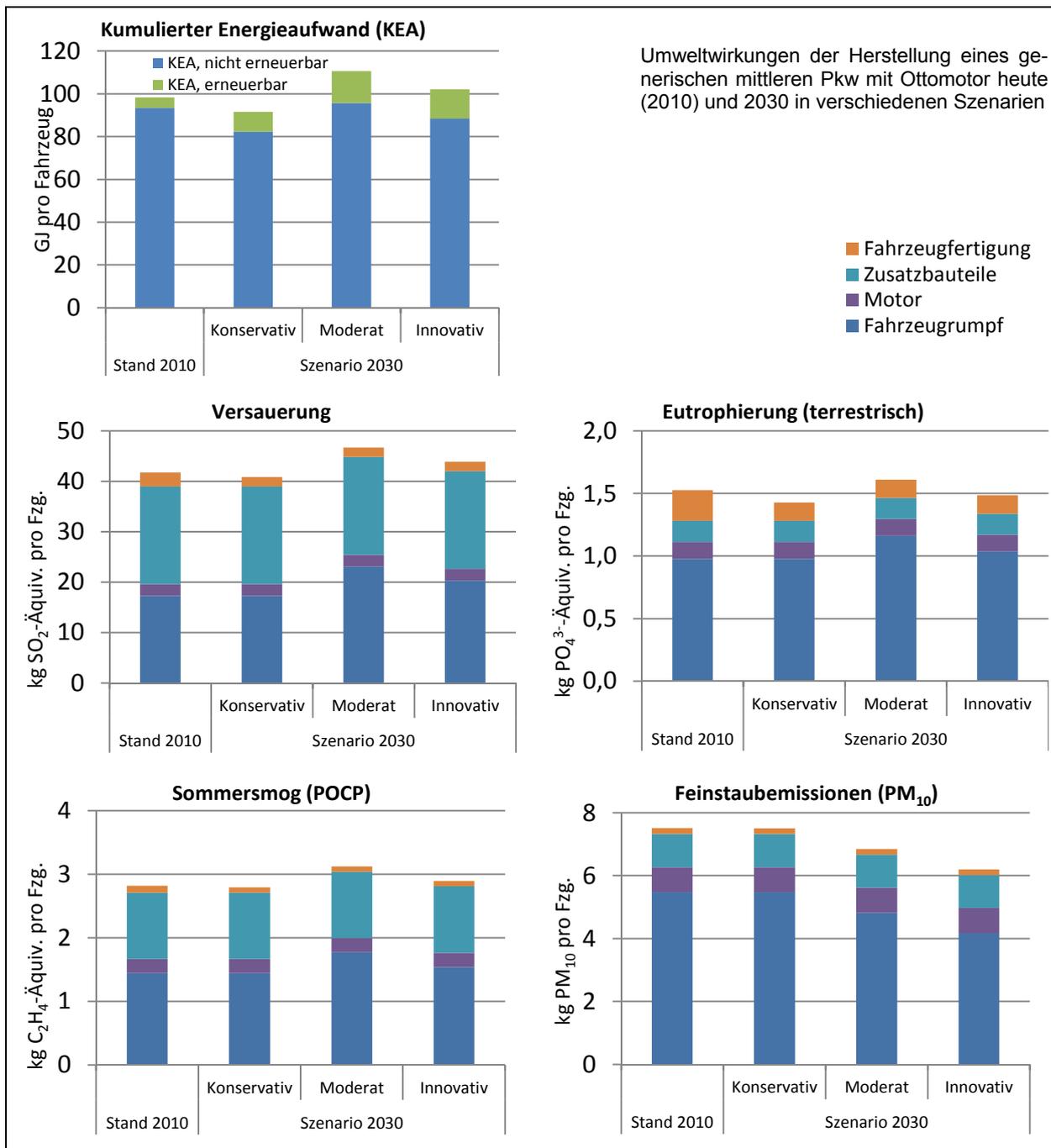


Abbildung 8: Szenarien der Treibhausgasemissionen mittlerer Otto-Pkw



Umweltwirkungen der Herstellung eines generischen mittleren Pkw mit Ottomotor heute (2010) und 2030 in verschiedenen Szenarien

Abbildung 9: Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung (Pkw-Otto, mittel) in Szenarien für 2030

4.2 Batterien

4.2.1 Grundlagendaten und Szenarioausprägungen für die Sachbilanz

Bezugsjahr 2010

Wichtige Grundlage der Bilanzierung der Lithium-Ionen-Batterie für das Jahr 2010 sind primäre Herstellerdaten, die durch Geheimhaltungsvereinbarungen geschützt sind. Es werden daher keine Hersteller oder auch batterietypspezifischen Ergebnisse dargestellt. Die hier dargestellten Bilanzergebnisse repräsentieren den Mittelwert der betrachteten Lithium-Eisenphosphat- (LFP), Nickel-Kobalt-Aluminium- (NCA) und Nickel-Mangan-Kobalt-Batterie (NMC). Berücksichtigt wurden die Materialherstellung, -verarbeitung und Fertigung für die Zellen sowie das Batteriemangement und -gehäuse. Zusätzlich werden Energieeinsatz und Transportprozesse für die Fertigung bilanziert.

Die Energieverbräuche der Batterie- und Zellherstellung sind mit etwa 30 % der Treibhausgasemissionen (bezogen auf die gesamte Batterieherstellung) relevant. Die zugehörigen Strom- und Wärmeverbräuche hängen dabei vor allem vom Automatisierungsgrad der Fertigung ab. Es wurde für alle berücksichtigten Batterietypen von einer modernen Serienfertigung ausgegangen.

Ein wichtiger Parameter für den Materialeinsatz ist die Energiedichte der Batterien. Angaben hierzu zeigen eine große Bandbreite: Während in der Wissenschaft und Entwicklung bereits heute Batteriedichten von über 100 Wh/kg auf Batterieebene für möglich gehalten werden (siehe z.B. [Köhler 2011], [Garce et al. 2008]), liegt die Energiedichte der in den aktuellen Flottenversuchen verwendeten Batterien zwischen 60 und 80 Wh/kg ([Daimler 2011a], [Daimler 2011b], [VW 2011], [Ruf 2011]). Größere Batterien können dabei als komplettes System eine höhere Energiedichte erreichen, da der Anteil des Gehäuses am Gewicht abnimmt. Die Flottenversuchsfahrzeuge basieren in der Regel auf konventionellen Fahrzeugplattformen, so dass z.T. ein erhöhter Anpassungs- und Sicherheitsaufwand notwendig ist. Für das Bezugsjahr 2010 gehen wir für Elektrofahrzeuge von 70 Wh/kg aus.

Weiterhin ist die Haltbarkeit der Batterie für die Umweltbilanz über den Lebensweg von Bedeutung. Hersteller garantieren heute etwa 5 Jahre bzw. 50.000 bis 100.000 km ([ADAC 2011]). Dies stellt aber wahrscheinlich eher die Untergrenze der zu erwartenden Lebensdauer dar. Nach Literaturangaben sind etwa 5.000 Zyklen bei einem Kapazitätsverlust von 20 % möglich. Damit lassen sich mit einer 24 kWh Batterie Pkw-Fahrleistungen von weit über 400.000 km realisieren.

Entscheidender ist daher die kalendarische Lebensdauer. Die mittlere Lebensdauer eines Pkw in Deutschland liegt nach [KBA 2011b] bei gut 12 Jahren⁴. Erwartet man eine 8jährige Lebensdauer der Batterie, sind statistisch 1,5 Batterien über das Fahrzeugleben in Deutschland notwendig. Dieser statistische Wert wird für 2010 angewendet, da einige Fahrzeuge kürzer genutzt werden und dabei eventuell mit einer Batterie auskommen, während länger genutzte Fahrzeuge zwei Batterien benötigen.

⁴ Durchschnittsalter der in der KBA Statistik 2006 gelöschten Fahrzeuge. Ab 2007 werden vom KBA in dieser Statistik auch vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge geführt. Ein Rückschluss auf die Lebensdauer der Fahrzeuge ist also nicht mehr möglich.

Tabelle 9: Herstellergarantien und Literaturangaben zur Batteriehaltbarkeit

Quelle	Km oder Zyklen	Jahre
Herstellergarantien ([ADAC 2011])		
Citroen, Peugeot	50'000 km	5
Mitsubishi, Nissan, Renault	100'000 km	5
Literaturangaben		
[Zhan & Wang 2009]	>5000*	
[Peterson et al. 2010]	>5000*	
[Roscher et al. 2011]	3000**	
* 20 % Kapazitätsverlust/** 10 % Kapazitätsverlust		IFEU 2011

Szenarien 2030

Verschiedene Batterietypen werden als zukunftssträftig diskutiert, eine Festlegung und Fortschreibung einer heute existierenden Technologie ist jedoch vor dem Hintergrund der dynamischen Entwicklung nicht sinnvoll. Vergleiche zwischen den betrachteten Batterietypen haben gezeigt, dass die durch die Materialzusammensetzung bedingten Unterschiede vor allem bei den Treibhausgasemissionen gering sind. Daher wird die mittlere Materialzusammensetzung der für 2010 betrachteten Batterietypen auch für 2030 angesetzt. Zur Abschätzung der zukünftigen Umweltwirkungen werden deutliche Verbesserungen für die im Fertigungsprozess eingesetzte Energie (Strommix) sowie bezüglich der Energiedichte und der Haltbarkeit der Batterie angenommen:

- Allen Szenarien liegt der Strommix 2030 (siehe Kapitel 6.1.2) für die Fertigung zugrunde
- Theoretisch sind beim Aktivmaterial Energiedichten von über 400 Wh/kg möglich (siehe [Garche et al. 2008] und [Friedrich 2010]). In der Praxis kann jedoch in der Regel auf Systemebene deutlich weniger als die Hälfte dieser theoretischen Energiedichte realisiert werden (siehe [Garche et al. 2008], [Beermann et al. 2010]). Für 2030 wird in den Szenarien daher von Energiedichten zwischen 100 und 200 Wh/kg ausgegangen. 200 Wh/kg wird auch als Entwicklungsziel im ‚Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität‘ genannt ([Bundesregierung 2009]).
- Eine Verbesserung der kalendarischen Lebensdauer der Batterien ist wahrscheinlich. Daher nehmen wir im moderaten und günstigen Szenario an, dass eine Batterie den kompletten Lebensweg des Fahrzeugs abdeckt.

Tabelle 10: Szenarioausprägungen Batterieherstellung

	Konservativ	Moderat	Günstig
Strom Fertigung		--- Energiemix 2030 ---	
Materialzusammensetzung		--- wie 2010 ---	
Energiedichte	100 Wh/kg	150 Wh/kg	200 Wh/kg
Batteriebedarf (Anzahl) über das Fahrzeugleben (~12,5 Jahre)	1,5	1	1
			IFEU 2011

4.2.2 Wirkungsabschätzung der Batterieherstellung

Es werden exemplarische Umweltbilanzen für eine generische⁵ 24 kWh-Batterie dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf den gesamten Lebensweg eines Fahrzeugs, für das Bezugsjahr 2010 und im konservativen Szenario 2030 sind daher 1,5 Batterien berücksichtigt.

Die Treibhausgasemissionen (siehe Abbildung 11) durch die Batterie liegen heute im Bereich von gut 5 Tonnen. Verbessert sich die Haltbarkeit der Batterie soweit, dass eine Batterie das komplette Fahrzeugleben abdeckt und kann zumindest eine leichte Verbesserung der Energiedichte erreicht werden (100 Wh/kg), sinken die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung auf etwa 3,5 Tonnen. Verbessert sich die Energiedichte der Batterien weiter auf bis zu 200 Wh/kg, dann sinkt damit der Material- und Energieeinsatz, so dass mit der Batterieherstellung nur noch etwa 1,5 Tonnen-Treibhausgasemissionen verbunden wären.

Die Höhe der Treibhausgasemissionen zur Herstellung einer Batterie zeigt dabei nur geringe Variationen für die betrachteten Batterietypen⁶,

Die Zellherstellung trägt heute fast 50 % zu den Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung bei (siehe Abbildung 10). Transporte und Energieeinsatz zur Fertigung kommen auf ein knappes Drittel der Treibhausgasemissionen, insbesondere der Energieeinsatz ist auch unter Annahme einer modernen Serienfertigung relevant. Die Anteile von Batteriemangement und Batteriegehäuse sind dagegen mit 7 % und 14 % gering. Der Beitrag der Zellherstellung ist bei den anderen Wirkungskategorien noch größer und liegt bei der Versauerung z.B. bei 84 % (Abbildung 11).

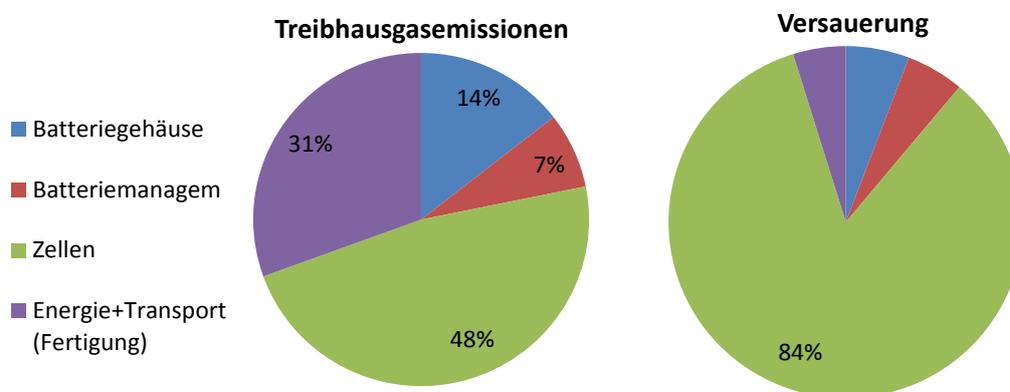


Abbildung 10: Anteile verschiedener Prozesse an der Batterieherstellung (2010)

⁵ Es handelt sich um die gemittelten Ergebnisse für verschiedene Batterietypen.

⁶ Da den Bilanzen teilweise geschützte Herstellerdaten zugrunde liegen, kann die Bandbreite für verschiedene Batterietypen nicht dargestellt werden.

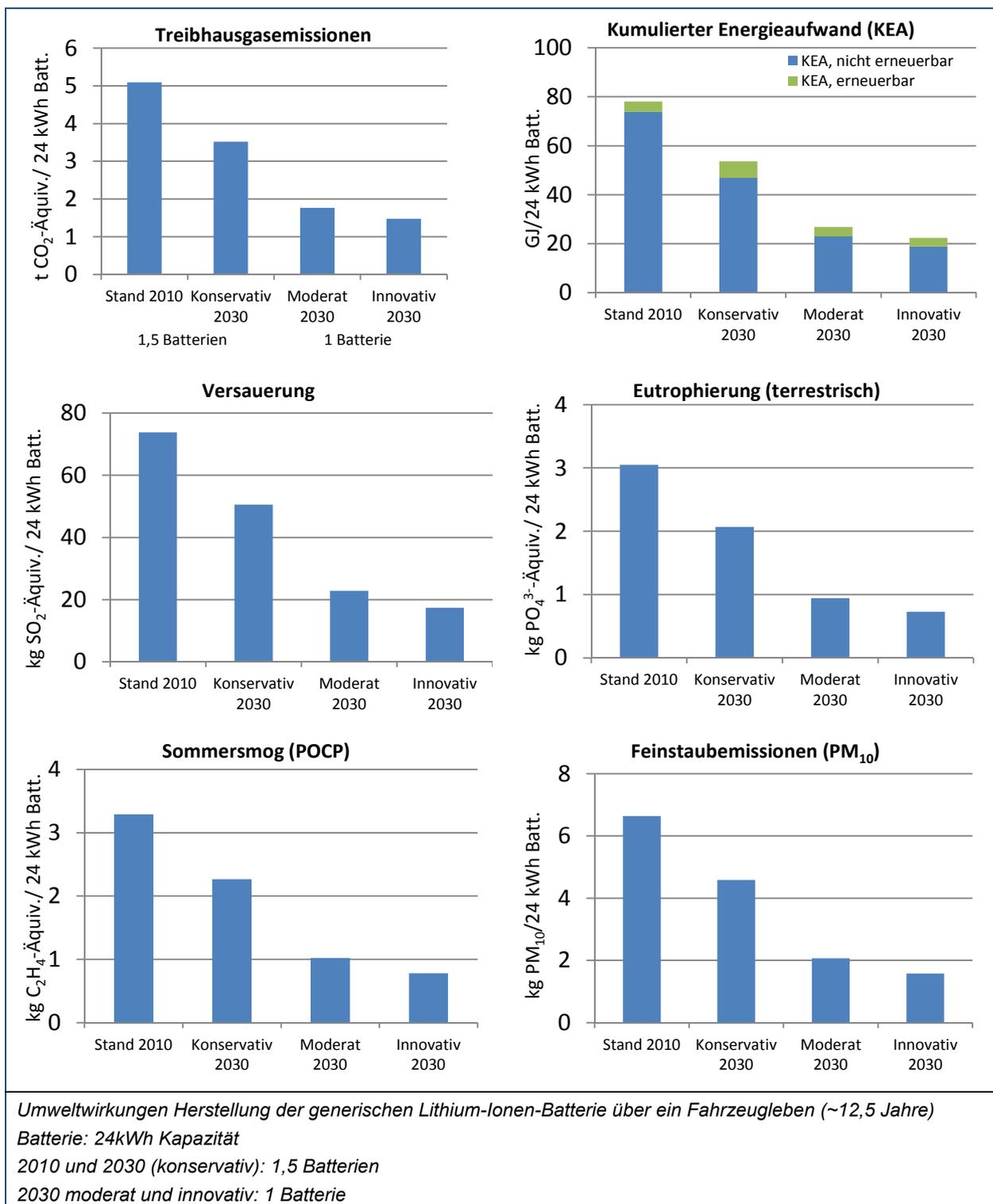


Abbildung 11: Umweltbilanzen für die Batterieherstellung

In Abbildung 12 werden die für Batterieherstellung in verschiedenen Literaturquellen ermittelten Treibhausgasemissionen dargestellt. Da in Studien Batterien unterschiedlicher Kapazitäten betrachtet wurden, werden jeweils die Treibhausgasemissionen pro kWh angegeben. Die Bandbreite der Literaturwerte ist groß; wichtige Faktoren sind dabei der Batterietyp, Energieeinsatz, Batteriedichte und methodische Ansätze der Bilanzierung.

So liegen die Treibhausgasemissionen der Batterie in [Notter 2010] deutlich niedriger als in den anderen Quellen. Hier wird auch die Energiedichte mit 114 Wh/kg deutlich höher

angesetzt. Auch zwischen verschiedene Batterietypen zeigen Literaturdaten deutliche Unterschiede, wie die Bilanzierung einer Lithiumeisenphosphat (LFP) und einer Nickel-Cobalt-Aluminium-Batterie (NCA) von [Bauer 2010] zeigt. Liegt die LFP noch in der gleichen Größenordnung wie die Ergebnisse dieser Studie, werden die Treibhausgasemissionen der NCA-Batterie mehr als doppelt so hoch angegeben.

Insgesamt liegen die Ergebnisse dieser Studie im Mittelfeld der Literaturangaben. Um den Einfluss der Bandbreite auf die Ergebnisse abzuschätzen, werden im Folgenden zusätzliche Sensitivitätsbetrachtungen durchgeführt.

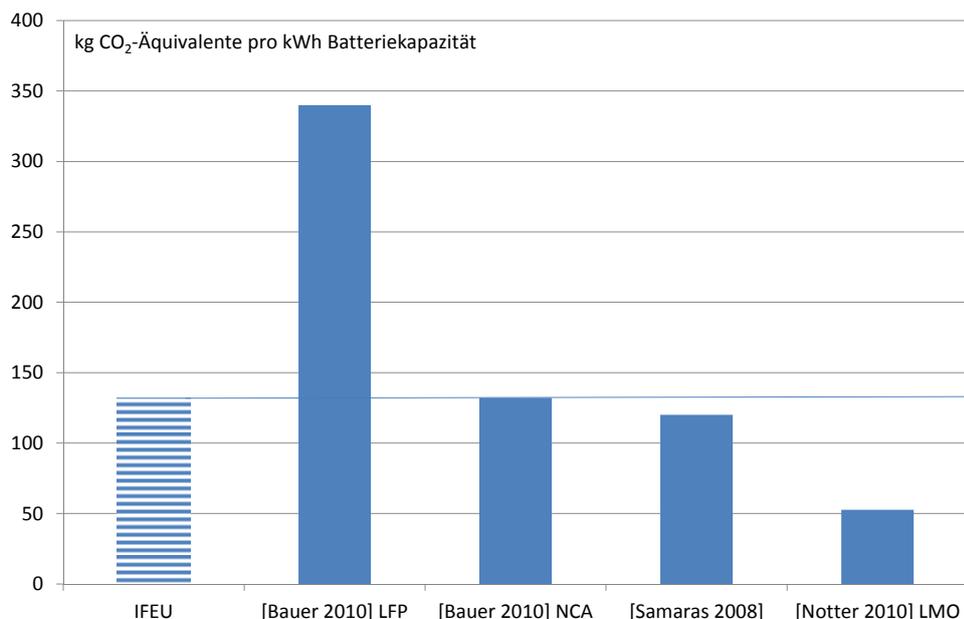


Abbildung 12: Quellenvergleich für die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung

4.2.3 Sensitivitäten der Batterieherstellung

Die Ergebnisse zeigen, dass die Umweltwirkungen einer Batterie primär durch Materialzusammensetzung und Gewicht beeinflusst sind. Energiedichte und -kapazität der Batterie sowie deren Nutzung und Haltbarkeit sind daher wesentliche Parameter:

- Abbildung 13 zeigt die Treibhausgasemissionen, die mit der Herstellung einer Batterie (24 kWh) verbunden sind. Geht man für den heutigen Stand von einer Energiedichte zwischen 70 und 100 Wh/kg aus, führt dies zu Emissionen zwischen 3,9 und 2,7 Tonnen CO₂-Äquivalenten. In den hier angesetzten Szenarien für 2030 sinken die Treibhausgasemissionen jedoch deutlich mit steigender Energiedichte.
- Abbildung 14 zeigt die spezifischen Treibhausgasemissionen der Batterie pro gefahrenen Kilometer. Diese sinken zunächst mit der Lebenslaufleistung deutlich, d.h. die Aufwendungen der Batterieherstellung schreiben sich besser über die Laufleistung ab. Wird jedoch nach 8-10 Jahren ein Batteriewechsel fällig, steigen die Treibhausgasemissionen pro Kilometer sprunghaft an. Nicht berücksichtigt ist in dieser Darstellung die Möglichkeit der weiteren Batterienutzung, z.B. im stationären Bereich.
- Je größer die Batterie, desto höher die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung. Bei höherer Reichweite des Elektrofahrzeugs nimmt damit auch der Aufwand der Batterieherstellung zu. So bleiben heutige Elektrofahrzeuge deutlich hin-

ter der Reichweite konventioneller Pkw zurück (siehe Abbildung 15). Soll die Reichweite über 100 km hinausgehen, dann steigt auch die Batteriegröße und damit die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung deutlich über das in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellte Niveau hinaus an. Bei Fahrzeugen mit Range Extender wird die Reichweite durch den Kraftstofftank noch einmal deutlich erweitert.

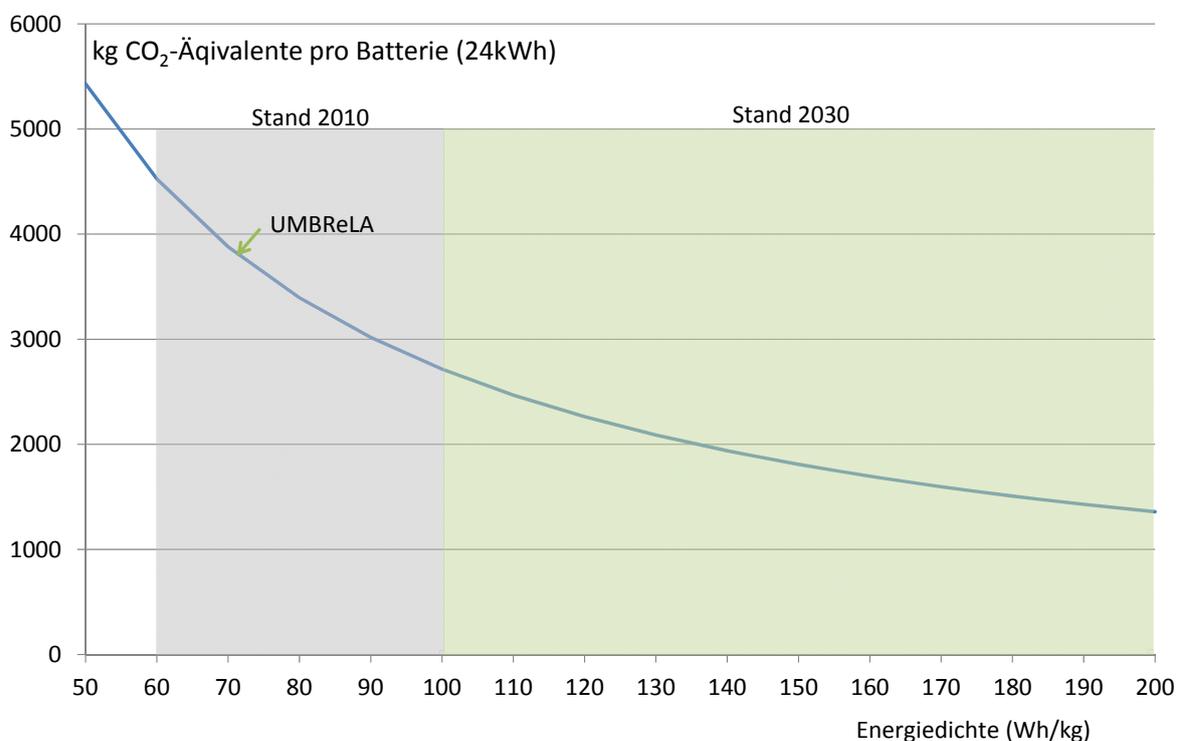


Abbildung 13: Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung nach Energiedichte

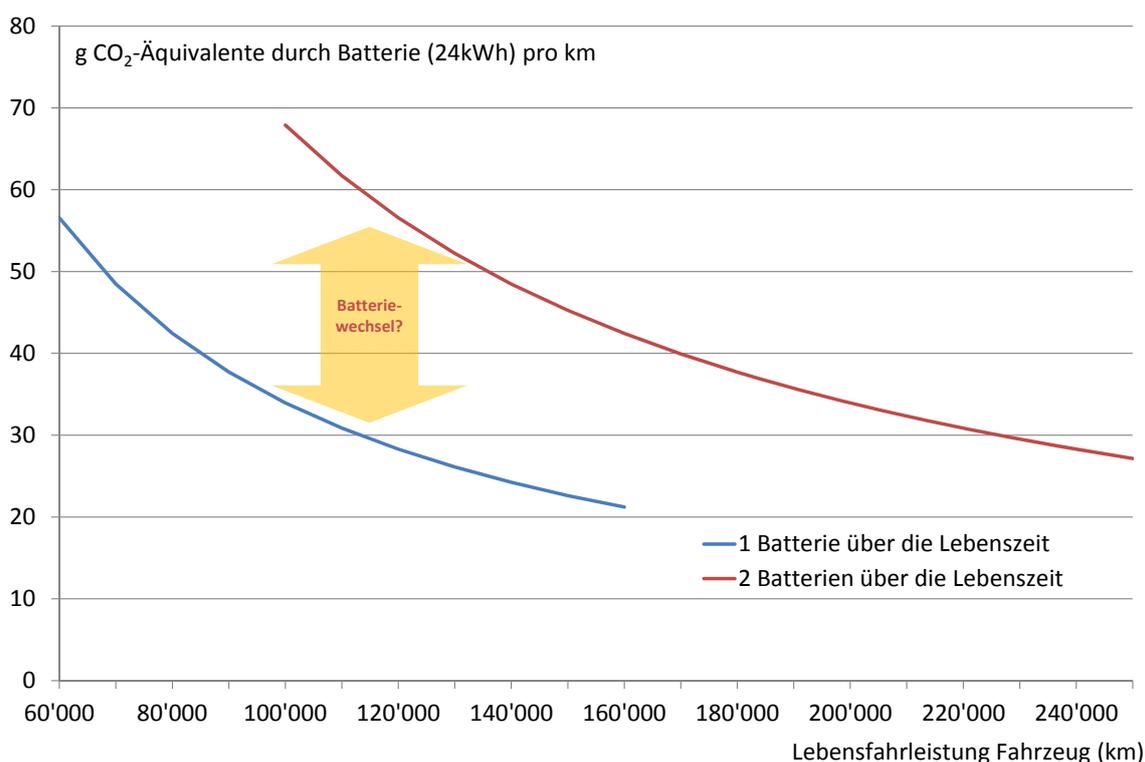
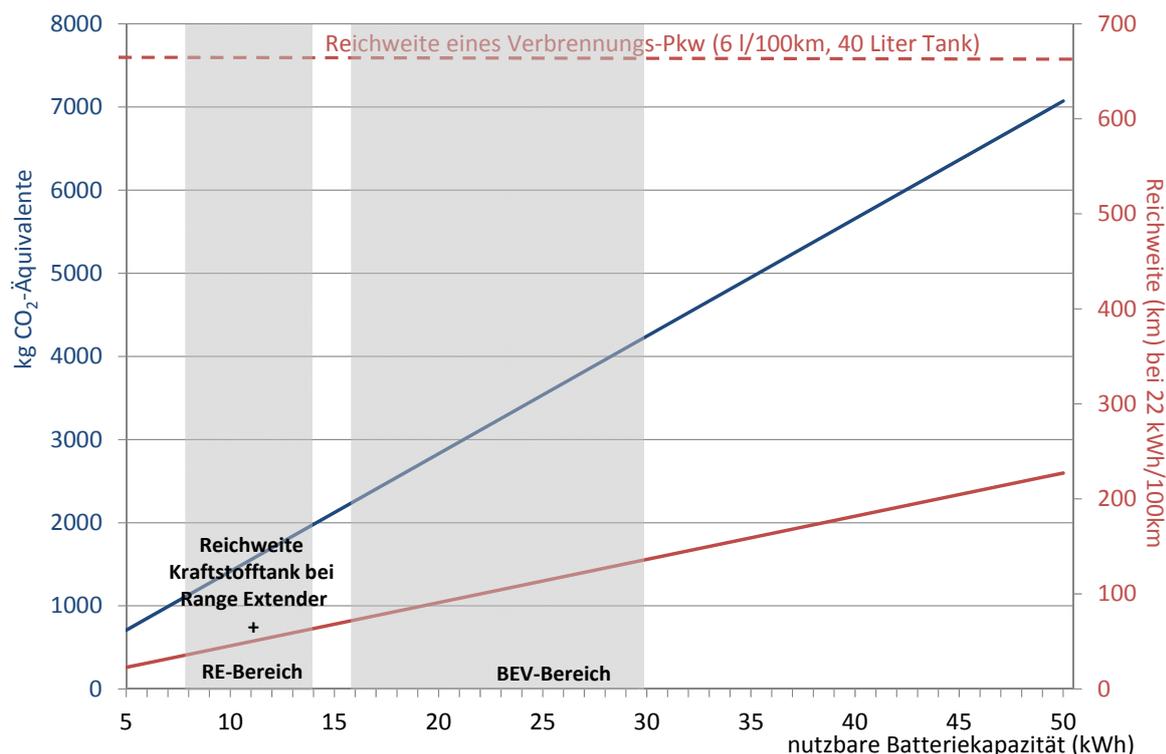


Abbildung 14: Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung nach Fahrleistung und Batterieanzahl



Lesebeispiel: Mit einer Steigerung der Reichweite eines BEV (rote Linie) von 100km (22kWh nutzbare Kapazität) auf 150km (33kWh nutzbare Kapazität) steigen auch die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung (blaue Linie) von gut 3 Tonnen auf fast 5 Tonnen an.

Abbildung 15: Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung nach Speicherkapazität

4.3 Elektrofahrzeuge

4.3.1 Grundlegenden Daten und Szenarioausprägungen für die Sachbilanz

Das Elektrofahrzeug setzt bilanziell auf den gleichen Fahrzeugrumpf auf, wie das konventionelle Fahrzeug. Abweichende Komponenten wie der Motor und die Zusatzbauteile werden separat bilanziert. Daten hierzu stammen von Volkswagen ([VW 2010a]), wobei die Materialbilanz des Elektromotors nach [Ecoinvent 2008] angesetzt wird. Die Gewichts- und Materialzusammensetzungen der antriebsspezifischen Bauteile sind in Tabelle 40 zusammengefasst.

Zusätzlich ist eine Batterie (über den Lebensweg ggf. mehrere) erforderlich: Die angenommenen Batteriekapazität orientiert sich an verschiedenen aktuellen Modellen (siehe Tabelle 11) und ermöglicht für alle betrachteten Fahrzeuge unter Berücksichtigung des für 2010 ermittelten praxisnahen Verbrauchs (siehe Abschnitt 5.3.5) eine Reichweite von knapp 100 km. Eine solche Reichweite wird für viele alltägliche Nutzungen als ausreichend angesehen.

Bei den aktuellen BMU-Flottenversuchen ermöglichen nur die im Mini-E-Versuch verwendeten Batterien eine deutlich größere Reichweite von bis zu 180 km. Trotzdem lag die mittlere tägliche Fahrleistung, an Tagen an denen das Fahrzeug auch tatsächlich genutzt wurde, im Mini E1.0 Vorhaben bei 33 km bzw. 37 km (2 Nutzungszeiträume) ([TU Chemnitz 2010]), d.h. die tatsächliche Reichweite wurde nur selten ausgenutzt. Für den Wirtschaftsverkehr werden tägliche mittlere Fahrleistungen zwischen 20 und 80 km angegeben ([Daimler 2011a]).

Für das Range-Extender-Fahrzeug (RE) wird die halbe Batteriekapazität, also etwa halbe Reichweite als ausreichend angesehen und ein Otto-Motor angenommen. Dies bestätigen auch aktuelle Flottenversuchsfahrzeuge (TwinDrive, REX). „Da der Range Extender ein Elektrofahrzeug ist und der Verbrennungsmotor selten zum Einsatz kommt, wird ein leichter und kostengünstigerer Ottomotor gegenüber dem Dieselmotor bevorzugt“ ([Daimler 2011b]). Überdies wird der Verbrennungsmotor 25 % kleiner ausgelegt als beim konventionellen Otto- und Diesel-Pkw, da er lediglich der Reichweitenverlängerung dient.

Bei Leistungsspitzen kann der Elektromotor auch in einem möglichen Direktantrieb zusätzliche Leistung bereitstellen. Das Fahrzeuggewicht der so definierten, generischen Elektrofahrzeuge ergibt sich aus dem Materialeinsatz für Fahrzeug und Batterie und stimmt dabei gut mit den Beispielfahrzeugen überein.

Tabelle 11: Batteriekapazität und Fahrzeuggewicht aktueller Elektrofahrzeuge

Fahrzeuggröße	Modell	Batteriekapazität	Fahrzeuggewicht
Beispiele Kleinwagen	Peugeot IOn	16 kWh	1080 kg
	Mitsubishi i-MiEV	16 kWh	1100 kg
	VW E-Up	18 kWh	1085 kg
	Citroen C-Zero	16 kWh	1110 kg
	Mini E	35 kWh	1465 kg
Beispiele Mittelklasse	Nissan Leaf	24 kWh	1525 kg
	Renault Kangoo Rapid Z.E.	22 kWh	1520 kg
Beispiele Lieferwagen	E-Vito	30 kWh	2150 kg
	E-Caddy (Maxi/KR)	16/24 kWh	2280 kg
Quellen: [ADAC 2011], [VCD 2011], [Daimler 2011a], [VW 2011]			IFEU 2011

Tabelle 12: Batteriekapazität und Fahrzeuggewicht der UMBReLA-Beispielfahrzeuge

Fahrzeug	Batteriekapazität	Fahrzeuggewicht in kg (Szenarien 2030)
Pkw (klein) BEV	18 kWh	1175 (1091-896-791)
Pkw (mittel) BEV	24 kWh	1485 (1374-1129-996)
Pkw (mittel) RE	12 kWh	1483 (*)
Pkw (groß) BEV	28 kWh	2105 (1975-1637-1451)
Pkw (groß) RE	14 kWh	2161 (*)
Lieferwagen	30 kWh	2161 (2021-1650-1453)
* es werden keine Szenarien betrachtet		IFEU 2011

4.3.2 Wirkungsabschätzung für Elektrofahrzeuge

Die Treibhausgasemissionen durch Herstellung von heutigen Elektrofahrzeugen liegen für kleine Pkw im Bereich von etwa 9 Tonnen und mittlere Pkw bei etwa 11 Tonnen CO₂-Äquivalenten (siehe Abbildung 16). Die Klimabilanz für große Pkw und leichte Nutzfahrzeuge fällt mit etwas über 14 Tonnen CO₂-Äquivalenten etwa gleich aus. Fahrzeuge mit Range-Extender zeigen in der Herstellung durch die deutlich kleinere Batterie auch geringere Treibhausgasemissionen von etwa 9 Tonnen für den mittleren und gut 12 Tonnen für den großen RE-Pkw.

Zukünftig verbessert sich diese Bilanz in allen Szenarien für 2030, wie in Abbildung 17 dargestellt. Höhere Emissionen durch Leichtbaumaterialien im Fahrzeugrumpf werden durch Fortschritte bei der Batterie überkompensiert. Durch die Leichtbaumaterialien sinkt zusätzlich der Energieverbrauch in der Nutzungsphase (siehe Kapitel 5.3). Die Treibhausgasemissionen der Herstellung eines mittleren Pkw sinken in den Szenarien von 11 auf 9 Tonnen im konservativen Szenario und auf unter 8 Tonnen im moderaten Szenario. Die Herstellung der Batterie trägt über den Lebensweg (1,5 Batterien) beim BEV nahezu 50 % zu den Treibhausgasemissionen bei, beim RE-Pkw liegt der Anteil bei nur etwa einem Drittel.

Die Ergebnisse für andere Umweltwirkungen (Abbildung 18) zeigen ebenfalls deutliche Verbesserungen. Da diese Umweltwirkungen insbesondere durch die Batterieherstellung verursacht werden, fällt die Verbesserung in den Szenarien noch deutlicher aus.

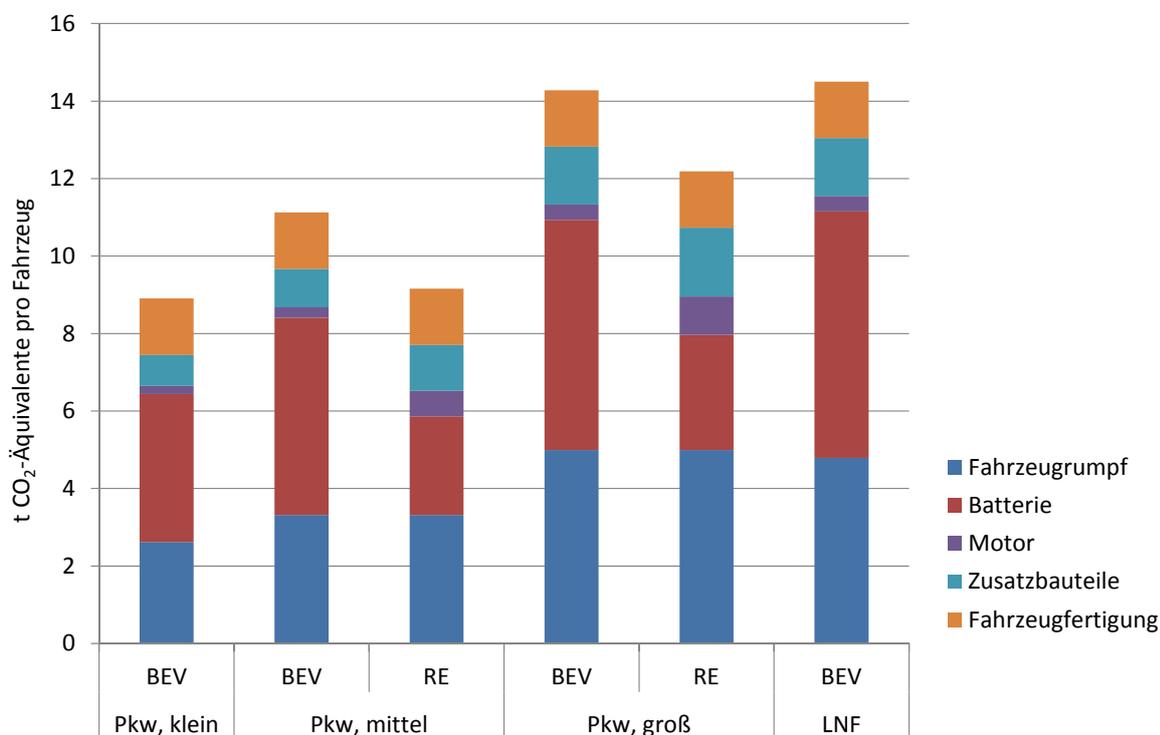


Abbildung 16: Treibhausgasemissionen der Herstellung von Elektrofahrzeugen 2010

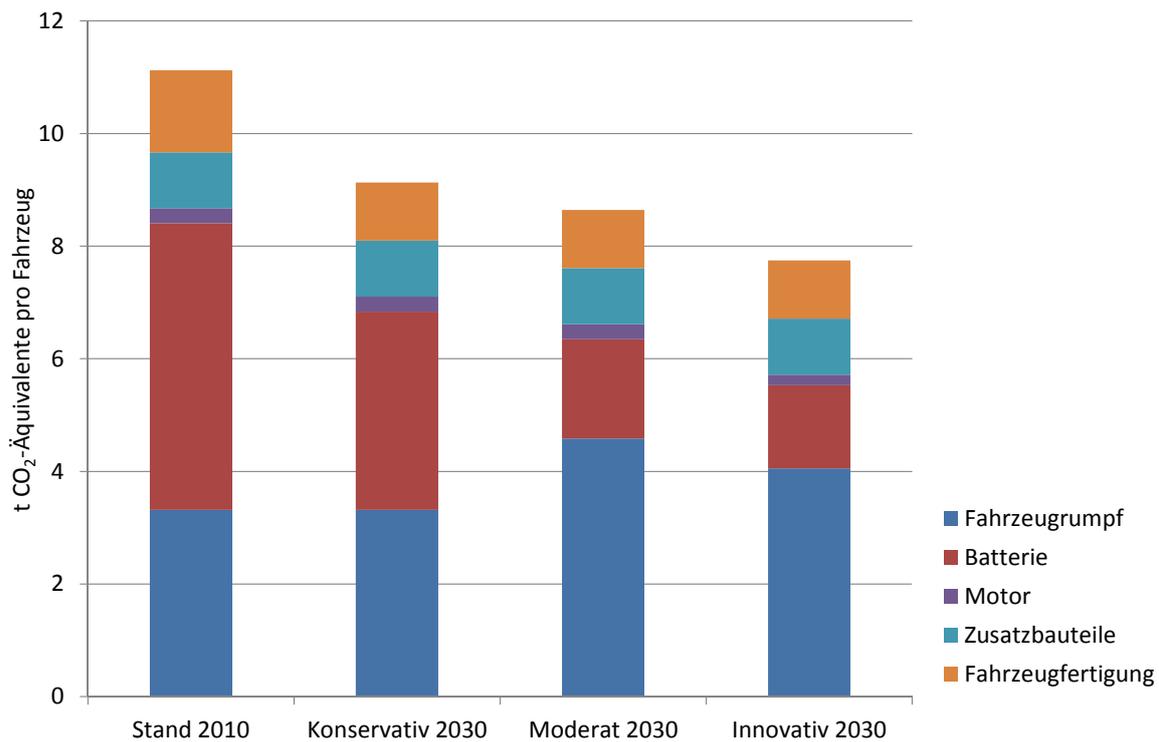


Abbildung 17: Treibhausgasemissionen der Herstellung eines mittleren Elektro-Pkw

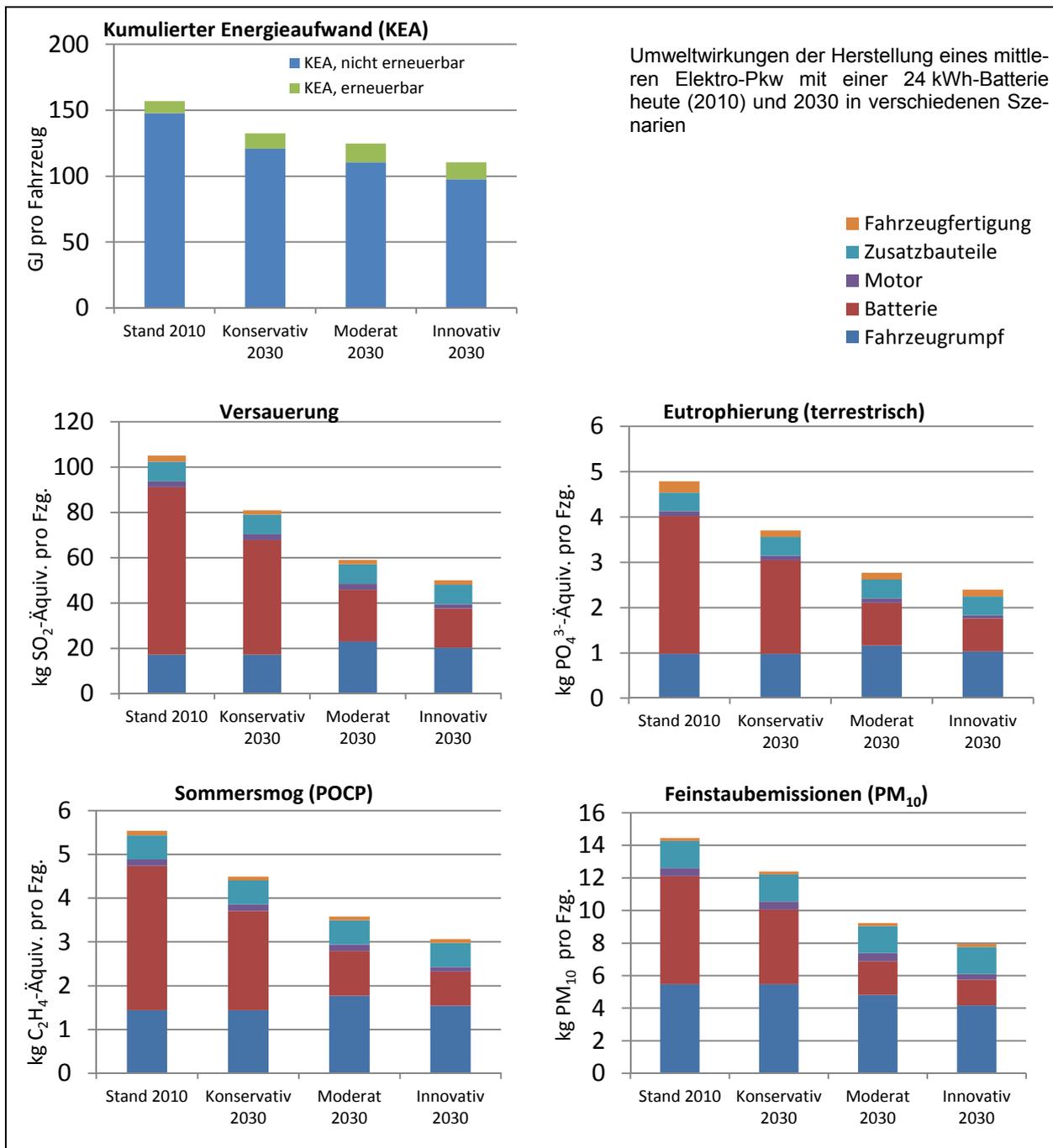


Abbildung 18: Umweltbilanzen der Herstellung eines Elektro-Pkw der Kompaktklasse

4.4 Brennstoffzellenfahrzeuge

Parallel zur dynamischen Entwicklung der Batterie gestützten Elektromobilität werden elektrische Antriebe auf Wasserstoffbasis in Forschung, Entwicklung und Pilotserie untersucht. In den vergangenen zehn Jahren wurden zahlreiche Studien zur infrastrukturellen, ökonomischen und ökologischen Machbarkeit der Wasserstoffherstellung erstellt. Daher wird zusätzlich eine vergleichende ökologische Bilanzierung von Wasserstoffmobilität durchgeführt, die einen Systemvergleich von Elektromobilität mit Wasserstoff unter ökologischen Aspekten ermöglicht. Die Bilanzierung der Herstellung eines Brennstoffzellen-Pkw für das Bezugsjahr 2030 ist in diesem Abschnitt dokumentiert.

4.4.1 Grundlagendaten für die Sachbilanz

Da heute noch keine Fahrzeuge am Markt verfügbar sind und aktuelle Studien (z.B. [HyWays 2008] und [GermanHy 2009]) frühestens 2030 mit einer signifikanten Marktdurchdringung von Brennstoffzellenfahrzeugen in Deutschland rechnen, wird das Brennstoffzellenfahrzeug im Hinblick auf einen zukünftigen Stand der Entwicklung bilanziert.

Dabei liegt der Fokus der Bilanzierung auf den gegenüber Elektrofahrzeugen differierenden Komponenten. Fahrzeugrumpf, Motor und elektrische Zusatzbauteile werden analog dem batterieelektrischen mittleren Pkw (Moderate Entwicklung 2030) bilanziert. Die Lithium-Ionen-Batterie, die den Brennstoffzellenantrieb in Leistungsspitzen unterstützt und die Rückgewinnung von Bremsenergie ermöglicht, wird dabei mit einer Kapazität von 1,5 kWh angesetzt. Zudem werden die antriebsspezifischen Fahrzeugkomponenten Wasserstofftank und Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) bilanziert.

Zur mobilen Speicherung von Wasserstoff an Bord eines Brennstoffzellenfahrzeugs wurden verschiedene Systeme entwickelt, insbesondere die Speicherung von Druckwasserstoff in verschiedenen Tankkonzepten und die Flüssigwasserstoffspeicherung. Hier wird ein Kompositbehälter zur Speicherung von Druckwasserstoff bei 700 bar bilanziert. Diese Speicherung wird derzeit als sinnvollste Lösung angesehen. Auf dem 11. f-cell-Forum erklärte der Fahrzeughersteller BMW die Weiterentwicklung von Kryotanks zur Flüssigspeicherung von Wasserstoff für beendet und setzt nunmehr auf die etablierte Speichertechnik bei 700 bar und die Entwicklung eines neuen Speichersystems [Brunner 2011]. Dabei verfolgt BMW das Ziel, zukünftig 6 - 8 kg Wasserstoff in Form eines tiefkalten Gases an Bord eines großen Pkw speicherbar zu machen und somit Reichweiten >500 km zu ermöglichen [Brunner 2011]. Daimler betont hingegen die Zukunftsfähigkeit von Metallhydriden als Wasserstoffspeicher, welche allerdings noch erheblichen Entwicklungsbedarf aufweisen [Franzen 2011].

Der bilanzierte Komposittank besteht aus einem Kunststoffbehälter, der die Dichtigkeit des Systems gewährleistet und von einem Netz aus Kohlefasern ummantelt ist, welches für die notwendige Festigkeit des Systems sorgt. Die Materialzusammensetzung des Tanks richtet sich nach Angaben der Studie [Hua et al. 2010], die technische und wirtschaftliche Optimierungspotenziale von Hochdrucktanks untersucht. Zur Bilanzierung der benötigten Materialien werden Datensätze aus [Ecoinvent 2008] verwendet. Dabei wird Kohlefaser durch Graphit abgebildet.

Die Material- und Energiebilanz der Brennstoffzelle beruht auf einer durch Geheimhaltungsvereinbarungen geschützten Datengrundlage des Herstellers Ballard Power Systems, welcher unter anderem die Fahrzeugmodelle von Mercedes-Benz (F-CELL) und

Ford (Focus FCV Hybrid) mit Brennstoffzellensystemen desselben Typs ausstattet. Das detaillierte Grunddatengerüst geht auf den Mark 900-Stack der Jahre 2000 bis 2002 zurück. Allerdings wurde eine Anpassung des Parameters PGM-Beladung vorgenommen (55 g pro Fahrzeug). Die PEMFC eignet sich aufgrund der niedrigeren Betriebstemperaturen, den guten Kaltstarteigenschaften, dem dynamischen Verhalten bei schnellen Lastwechseln und der spezifischen Leistungsdichte besonders gut für mobile Anwendungen. Eine weitere Kommerzialisierung der Technologie erfordert jedoch technische und wirtschaftliche Optimierungen insbesondere hinsichtlich des Einsatzes von Platingruppenmetallen und der maximalen Betriebsstundenanzahl.

Da die Förderung und Aufbereitung von Platingruppenmetallen (PGM) aus sulfidischen Erzen mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden sind, stellen Einsatzmenge und Recyclingquote wichtige Parameter der ökologischen Bilanzierung dar. Hinsichtlich der Recyclingquote wird zur Bilanzierung des mittleren Pkw in 2030 die Annahme getroffen, dass in einem zukünftigen Markt für Brennstoffzellenfahrzeuge 90 % der PGM zurückgewonnen werden. Um die Ergebnisrelevanz dieser Annahme abzuschätzen, wird die Recyclingquote im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse mit 60 % variiert. Bezüglich der benötigten Masse an PGM wird eine zweite Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese berücksichtigt einen theoretisch minimalen Wert zur Aufrechterhaltung der elektrischen Leistungsfähigkeit einer PEMFC. Mitarbeiter des Forschungszentrums Jülich und des Schweizer Paul Scherrer Instituts veranschlagen rund 10 g PGM pro 70 kW-PEMFC [Grube et al. 2010]. Heute nennen Hersteller wie GM Opel 10 g PGM pro Fahrzeug bereits als Zielwert für 2020.

Tabelle 13: Charakterisierung eines zukünftigen Brennstoffzellenfahrzeugs

	eLCAr Standard-Pkw	[Concawe 2007]	[Franzen 2011]
Fahrzeugklasse	Kompaktklasse	Kompaktklasse	B-Klasse
Fahrzeugmasse	1371 kg	1370 kg	1500 kg
Elektromotor	85 kW	75 kW	70 kW
Batteriekapazität	1,5 kWh	~1,6 kWh	1,4 kWh
Brennstoffzellen-Typ	PEMFC		PEMFC
Brennstoffzellenkapazität	75 kW		90 kW
Wasserstofftank	5,6 kg H ₂ bei 700 bar	4,2 kg H ₂ bei 700 bar	4 kg H ₂ bei 700 bar

IFEU 2011

4.4.2 Wirkungsabschätzung für Brennstoffzellenfahrzeuge

Die Treibhausgasemissionen durch Herstellung eines mittleren Brennstoffzellen-Pkw liegen 2030 sind mit etwa 9 Tonnen CO₂-Äquivalenten vergleichbar mit Elektro-Pkw im moderaten Szenario. Dies unterstellt bereits deutliche Fortschritte in der Batterieentwicklung. Die Änderung der Recyclingquote von 90 % auf 60 % führt zu einer Erhöhung der Treibhausgasemissionen der Brennstoffzellenherstellung um gut 2 %, die Reduktion des Platineinsatzes von 55 g auf 10 g führt dagegen zu einer Reduktion um gut 2 % (Abbildung 19).

Bei den anderen Wirkungskategorien kommt den Platingruppenmetallen (PGM) jedoch eine sehr große Bedeutung zu: Versauerung, Sommersmog und die Feinstaubbelastung werden stark durch PGM beeinflusst. Die Sensitivitäten führen hier zu deutlichen Abweichung insbesondere bei der Versauerung (SO₂-Emissionen der PGM-Vorkette) und des Sommersmogs (Abbildung 20).

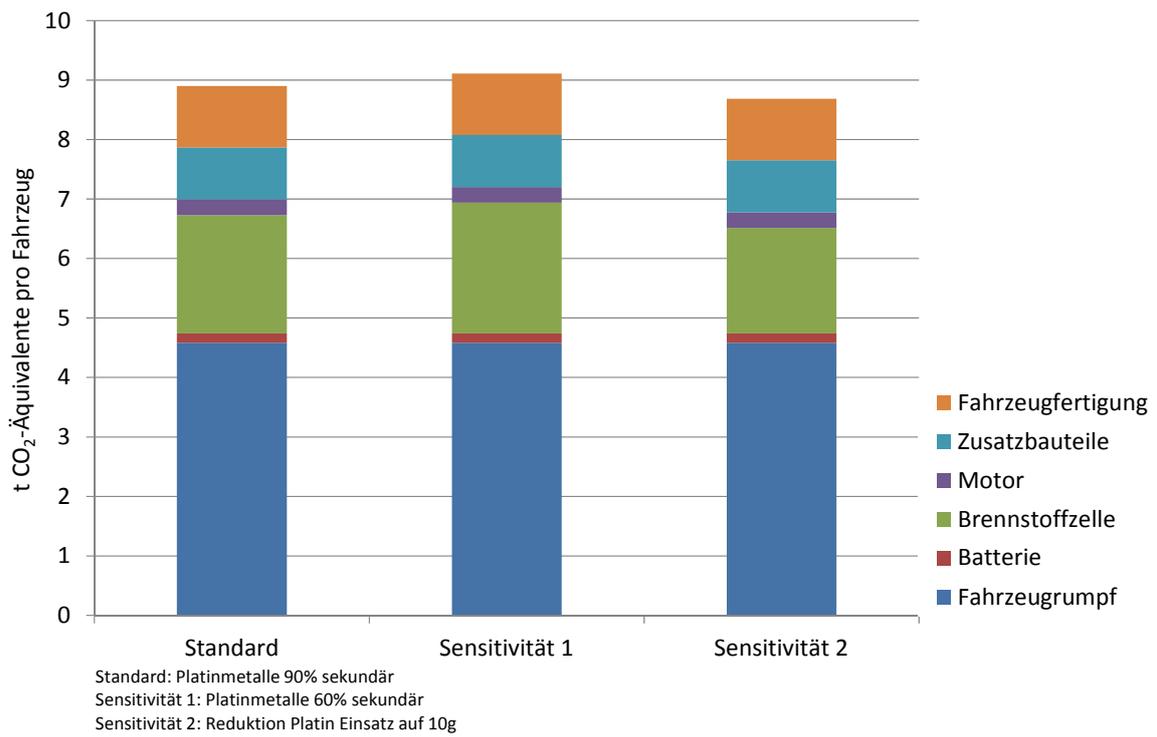


Abbildung 19: Treibhausgasemissionen der Herstellung eines mittleren Brennstoffzellen-Pkw

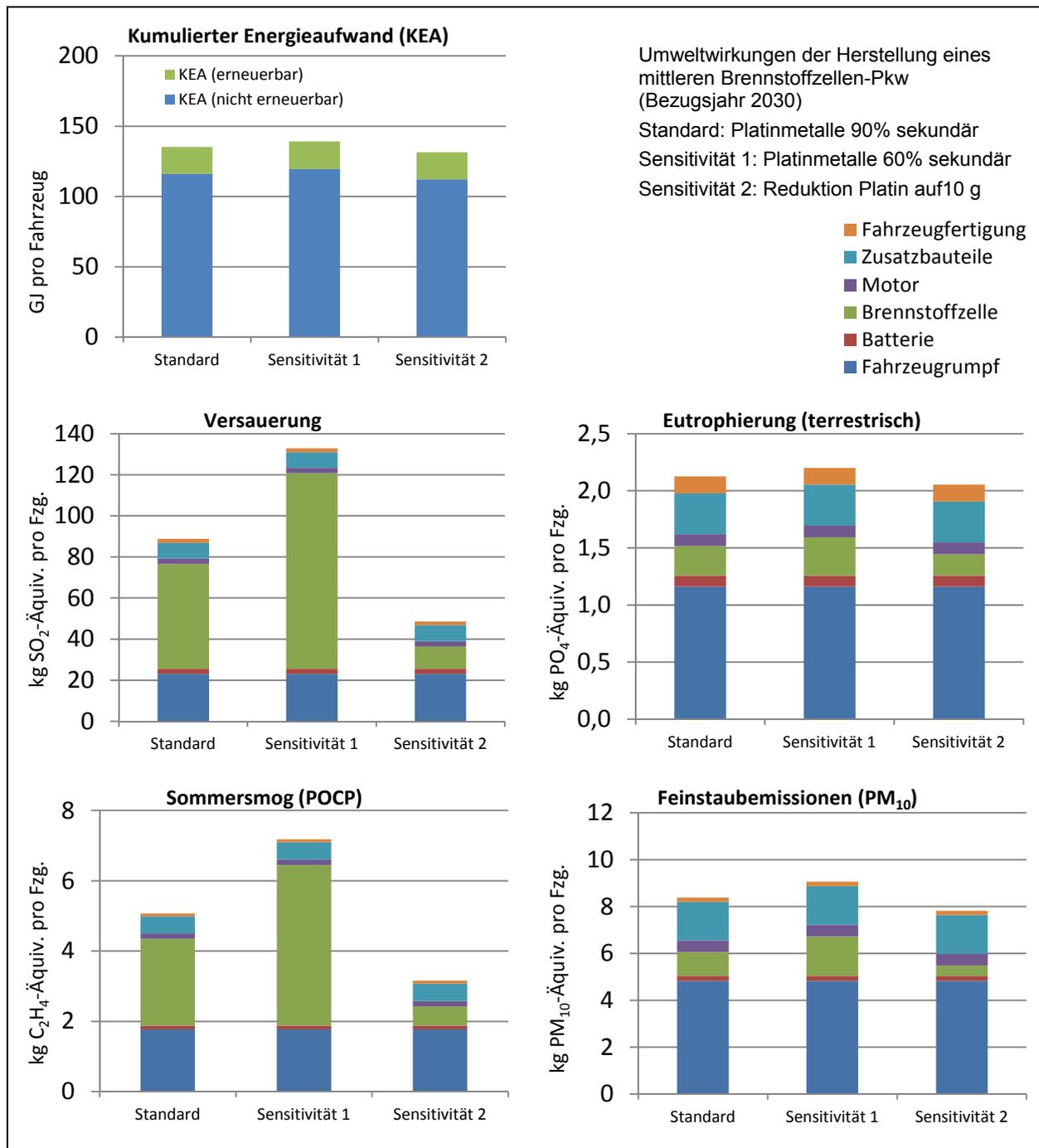


Abbildung 20: Umweltbilanzen der Herstellung eines mittleren Brennstoffzellen-Pkw

5 Fahrzeugnutzung

Die Nutzungsphase beschreibt den Energieverbrauch und die Emissionen während der Fahrt mit dem Fahrzeug sowie Aufwendungen zum Erhalt der Fahrzeuge: Beim verbrennungsmotorischen Antrieb entsteht hier der Großteil der CO₂- und auch Schadstoffemissionen. Elektrisch betriebene Fahrzeuge emittieren zwar nicht direkt Schadstoffemissionen, aber durch ihren Stromverbrauch können Emissionen in der Energiebereitstellung verursacht werden. Damit ist der spezifische Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen eine wichtige Eingangsgröße.

Der Energieverbrauch der Fahrzeuge hängt stark vom Fahrprofil und den fahrzeugspezifischen Eigenschaften (Rollwiderstand, Gewicht etc.) ab (siehe Kapitel 5.1). Während für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor differenzierte Daten zum Energieverbrauch und den Emissionen aus umfangreichen Messprogrammen vorliegen (siehe Kapitel 5.2.1 und 5.2.2), gibt es für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge nur wenige Verbrauchsdaten. Deshalb wird zusätzlich zur Auswertung von Literaturdaten und Herstellerangaben (siehe Kapitel 5.2.3) eine Modellierung des Energieverbrauchs von Elektrofahrzeugen und zum Abgleich auch für konventionelle Vergleichsfahrzeuge durchgeführt und mit den Erfahrungen der Flottenversuche abgeglichen (Kapitel 5.3.4).

Zusätzlich wird die Fahrzeugwartung auf Basis von Datensätzen aus [Ecoinvent 2008] abgebildet. Diese beziehen sich auf einen Golf IV bzw. auf ein reines Elektrofahrzeug. Der RE-Pkw wird dabei vereinfachend als Durchschnitt der Antriebskonzepte angenommen.

5.1 Fahr- und Nutzungsmuster

Die Nutzungsphase eines Fahrzeugs kann durch das ‚Nutzungsmuster‘ und das ‚Fahr-muster‘ beschrieben werden. Nutzungsmuster beschreiben die jährliche bzw. gesamte Lebensfahrleistung und ihre Aufteilung auf verschiedene Straßenkategorien (z.B. Innenstadt, Landstraße, Autobahn). Sie hängen insbesondere vom Einsatzzweck des Fahrzeugs ab und werden daher im Rahmen der Gesamtbilanzen über den Lebensweg diskutiert (Kapitel 7).

Fahrmuster spiegeln dagegen das sekundenfeine Geschwindigkeitsprofil eines Fahrzeugs wieder und unterscheiden sich deutlich, nicht nur nach Straßenkategorie (z.B. Innenstadt vs. Autobahn), sondern auch nach Fahrweise (z.B. sportliche Fahrweise vs. Ecodriving). Es werden Fahrmuster für Innerorts- und Außerortsstraßen sowie Autobahnen unterschieden. Die entsprechenden Verbrauchs- und Emissionsfaktoren können dann entsprechend der angenommenen Fahrzeugnutzung kombiniert werden. Eine detailliertere Analyse des Energieverbrauchs in spezifischen Fahrsituationen (z.B. Stau) wird in einer Sensitivitätsbetrachtung in Kapitel 5.4 durchgeführt.

Zur besseren Vergleichbarkeit wird jeder Straßenkategorie das gleiche Fahrmuster zugrunde gelegt. Herstellerangaben zum Energieverbrauch sowie den Emissionen von Pkw beziehen sich in der Regel auf das Typgenehmigungsverfahren und sind demnach im standardisierten ‚Neuen Europäischen Fahrzyklus‘ (NEFZ) ermittelt worden. Die Repräsentativität des NEFZ für das Fahrverhalten auf der Straße wird in der Fachwelt jedoch kritisch diskutiert (z.B. [Zallinger & Hausberger 2009]). So kann das reale Fahrverhalten im Innerortsbereich eine deutlich größere Dynamik aufweisen als der Innerortsteil des NEFZ, wie der Vergleich mit dem Innerortsteil des ‚Common Artemis Driving Cycle‘ (CADC) in Abbildung 21 zeigt. Auch werden auf Autobahnen z.T. Geschwindigkeiten gefahren die deutlich über 120 km/h hinausgehen.

Daher wird hier auf die Fahrmuster des ‚Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr‘ (HBEFA) in der Version 3.1 zurückgegriffen ([INFRAS 2010]). Die realitätsnahen Fahrprofile wurden im realen Verkehr im Rahmen umfangreicher Messprogramme aufgezeichnet. Durch ihre Verwendung ist - im Gegensatz zu standardisierten Zyklen wie dem NEFZ - die Abbildung eines weitgehend realen Fahrverhaltens gewährleistet.

Zur Ermittlung des durchschnittlichen Energieverbrauchs in verschiedenen Straßenkategorien wurden die Fahrmuster des Handbuchs Emissionsfaktoren nach dem durchschnittlichen Verkehr in Deutschland im Innerorts- und Außerortsbereich sowie auf der Autobahn gewichtet. Im Transport Emission Model (TREMOM) des IFEU ([IFEU 2009]) werden dazu 28 verschiedene Verkehrssituationen des HBEFA herangezogen.

Inwieweit sich das Fahrprofil von Elektrofahrzeugen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor unterscheidet, kann derzeit noch nicht zuverlässig beantwortet werden. Gründe dafür könnten das hohe Anfahrtdrehmoment und die Rückspeisung sein. Auf der anderen Seite werden sich Elektrofahrzeuge im betrachteten Zeitraum noch in einem von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor dominierten Straßenverkehr bewegen. Der Spielraum für abweichende Fahrprofile ist daher eingeschränkt. Daher wird - auch aus Gründen der Vergleichbarkeit – hier allen Antriebskonzepten dasselbe Fahrprofil zugrunde gelegt.

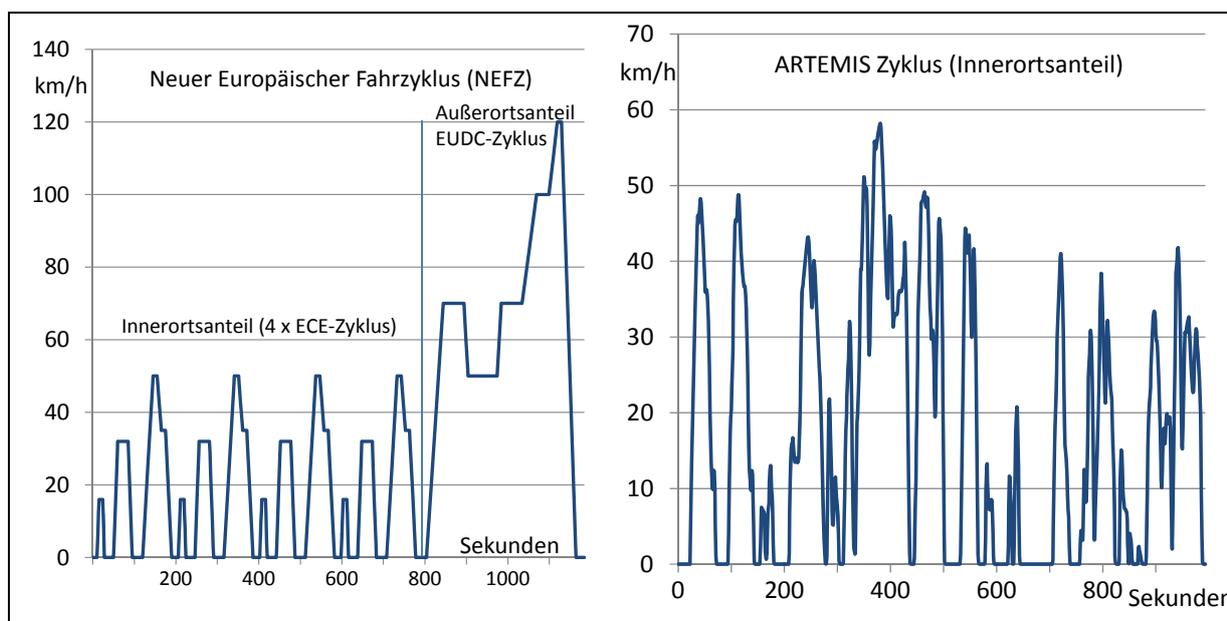


Abbildung 21: Fahrprofile NEFZ und CADC

Kleine Modellkunde TREMOD – HBEFA - PHEM

TREMOD, das ‚**TR**ansport **E**mission **M**ODEl‘ des IFEU dient der Beschreibung des gesamten motorisierten Verkehrs in Deutschland, seiner Fahrleistungen, seiner Energieverbräuche und seiner Emissionen. Das entsprechende Rechenprogramm ist aufgrund seines Umfangs und seiner Komplexität nicht öffentlich zugänglich. Es wird sowohl vom Umweltbundesamt, der Bundesanstalt für Straßenwesen und verschiedene Bundesministerien genutzt, als auch vom Verband der Automobilindustrie, Mineralölwirtschaftsverband, Deutsche Bahn AG, Deutsche Lufthansa und TUI. Die Kooperationspartner tragen ideell und finanziell zur Weiterentwicklung und zur kontinuierlichen Aktualisierung des Modells an den neuesten Stand der Wissenschaft sowie die neuen Gesetzgebungen und Techniken bei.

TREMOD ist im Sektor "Straßenverkehr" mit dem **Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA)** abgestimmt. Konkret bedeutet dies, dass die Emissionsfaktoren des HBEFA in TREMOD für die Berechnung verwendet werden. Umgekehrt verwendet das HBEFA zur Ermittlung der durchschnittlichen Emissionsfaktoren die mit TREMOD berechnete Flottenzusammensetzung für Deutschland.

Die Emissionsfaktoren des HBEFA wurden mit dem ‚**Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model' (PHEM)** der TU-Graz ermittelt. Dieses Modell berechnet den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen aus Motorkennfeldern für vorgegebene Fahrzyklen. Zur Interpolation der Emissionen aus dem Motorkennfeld werden der tatsächliche Energiebedarf am Motor und die Motordrehzahl aus Basis vorgegebener Fahrzeugdaten simuliert.

5.2 Übersicht Verbrauchsdaten

5.2.1 Verbrauchsdaten für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

In TREMOD und HBEFA liegen Kraftstoffverbrauchsdaten als Szenario bis 2030 vor, die auch den Mehrverbrauch durch Klimaanlage und Kaltstarts berücksichtigen. Dabei sind die Daten nach differenziert nach:

- Zulassungsjahr (bis 2030)
- Antriebsart
- Größenklasse des Fahrzeugs (klein, mittel, groß)
- Straßenkategorie (Innerorts-, Außerortsstraßen, Autobahn)

Die Verbrauchsfaktoren in TREMOD basieren auf den im Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) angegebenen Verbrauchsfaktoren für verschiedene Fahrzeugschichten. Für Pkw wurden die Werte auf Basis der bisherigen und erwarteten Entwicklung der Flottenverbräuche im NEFZ abgeleitet (siehe [IFEU 2010]). So sehen die 2009 beschlossenen EU-Grenzwerte ([EU 2009a]) vor, dass zwischen 2012 und 2015 schrittweise ein Grenzwert von 120 g CO₂/km eingeführt wird („Phase-in“). Aufgrund des „integrierten Ansatzes“ müssen fahrzeugseitig jedoch nur 130 Gramm erreicht werden. Die Grenzwerte werden dabei nach Fahrzeugmasse gestuft, wobei die oben genannten Werte im Mittel eingehalten werden müssen.

Im April 2009 hat das Umweltbundesamt auf dieser Grundlage eine Abschätzung für die Entwicklung des Flottenverbrauchs der Pkw erarbeitet, die in TREMOD zugrunde gelegt

wird (siehe [IFEU 2009]). Nach 2015 wird bis 2030 über die ganze Flotte von einer jährlichen Minderung des Kraftstoffverbrauchs und CO₂-Ausstoßes um 1,5 % ausgegangen. Zur weiteren Differenzierung der Verbrauchswerte nach Antriebsart, Größenklasse und Straßenkategorie wurden von IFEU zusätzliche Annahmen auf Basis von [UBA 2006] zur Entwicklung in den einzelnen Segmenten getroffen.

Da sich diese Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs überwiegend an politischen Zielen (z.B. Flottengrenzwerten) orientiert, ist auch eine (Teil-)Hybridisierung der Flotte implizit berücksichtigt. Die Verbrauchswerte für 2030 stellen daher für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor ein optimistisches bzw. innovatives Referenzszenario dar.

Der resultierende Kraftstoffverbrauch nach TREMOD ist in Tabelle 14 aufgeführt. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ist der Kraftstoffverbrauch im Innerortsbereich in der Regel am höchsten. Dies liegt vor allem an dem geringen Motorwirkungsgrad im Teillastbetrieb im Innerortsbereich. Nach dem TREMOD-Basis-Szenario sinkt der Kraftstoffverbrauch von Verbrennungs-Pkw bis 2030 um 20 - 30 % (siehe Abbildung 22). Besonders deutlich ist die Minderung im Innerortsbereich sowie bei großen Fahrzeugen.

Tabelle 14: Kraftstoffverbrauch verschiedener Fahrzeugtypen nach TREMOD (l/100km)

Fahrzeugtyp (Größe)	Innerorts	Außerorts	Autobahn
2010			
Pkw Otto (klein)	6,5	4,7	6,3
Pkw Otto (mittel)	8,5	5,7	7,1
Pkw Otto (groß)	11,3	7,9	10,1
Pkw Diesel (klein)	4,9	3,4	4,5
Pkw Diesel (mittel)	6,3	4,5	6,0
Pkw Diesel (groß)	8,4	6,0	8,2
Leichtes Nutzfahrzeug Diesel (N1)	9,4	8,2	12,7
2030*			
Pkw Otto (klein)	4,8	3,7	4,9
Pkw Otto (mittel)	6,0	4,2	5,3
Pkw Otto (groß)	7,5	5,6	7,2
Pkw Diesel (klein)	4,0	2,7	3,6
Pkw Diesel (mittel)	4,8	3,5	4,7
Pkw Diesel (groß)	6,2	4,5	6,1
Leichtes Nutzfahrzeug Diesel (N1)	6,9	6,0	9,4
* nach TREMOD Basisszenario			
Quelle: [IFEU 2009]			IFEU 2011

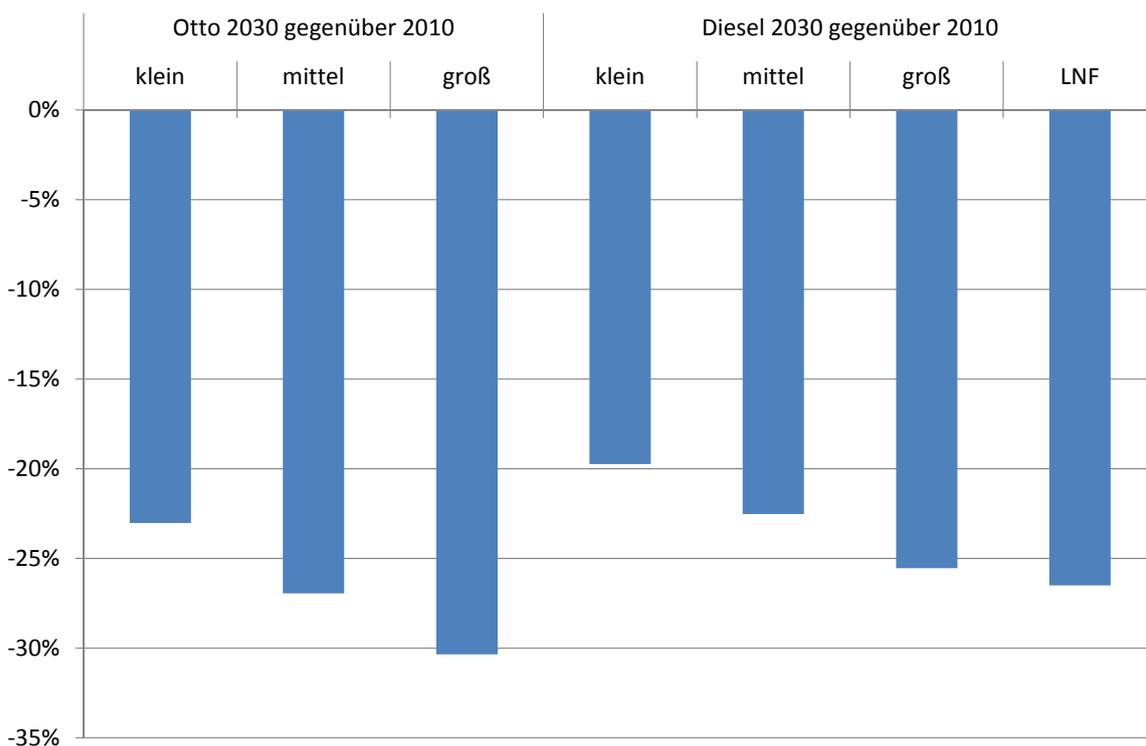


Abbildung 22: Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs von Pkw Neuzulassungen nach TREMOD

5.2.2 Emissionsfaktoren für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

Beim Betrieb von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor entsteht neben den CO₂-Emissionen auch eine Vielzahl weiterer Schadstoffemissionen. Diese hängen vor allem von der Abgasbehandlung und der Kraftstoffqualität ab. Europäische Standards (Euro-Normen) begrenzen den Ausstoß dieser Schadstoffe und wurden in den letzten Jahren deutlich verschärft (siehe Beispiele in Abbildung 23). Insbesondere bei Diesel-Pkw sind die Grenzwerte bei Stickoxiden seit 2000 um über 60 % und bei Partikeln sogar um 90 % gesunken. Bei Otto-Pkw wird derzeit (Euro-5) erstmals ein Partikelgrenzwert eingeführt.

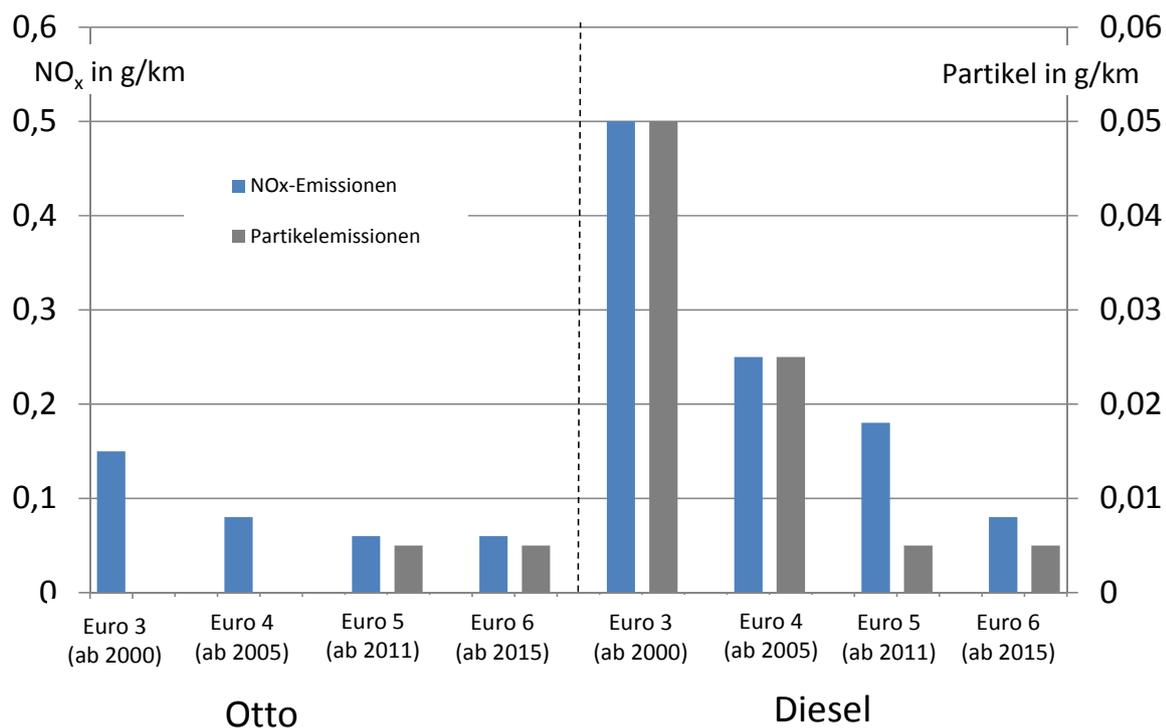


Abbildung 23: Stickoxid- und Partikel-Grenzwerte verschiedener Fahrzeuggenerationen

Die Grenzwerte müssen im NEFZ eingehalten werden, in der Praxis kommt es jedoch häufig zu höheren Emissionen. Insbesondere die NO_x-Emissionen bei Diesel-Pkw lagen nach [INFRAS 2010] deutlich über den Grenzwerten. Mit der Einführung des Partikelfilters (ab Euro 4 bei vielen Fahrzeugen) sanken die Diesel-Partikelemissionen auf ein sehr niedriges Niveau. Mit der Einführung der Euro-6-Grenzwerte wird eine deutliche Reduktion der NO_x-Emissionen erwartet (Abbildung 24).

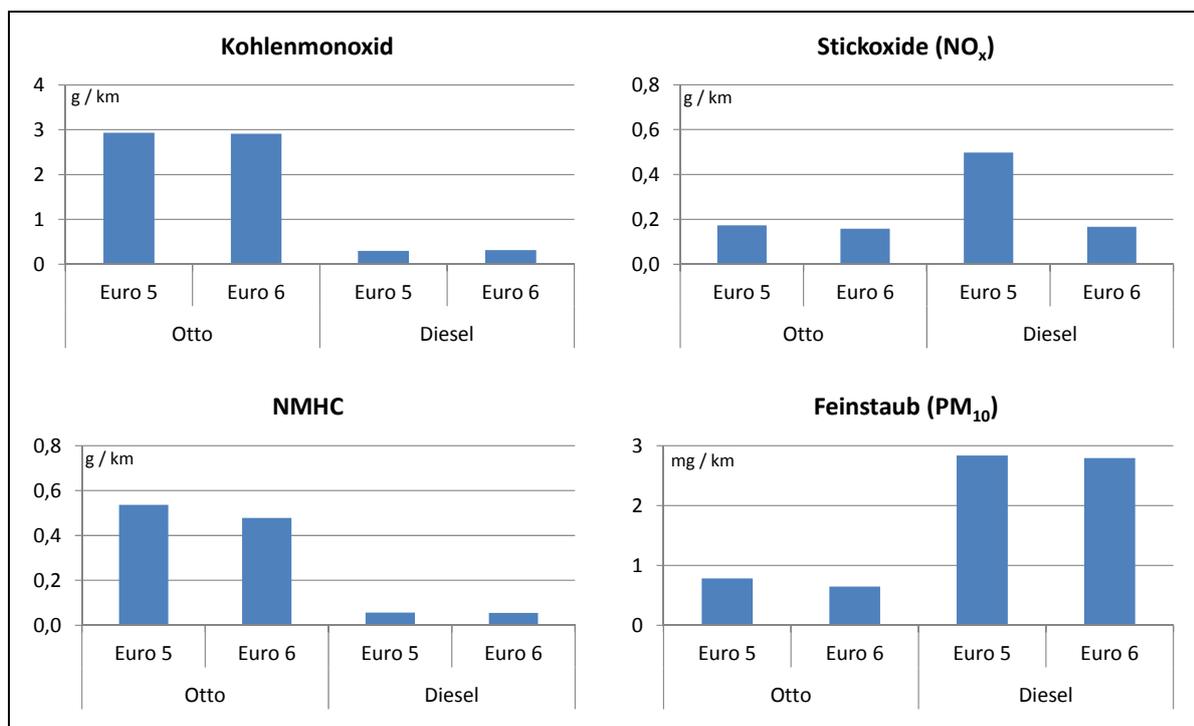


Abbildung 24: Emissionsfaktoren (Innerorts) ausgewählter Schadstoffe nach HBEFA

Emissionsdaten von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen werden ebenfalls im Rahmen der Fahrzeugzulassung gemessen. Wie auch bei den Verbrauchsdaten sind keine Nebenverbraucher berücksichtigt und das zugrundeliegende Fahrprofil des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) weist nur eine geringe Dynamik auf.

Den Umweltbilanzen in diesem Bericht werden daher die Daten des Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) zu Grunde gelegt. Neben den Emissionen des warmen Motors liegen dabei differenzierte Emissionsfaktoren für den Kaltstart sowie bei Kohlenwasserstoffen auch für die Verdunstungsemissionen (Betankung, Tankatmung) vor. Die Differenzierung kann den betrachteten Fahrzeugtypen, Nutzungsmustern und Szenarien zugeordnet werden:

- Emissionsstufe
- Antriebsart
- Größenklasse des Fahrzeugs (Klein, Mittel, Groß)
- Straßenkategorie (Innerorts-, Außerortsstraßen, Autobahn)

Für 2010 wird dabei die Emissionsstufe Euro-5 und für 2030 Euro-6 angesetzt. Unterschiede gibt es dabei vor allem bei den NO_x-Emissionen von Diesel-Pkw. Zwar ist bis 2030 auch eine über Euro-6 hinausgehende Reduktion der Emissionen denkbar. Dazu gibt es aber derzeit noch keine konkreten Vorschläge. Nach [IFEU 2009] wird sowohl für 2010, also auch für 2030 ein Schwefelgehalt von 8 ppm unterstellt.

5.2.3 Verbrauchsdaten für Elektrofahrzeuge

Die Auswahl verfügbarer Elektrofahrzeuge ist bisher gering, zudem gibt es kaum Serienfahrzeuge. Zum 1. Januar 2011 waren in Deutschland gut 2300 Elektrofahrzeuge zugelassen ([KBA 2011c]). Zum Energieverbrauch von Elektro-Pkw liegen daher vor allem Informationen aus wissenschaftlichen Studien (Tabelle 15) und Herstellerangaben (Tabelle 16) vor. Die Bandbreite der Angaben ist groß, vielfach handelt es sich jedoch um Schätzwerte oder um Messwerte ohne serienreife Ausstattung mit Nebenverbrauchern: In wissenschaftlichen Studien werden für einen Mittelklasse Pkw zwischen 15 und 25 kWh/100 km angegeben, die ausgewählten Herstellerangaben liegen zwischen 12 und 23 kWh/100 km. Da den Herstellerangaben der NEFZ zugrunde liegt und damit keine Nebenverbraucher berücksichtigt sind, liegt der realistische Energieverbrauch eines heutigen Elektro-Pkw im realen Fahrbetrieb eher über 20 kWh/100 km. Bei Ausstattung mit einer elektrischen Heizung kann der Energieverbrauch auch deutlich höher liegen, wie erste Praxiserfahrungen zeigen ([Daimler 2011a.], [BMW 2010a]).

Tabelle 15: Verbrauchsangaben für Elektro-Pkw in wissenschaftlichen Studien

Quelle	Verbrauch (kWh/100 km)		
	Durchschnittlich	Innerorts	Außerorts
[Engel 2007]	-	Kleinwagen: 12 Mittelklasse: 15	Kleinwagen: 15 Mittelklasse: 20
[CARB 2007]	20-25	-	-
[MIT 2000]	-	16	12
[Leohold 2008]	18	-	-
[WWF 2008]	20	-	-
[Notter 2010]	17	-	-
[Beidl 2010]	25	-	-
			IFEU 2011

Tabelle 16: Verbrauchsdaten aktueller Elektrofahrzeuge (NEFZ)

Hersteller	Modell	Verbrauch [kWh/100 km]
Smart	ForTwo electric drive	12
Peugeot	ION	13,5
Mitsubishi	i-MiEV	13,5
Citroen	C-Zero	13,5
Nissan	Leaf	15-17
Quellen: [ADAC 2011], [VCD 2011]		IFEU 2011

5.2.4 Verbrauchsdaten für Brennstoffzellen-Pkw

Differenzierte und systematisch klassifizierte Daten aus Flottenversuchen für Brennstoffzellenfahrzeuge sind bislang kaum veröffentlicht.

Deshalb muss der Energieverbrauch auf Basis wissenschaftlicher Studien und Herstellerangaben festgelegt werden. Bei diesen in Tabelle 17 zusammengefassten Verbrauchswerten handelt es sich überwiegend um modellierte oder geschätzte Werte sowie im NEFZ erhobene Messwerte mit einer Bandbreite von 0,8 bis 1,2 MJ H₂/km.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die untersuchten Antriebssysteme zu gewährleisten, wurde der Wasserstoffverbrauch unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.3.1 für den mittleren Pkw in 2030 angenommenen Fahrzeugparameter (Frontfläche, Luft- und Rollwiderstand) modelliert⁷. Als Fahrzeuggewicht wurde, basierend auf der Materialbilanz, ein Wert von 1371 kg zu Grunde gelegt. Der Wirkungsgrad des Brennstoffzellenantriebs wurde auf Basis einer umfangreichen Kennfeld-Simulation mit Außerorts-, Innerorts- und Autobahnsituationen von [Carpatis 2000] mit 40 % für einen zukünftigen Antrieb Status 2020-2030 angesetzt.

Diese Modellierung bestätigt einen Wasserstoffbedarf von gut 1 MJ H₂/km. Ähnliche Werte werden bereits heute von einigen Herstellern angegeben, beziehen sich dann allerdings auf den NEFZ und aktuelle Fahrzeuge. Zur Bilanzierung der praxisnahen Nutzung

⁷ Details zur Modellierung von Verbrauchsdaten werden im folgenden Kapitel 5.3.1 erläutert.

eines Brennstoffzellenfahrzeugs in 2030 wird daher ein gerundeter Wert von 1 MJ H₂/km angesetzt.

Tabelle 17: Verbrauchsangaben für Brennstoffzellen-Pkw

Literaturquelle	Bezugsjahr	Durchschnittlicher Wasserstoffverbrauch [MJ H ₂ /km]	Fahrzyklus
[Carpetis 2000]		1,2	definierter Referenzfahrzyklus
[Stolten et al. 2002]		1,2	NEFZ
[NRW 2009]	2009	1,03	
[Pehnt 2002]	2010	1,03	definierter Referenzfahrzyklus (NEFZ + Bundesstraßen- und Autobahnanteil)
[Concawe 2007]	2010	0,84	NEFZ
[GermanHy 2009]	2010	1,10	
	2030	0,80	
[Wietschel & Büniger 2010]	2030	0,84	NEFZ
Herstellerangabe			
Honda (FCX Clarity)		1	NEFZ
Fiat (Panda FC)		1,05	NEFZ
Daimler (B-Klasse F-CELL)	2011	1,18	NEFZ
Modellierung	2030	1,04	HBEFA

IFEU 2011

5.3 Modellierung von Energieverbräuchen

Die Datenlage zum Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen im Realbetrieb heute und in Zukunft ist lückenhaft, die Rahmenbedingungen und Fahrzeuge sind zudem sehr unterschiedlich. Zur besseren Vergleichbarkeit der Verbrauchswerte wurde eine Modellierung des Energieverbrauchs vorgenommen. Damit können Verbrauchsdaten für die verschiedenen Antriebskonzepte auf einer vergleichbaren Basis ermittelt werden.

Zudem können verschiedenste Parameter variiert und damit eine Vielfalt von Rahmenbedingungen (Fahrzeuggrößen, Entwicklungsstadien) berücksichtigt werden. Dies erlaubt - im Gegensatz zur direkten Analyse von Messdaten von verschiedenen Fahrzeugen und Fahrern - eine besonders gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Zudem wird damit eine Fortschreibung der Parameter für Szenarien möglich.

Bei der Modellierung wird zunächst der physikalische Energiebedarf am Rad auf Basis verschiedener Fahrzeugparameter (z.B. Gewicht, Rollwiderstand etc.) berechnet. Zur Bestimmung der notwendigen Antriebsenergie des jeweiligen Antriebskonzeptes müssen dann zusätzlich die Energieverluste im Antriebsstrang, Motor und bei Wasserstoff-Pkw auch in der Brennstoffzelle (Kapitel 5.3.2) sowie die zahlreichen Nebenverbraucher (Kapitel 5.3.3) berücksichtigt werden (siehe Abbildung 25).

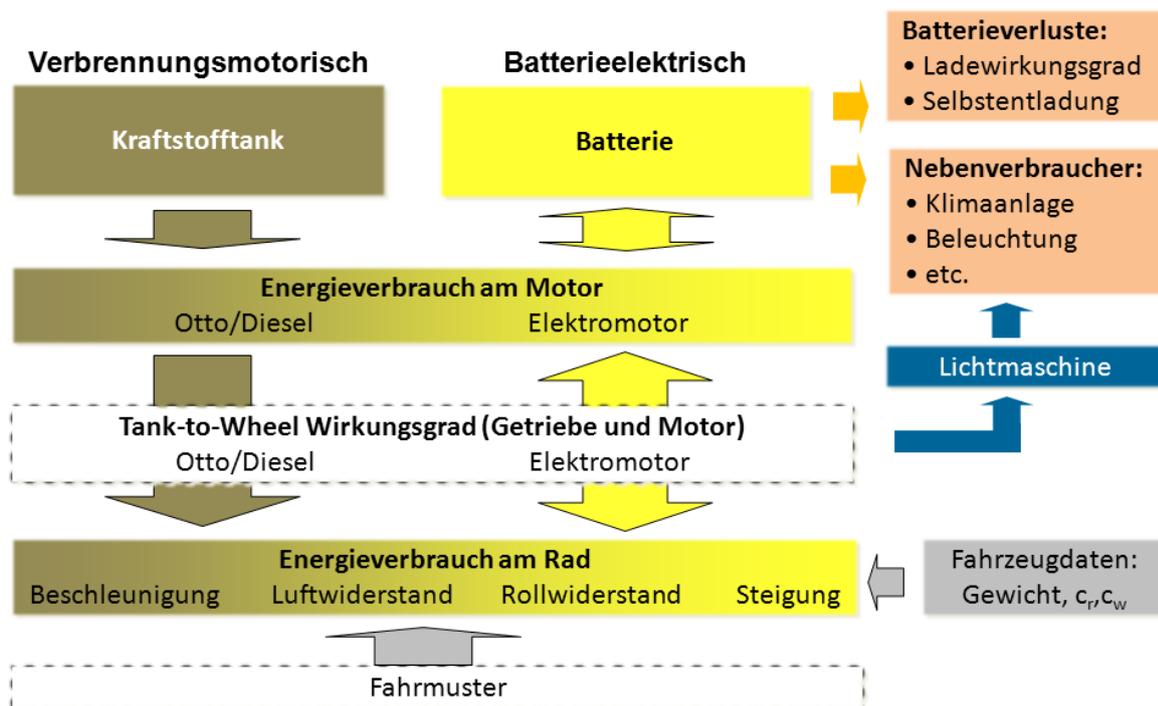


Abbildung 25: Energiefluss verschiedener Antriebsstränge (Schematisch)

5.3.1 Fahrzeugparameter

Basis für die Berechnung des Energiebedarfs am Rad sind Fahrzeugeigenschaften wie das Gewicht (m), der Rollwiderstandsbeiwert (c_r), der Luftwiderstandsbeiwert (c_w) und die Frontfläche (A) des Fahrzeugs sowie das gewählte Fahrmuster. Das Fahrzeuggewicht ergibt sich aus der Materialbilanz der definierten Fahrzeugkonfiguration (siehe Kapitel 4.3). Dabei sind die Fahrzeuggröße, das Antriebskonzept sowie die gewünschte Speicherkapazität der Batterie (und deren Energiedichte) maßgeblich. Zusätzlich werden ein Fahrer mit 75 kg und bei leichten Nutzfahrzeugen nach [INFRAS 2010] eine mittlere Zuladung von 300 kg (~30 % Auslastungsgrad) berücksichtigt.

Roll- und Luftwiderstandsbeiwert sowie die Frontfläche des Fahrzeugs wurden im Rahmen des BMU Förderprojektes Flottenversuch Elektromobilität auf Basis der Literatur abgeschätzt und mit VW abgestimmt ([IFEU 2010]). Die Frontfläche und der c_w -Wert für mittlere Pkw orientieren sich an [TUG 2009]. Die Frontfläche wird für kleine und große Pkw angepasst. Konsistente Daten zu Unterschieden beim c_w -Wert liegen nicht vor, dieser wird daher für alle Größenklassen gleich angesetzt. Die Frontfläche wird dabei zukünftig als konstant angenommen, da hier kaum Verbesserungen ohne Komforteinbußen (und damit einer Änderung der funktionellen Einheit) möglich sind. Beim Rollwiderstands- und Luftwiderstandsbeiwert wird dagegen zukünftig von leichten Verbesserungen ausgegangen (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Annahmen zur Datenmatrix Fahrzeugparameter

Parameter	Größe	2010	2030 (Konservativ)	2030 (Moderat)	2030 (Innovativ)
Frontfläche (m ²)	Klein		--- 1,7 ---		
	Mittel		--- 2,1 ---		
	Groß		--- 2,5 ---		
	LNF		--- 3,4 ---		
Luftwiderstandbeiwert (cw)	Pkw	0,3	<i>0,29</i>	<i>0,28</i>	<i>0,27</i>
	LNF	<i>0,32</i>	<i>0,31</i>	<i>0,30</i>	<i>0,29</i>
Rollwiderstandsbeiwert (cr)	Alle	0,012	<i>0,011</i>	<i>0,010</i>	<i>0,008</i>
Quelle: [TUG 2009] (Zahlen der Literaturquelle fett , abgeleitete Annahmen <i>kursiv</i>)					IFEU 2011

5.3.2 Wirkungsgrade des Antriebsstrangs

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

Der Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors hängt von Leistung und Drehzahl ab und differiert damit je nach Fahrmuster. Daher werden hier entsprechend differenzierte Wirkungsgrade aus dem PHEM-Modell der TU-Graz ([Hausberger 2010]) angesetzt (siehe Tabelle 41 im Anhang). Diese liegen für die verschiedenen Verkehrssituationen des HBEFA vor und sind damit kompatibel zu den berücksichtigten Verkehrssituationen. Darüber hinaus wird das PHEM-Modell auch für Berechnung der Emissionsfaktoren des HBEFA verwendet, die auch in eLCAr verwendet werden. Damit ist eine gute Kompatibilität gewährleistet.

Elektrofahrzeuge

Für die Elektrotraktion werden lastunabhängige Wirkungsgrade angesetzt, da nur in extremen Lastbereich deutlich Unterschiede auftreten. Literaturwerte und Angaben der Flottenversuche sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Die Abgrenzung ist hier häufig jedoch nicht eindeutig. Für den Elektromotor wird konservativ ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 90 % angesetzt, auch wenn der Wirkungsgrad in bestimmten Situationen durchaus höher liegen kann (siehe maximale Wirkungsgrade). Für die Energieübertragung zum Rad wird nach Literaturangaben von 95 % ausgegangen. Bei Radnabenmotoren können die Verluste niedriger sein, diese spielen in der aktuellen Praxis jedoch eine geringe Rolle.

Zusätzlich sind noch Verluste beim Laden der Batterie und durch Selbstentladung der Batterie zu berücksichtigen. Die Ladeverluste werden nach den Literaturangaben in Tabelle 19 mit 10 % abgeschätzt. Verluste durch Selbstentladung hängen stark von den Standzeiten und den äußeren Bedingungen (z.B. Temperatur) ab. Literaturwerte liegen um 5 %, gehen aber auf ältere Quellen zurück. Nach Auffassung von VW ([IFEU 2010]) weisen heutige Lithium-Ionen Batterien deutlich geringere Selbstentladungseffekte auf. Dies wird durch Angaben aus Feldtests bestätigt ([Daimler 2011a]). Daher wird von einem pauschalen Verlust von 1 % durch Selbstentladung ausgegangen.

Tabelle 19: Wirkungsgrade für elektrischen Antrieb

	E-Motor	Übertragung	Antriebsstrang/TtW	Ladeverluste	Selbstentladung
[Mazza & Hammerschlag 2005]	95 %	98 %	-	5 %	7 %
[MIT 2000]	-	-	61,5 %/58,8 %*	-	5 %
[Raskin & Shah 2006]	86 %	93 %	80 %		
[Engel 2007]				10-15 %	
[ZSW 2007]				5 %	
[WWF 2008]	-	-	65 %		
[IFEU 2010]					1 %
[IEA 2005]	-	-	89 %	11 %	6 %
[Concawe 2006]	92 % (Max.)	-	-		
[Daimler 2011a]	96 % (Max.)		82-85 %	14 %	
[VW 2011]	95 % (Max.)			8 %**	
[Ruf 2011]	93 %		80 %		
UMBR_eLA	90 %	95 %	76 %	10 %	1 %
* Innerorts/Außerorts					
** DC/CD Wirkungsgrad					IFEU 2011

Tabelle 20: IFEU-Annahmen zum Gesamtwirkungsgrad Elektrotraktion

Kategorie	Wirkungsgrade 2010	Szenario 2030 (Konservativ)	Szenario 2030 (Moderat)	Szenario 2030 (Innovativ)
Ladewirkungsgrad	90 %			
Elektrischer Motor	90 %	+10 %	+20 %	+30 %
Antriebsstrang	95 %			
Selbstentladung			99 %	
Gesamt	76 %	78 %	81%	83 %

Multipliziert man die einzelnen Wirkungsgrade aus Tabelle 20, so liegt der TtW-Wirkungsgrad⁸ für die Elektrotraktion in 2010 bei etwa 76 %. Literaturangaben zum Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs zeigen eine sehr große Bandbreite zwischen 60 und 90 % (siehe Tabelle 19). Hierbei ist jedoch oft nicht genau definiert, welche Verluste tatsächlich berücksichtigt sind.

Es gibt nur wenige Hinweise zur zukünftigen Entwicklung des elektrischen Antriebsstrangs. Daher wird auf eine differenzierte Ableitung verzichtet, stattdessen wird für 2030 im konservativen Szenario pauschal von 10 % Verbesserung der einzelnen Wirkungsgrade - mit Ausnahme der Selbstentladung - gegenüber 2010 ausgegangen, im moderaten Szenario von 20 % und im innovativen Szenario von 30 % Verbesserung. Damit verbessert sich der gesamte TtW-Wirkungsgrad der Elektrotraktion auf bis zu 83 % in 2030.

Die potenziell rekuperierbare Energie in einem gegebenen Fahrmuster errechnet sich aus der Verzögerung (negativen Beschleunigung) abzüglich der in diesen Phasen durch Roll-

⁸ Der TtW-Wirkungsgrad berücksichtigt in dieser Studie alle Verluste von der Steckdose bis zum Rad. Der Begriff „Tank-to-Wheel“ wurde trotz dieser erweiterten Definition beibehalten.

und Luftwiderstand vernichteten Energie. Diese Energie wird nicht komplett rekuperiert, ein Teil der kinetischen Energie des Fahrzeugs wird beim Bremsvorgang von den mechanischen Bremsen aufgenommen. Dieser Anteil liegt bei etwa 30 % [Guttenberg 2004] und ist dabei vom Fahrmuster abhängig. Eine Korrelation konnte nicht hergestellt werden, da kaum Daten vorliegen. Daher wird pauschal davon ausgegangen, dass 30 % der kinetischen Energie durch mechanisches Bremsen in Wärme umgewandelt wird.

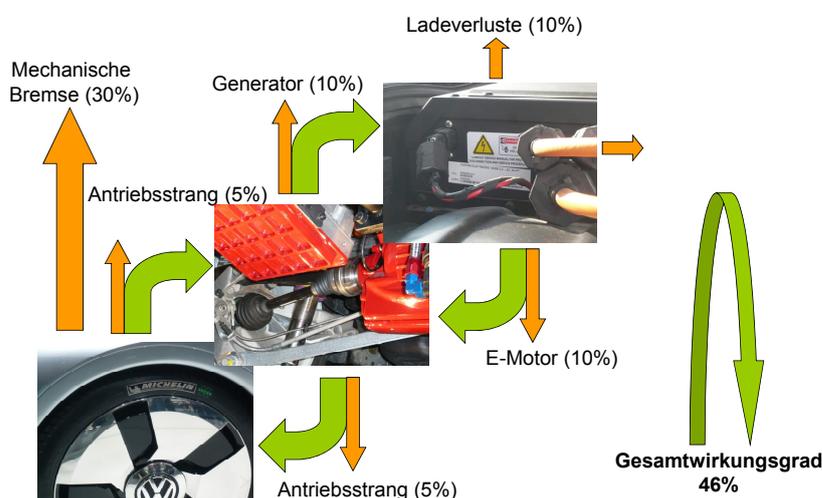


Abbildung 26: Energieumwandlung bei der Rekuperation

Zum Wirkungsgrad bei der Rückgewinnung von Bremsenergie finden sich in der Literatur verschiedenste Angaben (z.B. in [Guttenberg 2004], [Götze 2005], [Böcker 2007]), deren Unterschiede im Wesentlichen auf die Abgrenzung (z.B. Wärmeverluste, Aufnahme/Abgabe) zurückzuführen sind. Dementsprechend finden sich niedrige Angaben von teilweise unter 20 %, die sich auf den gesamten Energieverbrauch eines Fahrzeugs beziehen, aber auch Angaben von über 90 %, die sich alleine auf den Generator beziehen.

Konsequenterweise sollen entlang des Antriebsstrangs für die Rückgewinnung von Bremsenergie die gleichen Wirkungsgrade wie für den Antrieb verwendet werden. So entstehen bei Rückführung der Bremsenergie in die Batterie die in

Tabelle 20 aufgeführten Verluste in umgekehrter Reihenfolge, also im Antriebsstrang, im Generator, beim Laden der Batterie, in der Batterie und schließlich auf dem „Rückweg“ über Motor und Antriebsstrang zurück zum Rad (siehe Abbildung 26). Damit kann 2010 76 % der am Rad aufgenommenen Bremsenergie in die Batterie zurückgespeist werden, bzw. kommt 65 % der am Rad aufgenommenen Energie auch wieder am Rad an. Ähnliche Angaben finden sich auch in der Literatur (z.B. [Guttenberg 2004]: 70-72 %; [Götze 2005]: 52-88 %; [Böcker 2007]: 60-70 %).

5.3.3 Nebenverbraucher

Die Abschätzung des Energieverbrauchs durch Nebenaggregate für Elektro-Pkw basiert auf einer differenzierten Zusammenstellung des durchschnittlichen Leistungsbedarfs relevanter Nebenverbraucher (in [IFEU 2010] u.a. nach [EMPA 2001], [Fabis 2006] und [Wallentowitz 2006]) und einer Abschätzung der Einsatzdauer. Daraus ergibt sich für heutige mittlere Elektrofahrzeuge ein jahresdurchschnittlicher Leistungsbedarf der Nebenverbraucher von etwa 1000 Watt. Diese Größenordnung konnte auch von VW bestätigt werden ([IFEU 2010]).

Bei kleinen Elektro-Pkw wird der Leistungsbedarf mit 800 Watt entsprechend niedriger und bei großen Elektro-Pkw mit 1200 Watt etwas höher angesetzt. Dabei sind sowohl die Batteriekühlung als auch eine elektrische Zusatzheizung berücksichtigt. Diese Werte wurden auch in den Flottenversuchen bestätigt: Für den E-Vito wurde von [Daimler 2011a] ein Leistungsbedarf von 500–700 W ohne Heizung angegeben, für das Range-Extender-Konzept 300–500 W ohne Heizung ([Daimler 2011b]). Feldtestererfahrungen ([Daimler 2011a], [BMW 2010b]) zeigen, dass der Energieverbrauch durch elektrisches Heizen (und Kühlen) sehr hoch sein kann. Die maximale Leistung der Heizung liegt bei 3 kW ([Daimler 2011a]), die Heizung (und Klimaanlage) ist jedoch nicht kontinuierlich und ganzjährig eingeschaltet. Daher ist der durchschnittliche Leistungsbedarf deutlich niedriger und wird auch bei leichten Nutzfahrzeugen mit 1000 Watt angesetzt. Zum Vorheizen von Elektrofahrzeugen gibt es bisher noch keine Daten. Ein zusätzlicher Verbrauch ist hier auch durch das Nutzungsverhalten bestimmt und hier daher nicht berücksichtigt.

Die hier aufgeführten Verbrauchswerte der Nebenaggregate sind Durchschnittswerte. Der Energieverbrauch an heißen Sommertagen oder kalten Wintertagen kann aufgrund des deutlich höheren Kühlungs- bzw. Heizbedarfs deutlich höher liegen. Die Einsatzdauer konnte für einen Großteil der Verbraucher bisher nur abgeschätzt werden, da keine ausreichenden statistischen Daten zur Nutzung von Nebenaggregaten vorliegen.

Für zukünftige Bezugsjahre wird von einer Verbesserung der Energieeffizienz der Nebenverbraucher bzw. eine Reduktion des Energieverbrauchs (z.B. durch bessere Isolation) ausgegangen. Die Reduktion des Energiebedarfs bis 2030 wird analog zu den Wirkungsgradverbesserungen mit 10 % gegenüber 2010 im konservativen, 20 % im moderaten und 30 % im innovativen Szenario angenommen. Die Angaben zum Leistungsbedarf von Nebenverbrauchern in konventionellen Pkw wurden im Rahmen des VW-Flottenversuchs von VW geschätzt ([IFEU 2010]). Die Werte liegen deutlich unter dem Verbrauch von Elektrofahrzeugen, da keine Leistungselektronik und elektrische Zusatzheizung notwendig ist.

Tabelle 21: Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher

Parameter	Fzg.-Größe	Watt
Nebenverbraucher konventionelle Pkw	Klein	400
	Mittel	500
	Groß	600
Nebenverbraucher elektrische Pkw	Klein	800
	Mittel	1000
	Groß	1200
Nebenverbrauch (W) elektrische Lieferwagen		1000
		IFEU 2011

5.3.4 Abgleich für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

Die mit eLCAR ermittelten Verbrauchswerte für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor für 2010 (zusätzliches Fahrergewicht von 75 kg) zeigen eine gute Überstimmung mit den in TREMOD verwendeten Werten (siehe Abbildung 27 und Abbildung 28). Damit können die TREMOD-Werte, deren Grundlage die Modellierung mit PHEM ist, direkt mit den eLCAR-Modellierungen für die Elektrofahrzeuge in den Ökobilanzen verwendet werden.

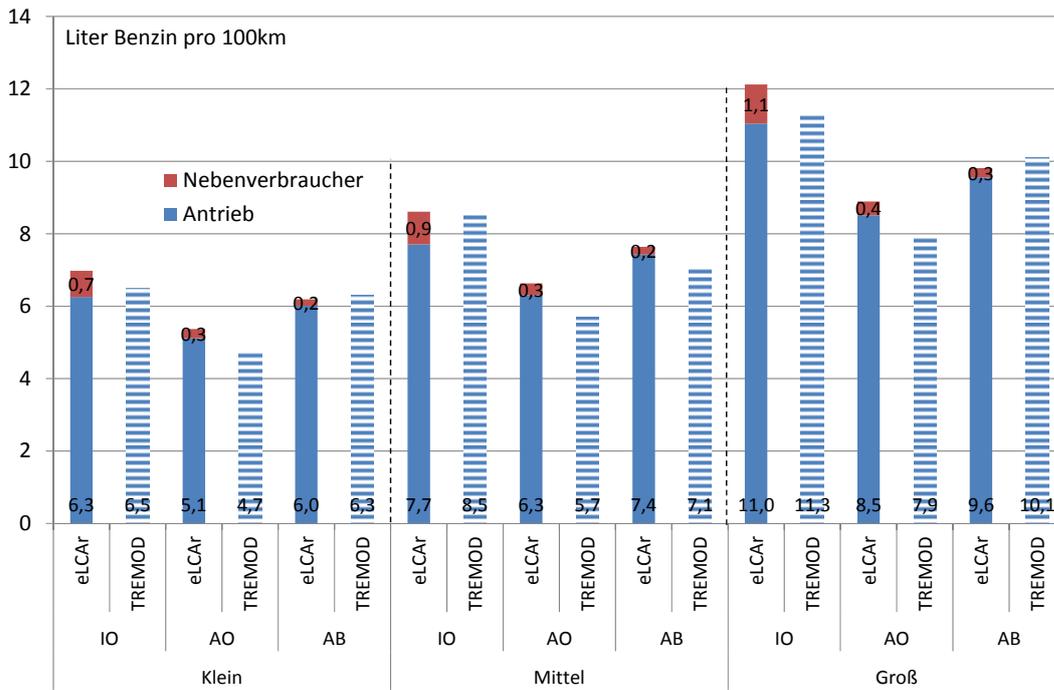


Abbildung 27: Kraftstoffverbrauch von Otto-Pkw 2010

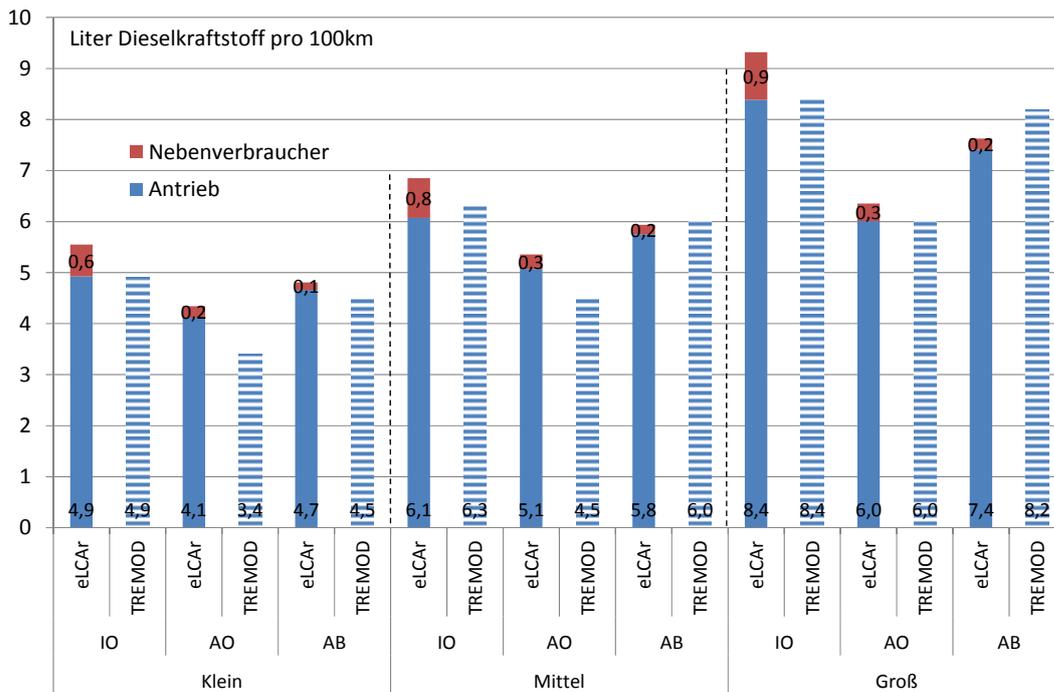


Abbildung 28: Kraftstoffverbrauch von Diesel-Pkw 2010

5.3.5 Ergebnisse für Elektrofahrzeuge

Die auf Basis der oben definierten Parameter berechneten Verbrauchsangaben für 2010 und Hersteller- sowie Verbundprojektangaben sind in Abbildung 29 dargestellt. Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen ist bei Elektrofahrzeugen der Energieverbrauch im Innerortsbereich am niedrigsten. Hauptgrund dafür ist, dass der Wirkungsgrad von Elektromotoren nahezu unabhängig von der Belastung ist und zudem E-Fahrzeuge Bremsenergie rekuperieren, während Verbrennungsmotoren insbesondere im Innerortsbereich häufig in weniger effizienter Teillastbereich betrieben werden.

Den höchsten Energieverbrauch haben Elektrofahrzeuge auf der Autobahn. Hier besteht der höchste Energieverbrauch am Rad. Der Effizienzvorteil von Elektrofahrzeugen nimmt hier ab, da wegen weniger Bremsvorgängen die Rückspeisung eine geringere Rolle spielt, zudem erreichen auch Verbrennungs-Pkw hier höhere Wirkungsgrade.

Die für den NEFZ berechneten Angaben liegen aufgrund der geringen Dynamik und Maximalgeschwindigkeiten deutlich unter den auf Basis von Realzyklen berechneten Verbrauchswerten.

Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung: Die Herstellerangaben liegen nahezu exakt so hoch wie der berechnete Energieverbrauch im NEFZ ohne Nebenaggregate. Der Verbrauch von leichten Nutzfahrzeugen im Innerortsbereich liegt ebenfalls im Bereich der von den Projekten EMIL und EMKEP zur Verfügung gestellten Daten.

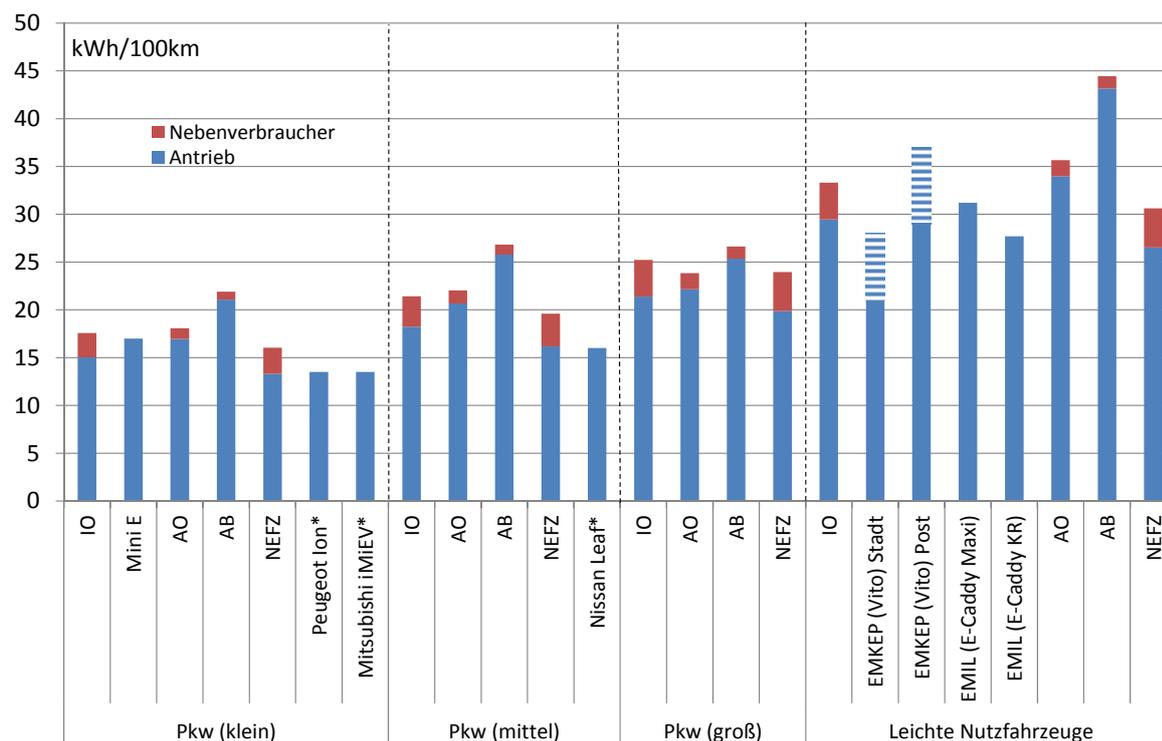


Abbildung 29: Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen (Bezugsjahr 2010) (* Herstellerangaben)

Die Szenarien für 2030 (siehe Abbildung 30) gehen für den mittleren Pkw von einem Rückgang des Energieverbrauchs um bis zu 40 % (innovatives Szenario im Innerortsbereich) aus. Dies geht auf ein niedrigeres Fahrzeuggewicht (leichtere Batterie, Fahrzeugleichtbau) und höhere Wirkungsgrade des elektrischen Antriebsstrangs zurück. Im moderaten Szenario liegt die Minderung des Energieverbrauchs gegenüber 2010 zwischen 22 % (HBEFA Innerorts) und 16 % (HBEFA Autobahn).

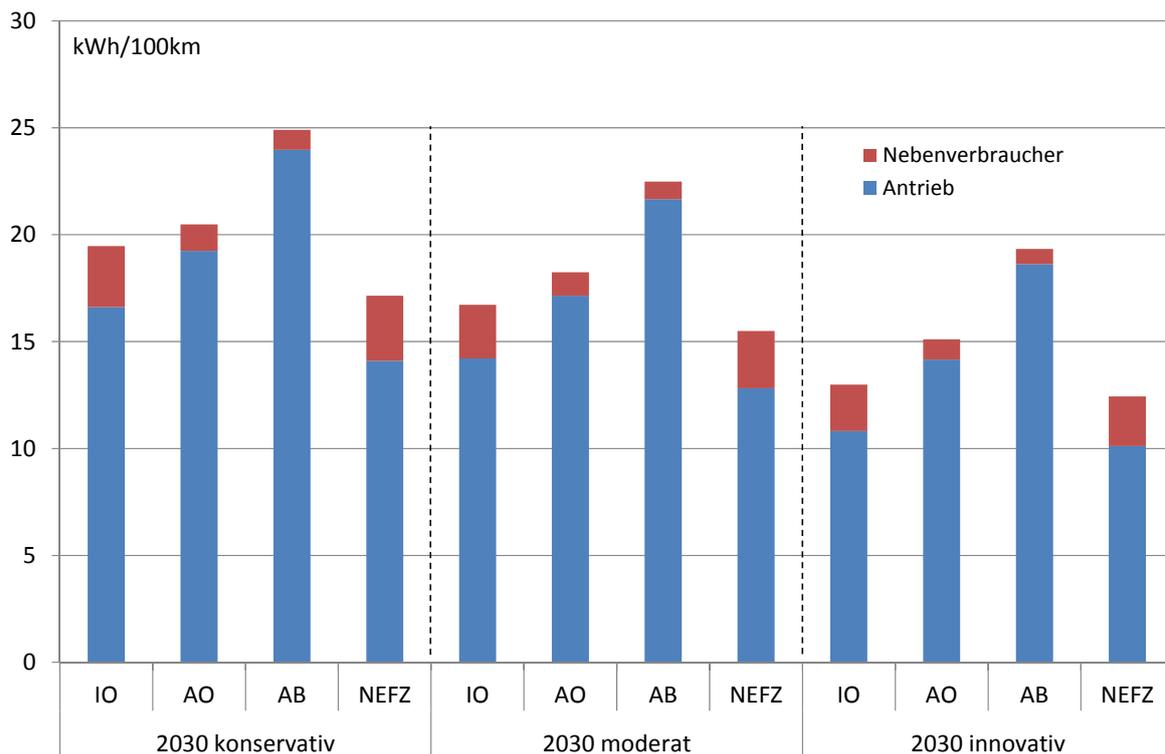


Abbildung 30: Energieverbrauch mittlerer Elektro-Pkw in verschiedenen Szenarien (Bezugsjahr 2030)

5.3.6 Ergebnisse für Elektrofahrzeuge mit Range Extender

Der Stromverbrauch von Elektrofahrzeugen mit Range-Extender (RE-Pkw) wird analog zu Elektrofahrzeugen modelliert. Die Fahrzeugparameter der rein elektrischen Fahrzeuge werden übernommen, nur wird das Fahrzeuggewicht entsprechend der Materialbilanz zu Grunde gelegt (siehe Kapitel 4.3.1). Zwar haben RE-Pkws eine deutlich kleinere Batterie, durch den doppelten Antriebsstrang ist das Fahrzeuggewicht und damit auch der spezifische Stromverbrauch bei reinem Elektrobetrieb etwa gleich hoch wie bei reinen Elektrofahrzeugen (Abbildung 31).

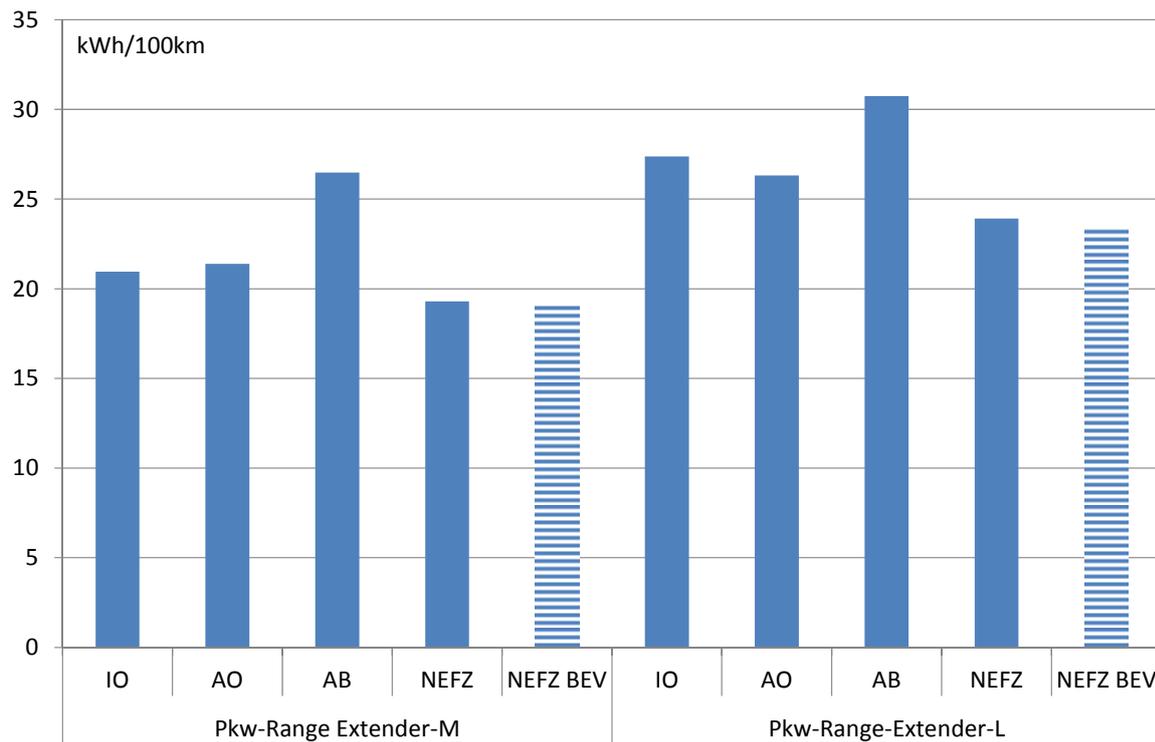


Abbildung 31: Energieverbrauch von Range-Extender-Pkw im elektrischen Betrieb

Für den RE-Pkw ergeben sich wie beim Hybrid-Pkw zwei Varianten des verbrennungsmotorischen Antriebs:

- Paralleler Betrieb:** Der Verbrennungsmotor treibt das Fahrzeug überwiegend direkt an. Der Elektromotor wird nur bei Leistungsspitzen zugeschaltet. Diese Betriebsweise ist dort sinnvoll, wo der Verbrennungsmotor einen relativ hohen Wirkungsgrad hat.
- Serieller Betrieb:** Der Verbrennungsmotor treibt einen Generator an, der mit seinem Strom den Elektromotor antreibt. „Überschüssige-Leistung, die nicht für den Vortrieb verwendet wird, wird in der Batterie gespeichert“ ([Daimler 2011b]). In Fahrsituationen, in denen der Verbrennungsmotor einen niedrigeren Wirkungsgrad hat, z.B. unter 20 % für einen Otto-Motor im Innenstadtverkehr, stellt der serielle Betrieb trotz ‚energetischen Umwegs‘ über die Batterie in der Regel die verbrauchsgünstigere Lösung dar. Denn dann kann der Verbrennungsmotor im optimalen Betriebspunkt mit Wirkungsgraden nahe 30 % betrieben werden.

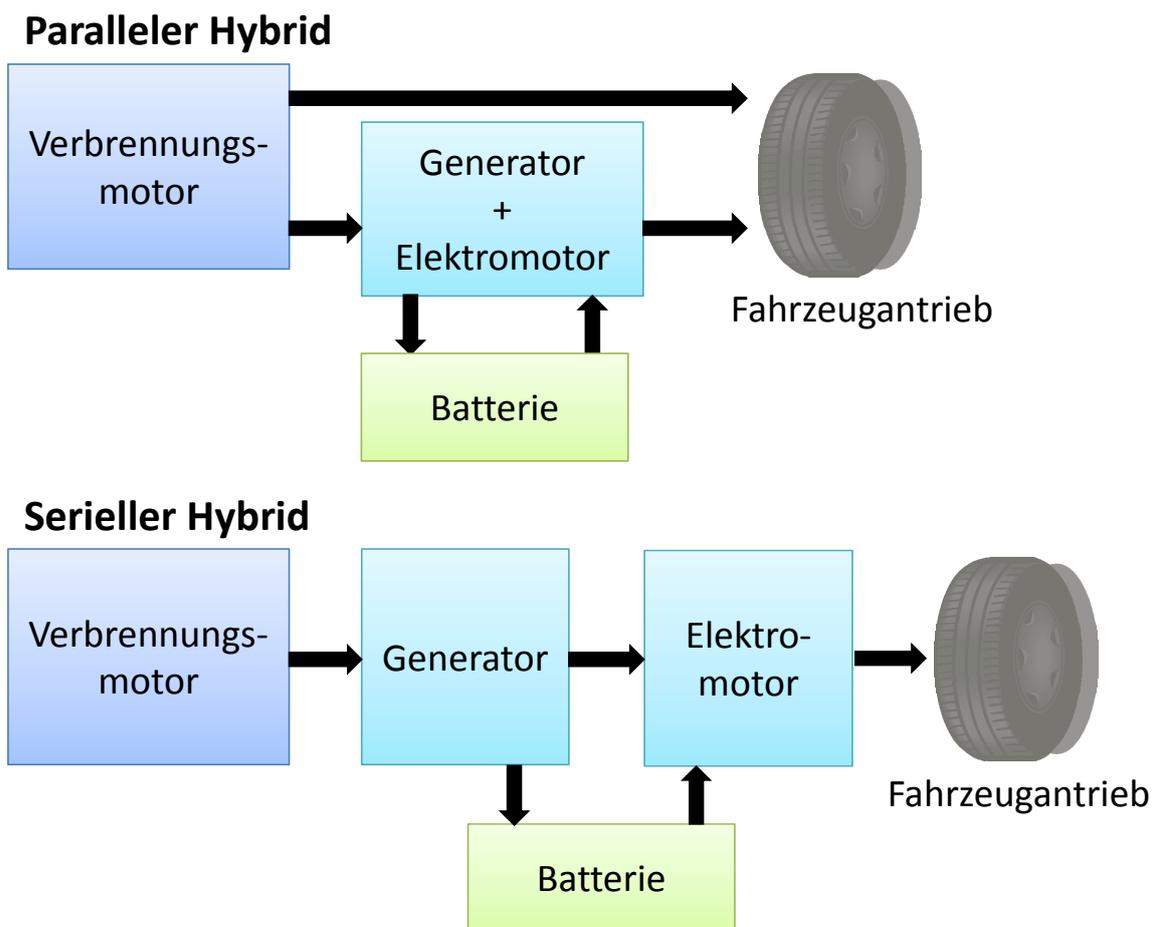


Abbildung 32: Schema hybridischer Betriebsweisen

Nach [Daimler 2011b] erfolgt die Umschaltung zwischen seriell und parallel überwiegend direkt verbrennungsmotorischen Betrieb zwischen 60 und 90 km/h. Setzt man 75 km/h als Schwellenwert, ergibt sich für die Zyklen des HBEFA eine Aufteilung der Betriebsmodi wie in Tabelle 22: Auf Innerortsstraßen würde erwartungsgemäß überwiegend seriell gefahren, auf Außerortsstraßen zum großen Teil direkt und auf Autobahnen nahezu ausschließlich direkt. Der Anteil seriellen Betriebs auf Autobahnen geht dabei auf Stausituationen und stockenden Verkehr zurück.

Tabelle 22: Abschätzung der hybridischen Betriebsmodi von RE-Pkw

	Seriell	Parallel (direkt)
Innerortsstraßen	96 %	4 %
Außerortsstraßen	26 %	74 %
Autobahnen	6 %	94 %

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von [Hausberger 2010] IFEU 2011

Der Kraftstoffverbrauch in den beiden hybridischen Betriebsweisen kann hier nur näherungsweise ermittelt werden⁹, Daten aus Forschungsprojekten lagen nicht vor.

Beim seriellen Betrieb muss sowohl der direkte Antrieb über Generator und Elektromotor als auch die Zwischenspeicherung über die Batterie, bei der zusätzliche Lade-

⁹ Eine genauere Analyse eines Plug-In-Hybrid-Konzeptes erfolgt derzeit durch IFEU im Rahmen des vom BMU geförderten ‚VW-Flottenversuchs Elektromobilität‘

/Entladeverlusten entstehen, betrachtet werden. Eine genaue Ermittlung des Energieverbrauchs im seriellen Betrieb ist nach [Daimler 2011b] noch nicht möglich. Vereinfachend wird hier für die Ermittlung der seriellen Vergleichswerte

- für die Autobahnsituationen von direktem Vortrieb über Strom aus dem Generator,
- für die Innenstadtsituationen von einer Zwischenspeicherung in der Batterie und
- für Außerortssituationen von einer geschwindigkeitsabhängigen Aufteilung der beiden Modi ausgegangen.

Analog den Ergebnissen in 5.3.4 kann der Kraftstoffverbrauch für beide Betriebsmodi abgeschätzt und verglichen werden. Trotz der vereinfachenden Annahmen können mit eLCAR die relativen Vor- und Nachteile des seriellen Betriebs gegenüber dem direkten Betrieb gut abgebildet werden. Nach [Daimler 2011b] liegt der Verbrauch bei konstanten und hohen Geschwindigkeiten im Direktantrieb etwa 15 – 20 % niedriger als im seriellen Betrieb. Dies kann mit eLCAR gut reproduziert werden. Bei niedrigen Geschwindigkeiten im Innenstadtbereich liegt der Verbrauch im Direktantrieb, wegen des niedrigen Wirkungsgrades von Verbrennungsmotoren im Teillastbetrieb, dagegen höher als beim seriellen Betrieb: Der 10 % höhere Verbrauch bei 50 km/h wird ebenfalls gut abgebildet, bei Geschwindigkeiten um 30 km/h wird der Vorteil des seriellen Antriebs durch die eLCAR-Modellierung aber eventuell unterschätzt. Eine solche weitergehende Optimierung auf den seriellen Betrieb ist zwar realistisch, wird aber in eLCAR im Sinne einer konservativen Bilanzierung zunächst vernachlässigt.

Tabelle 23: Unterschiede im Kraftstoffverbrauch zwischen direktem und seriellem Antrieb

Geschwindigkeit (konst.)	Direkt gegenüber seriell nach [Daimler 2011b]	Verkehrssituation	Direkt gegenüber seriell eLCAR-Modellierung
30 km/h	+40 %	Stop-and-go	+43 %
		50 km/h gesättigt	+25 %
50 km/h	+10 %	50 km/h freier Verkehr	+9 %
100 km/h	-15 %	100 km/h freier Verkehr	-15 %
120 km/h	-20 %	120 km/h freier Verkehr	-18 %

IFEU 2011

Für einen mittleren RE-Pkw ergeben sich damit die in Abbildung 33 dargestellten Kraftstoffverbräuche. Dabei wurden im direkten Betrieb die Verbrauchsunterschiede an den gewichtskorrigierten Werten nach TREMOD ([IFEU 2009]) normiert um eine direkte Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Im Innerortsbereich liegt der Kraftstoffverbrauch im seriellen Betrieb gut 1 l/100 km günstiger und im Außerortsbereich gut 1 l/100 km höher als im direkten Betrieb. Der Direktantrieb zeigt auf Autobahnen gegenüber dem seriellen Antrieb große Vorteile von fast 2 l/100 km auf Autobahnen, da hier der Verbrennungsmotor einen besonders guten Wirkungsgrad hat. Bei etwa durchschnittlichem Fahrmuster kann durch den jeweils günstigsten Betrieb der Kraftstoffverbrauch sowohl gegenüber rein seriellen als auch ausschließlich direkten Antrieb verbessert werden. Den Bilanzen über den Lebensweg wird dabei stets der optimierte Kraftstoffverbrauch zugrunde gelegt.

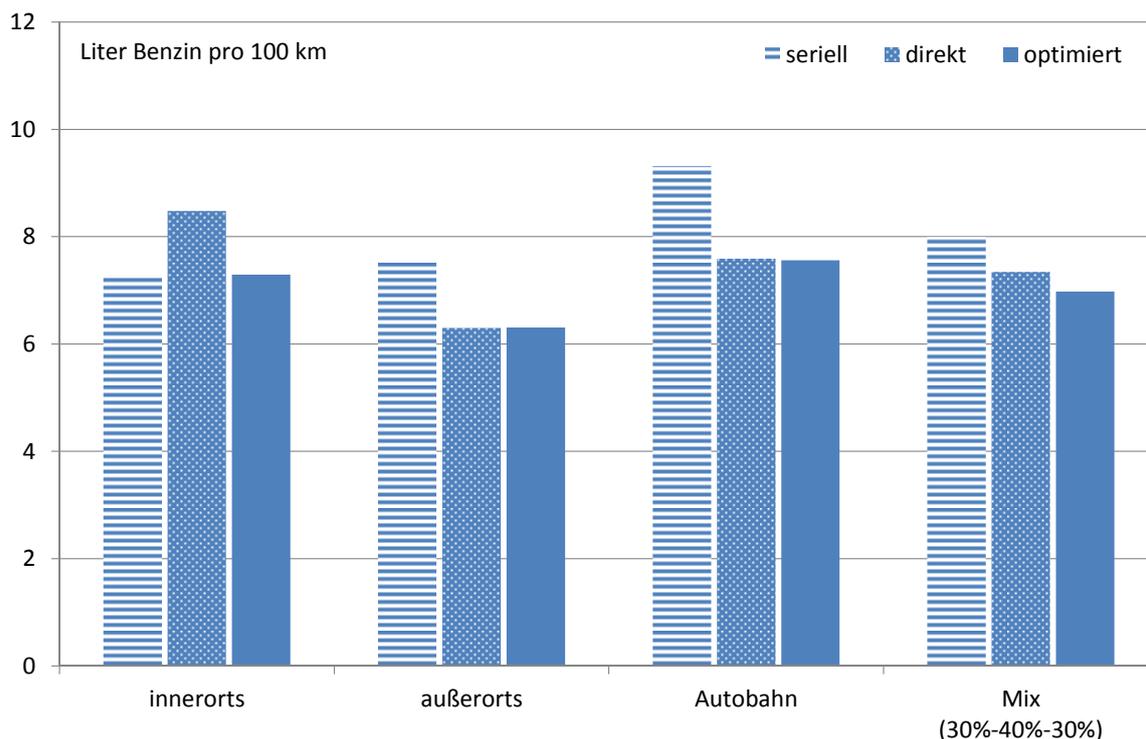


Abbildung 33: Verbrauchsmodellierung für einen mittleren Otto-RE-Pkw 2010

5.4 Sensitivitäten des Energieverbrauchs

Die abgeleiteten Verbrauchswerte sind mittlere Werte für die drei Straßenkategorien (Innerortsstraßen, Außerortsstraßen und Autobahnen). In einzelnen Fahrsituationen und bei anderen Temperaturen können die Verbrauchswerte davon jedoch deutlich abweichen (Abbildung 34):

- Bei einem mittleren Elektro-Pkw zeigt sich der geringste Verbrauch von unter 20 kWh/100 km im NEFZ: Ohne Berücksichtigung der Nebenverbraucher, wie bei den offiziellen Zulassungstest, liegt der Verbrauch nur knapp über 15 kWh/100 km.
- Der US Testzyklus (FTP = Federal Test Procedure) bildet dagegen eine höherer Dynamik ab, die Geschwindigkeit bleibt dabei aber stets unter 100 km/h. Damit liegt der Energieverbrauch bereits über 20 kWh/100 km, Nebenverbraucher tragen hier über 3 kWh/100 km zum Verbrauch bei.
- Der Innerortsteil des CADC bedingt einen antriebsbedingten Verbrauch in gleicher Höhe wie beim FTP und dem HBEFA-Innerortsteil. Durch die niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit (17 km/h gegenüber 34 km/h) liegt der Beitrag der Nebenverbrauch jedoch deutlich höher, da deren Verbrauch vor allem von der Dauer des Einsatzes abhängt.
- In Stop-and-go-Situationen ist der Anteil der Nebenverbraucher mit fast 40 % am Gesamtverbrauch noch höher. Der Antriebsverbrauch liegt aber, aufgrund der hohen Effizienz von Elektromotoren, auf gleicher Höhe wie beim NEFZ.
- Auf Autobahnen steigt der Verbrauch deutlich an (siehe HBEFA Autobahn und 130 km/h sowie CADC Autobahn) und liegt dann für einen mittleren Pkw zwischen 25 und 30 kWh/100 km. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit ist der kilometerbezogene Beitrag der Nebenverbrauch dabei gering.

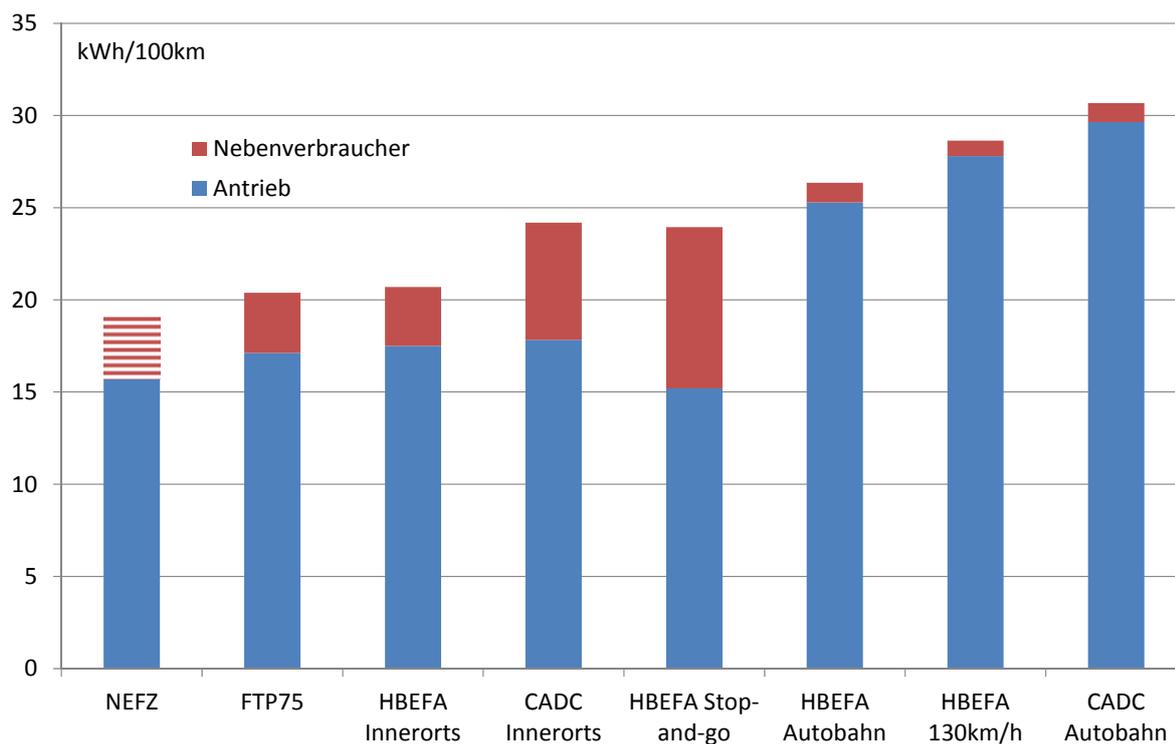


Abbildung 34: Energieverbrauch eines mittleren Elektro-Pkw in verschiedenen Fahrmustern

Auch der Einsatz der Nebenaggregate hat großen Einfluss auf den Energieverbrauch. In Kapitel 5.3.3 wurde der durchschnittliche Leistungsbedarf ermittelt. An heißen bzw. kalten Tagen kann bei starkem Einsatz von Klimaanlage bzw. Heizung der Energieverbrauch deutlich steigen. Bedingt die Klimaanlage oder Heizung einen zusätzlichen Leistungsbedarf von 2 kW (insgesamt also 3 kW), wie in Abbildung 35 dargestellt, so liegt der Energieverbrauch eines mittleren Pkw im Innerortsbereich bei etwa 27 kWh/100 km (gegenüber 21 kWh/100 km bei durchschnittlichem Leistungsbedarf). Die verfügbare Reichweite sinkt damit. Auf Autobahnen ist der kilometerbezogene Effekt deutlich geringer, der Verbrauch steigt von 26 kWh/100 km auf etwa 28 kWh/100 km an, da in einer Stunde zwar 2 kWh mehr elektrische Energie benötigt, aber auch 100 km Strecke zurückgelegt werden.

Im Mini-E-Versuch 1.0 (Abbildung 36) hat sich eine ähnlich deutliche Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Temperatur gezeigt ([BMW 2010b]). So stieg der Verbrauch durch Nebenaggregate von 1-2 kWh/100 km im mittleren Temperaturbereich (10-20°C) auf über 5 kWh/100 km bei Außentemperaturen unter 0 °C.

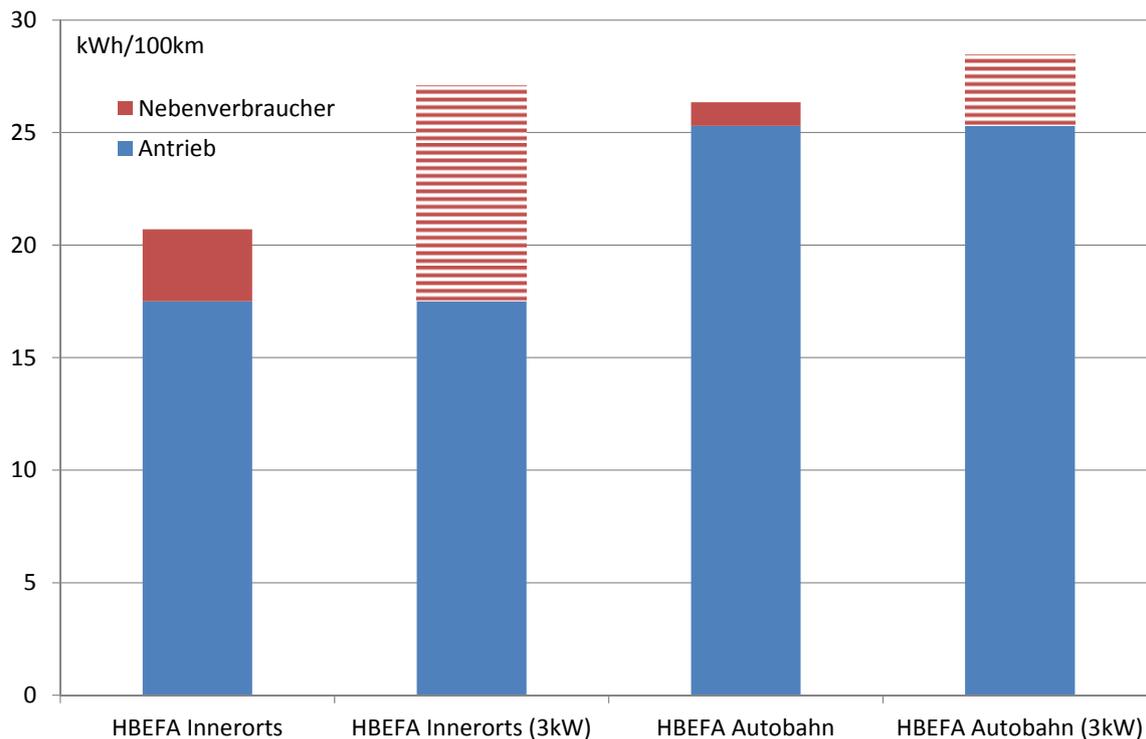


Abbildung 35: Energieverbrauch eines Elektro-Pkw mit Nebenverbrauchern

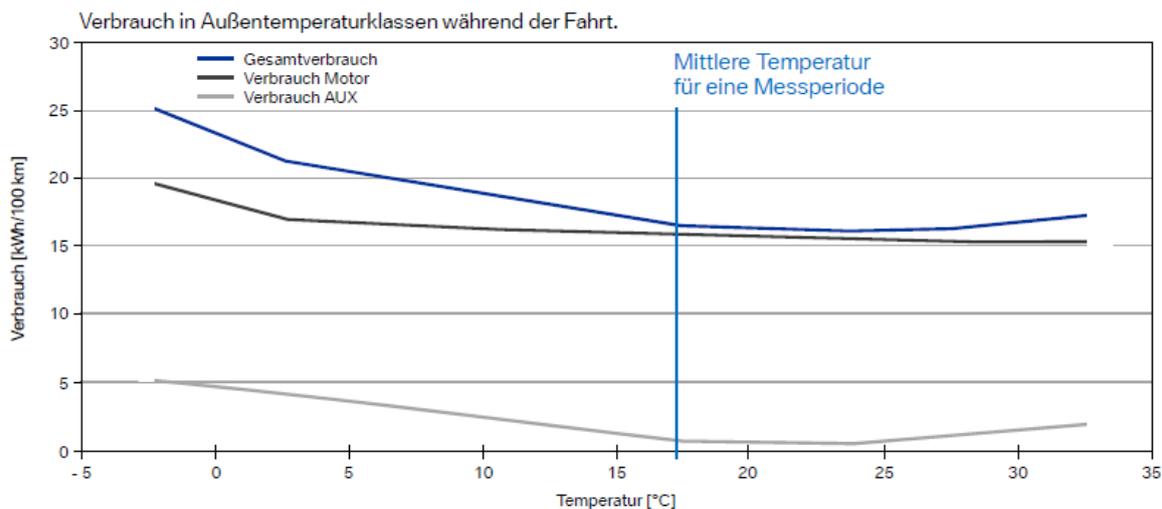


Abbildung 36: Verbrauch Mini E abhängig von der Außentemperatur (Quelle: [BMW 2010b])

6 Energiebereitstellung

Energie ist eine wichtige Grundlage jeder Mobilität und die Energiebereitstellung ein wichtiger Bestandteil der Ökobilanz. Heute werden überwiegend fossile Otto- und Dieselmotoren genutzt. Schwerpunkt dieser Studie ist jedoch die Betrachtung von Elektrofahrzeugen - hier spielt die Herstellung des Energieträgers Strom und die Herstellung von Wasserstoff eine wichtige Rolle in der Ökobilanz während die Nutzung des Fahrzeuges den Energieverbrauch bestimmt. Die zur Herstellung dieser Energie auftretenden Aufwendungen von den Lagerstätten bis zum Tank bzw. bis zur Batterie (Well-to-Tank), dazu gehört die Förderung von Rohstoffen, deren Transport und Verarbeitung in Raffinerien oder Kraftwerken sowie die weitere Verteilung bis zum Fahrzeug (siehe Abbildung 37), werden in den Umweltbilanzen berücksichtigt.

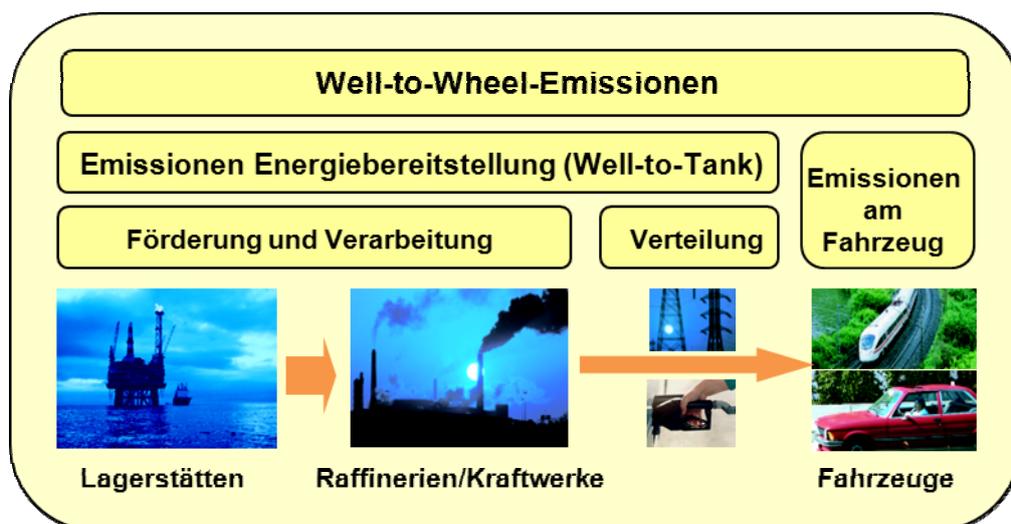


Abbildung 37: Überblick Well-to-Wheel-Emissionen

In UMBReLA werden im wesentlichen Elektrofahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge und Referenzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor betrachtet. Dementsprechend werden die folgenden Energiebereitstellungsketten betrachtet:

- Strom aus verschiedenen Kraftwerkstypen (Kapitel 6.1)
- Wasserstoff über verschiedene Herstellungspfade (Kapitel 6.2)
- Verschiedene flüssige Kraftstoffe (Kapitel 6.3)

Der Fokus der Betrachtung liegt auf den Energieträgern der Zukunftskonzepte, also der Strom- und Wasserstoffbereitstellung. Hier hängt die Umweltbilanz stark von den zukünftigen Rahmenbedingungen der Stromerzeugung ab, die in verschiedenen Szenarien abgebildet wird. Zukünftige Änderungen in der Kraftstoffzusammensetzung (Biokraftstoffe und Kraftstoffe aus unkonventionellen Vorkommen) werden ebenfalls berücksichtigt.

6.1 Strombereitstellung

6.1.1 Datengrundlage

Es wird mit ein hochdifferenziertes Ökobilanzmodul zur Berechnung von Strombereitstellungsketten verwendet. Darin sind die grundsätzlichen Energieträger- und Kraftwerksarten als einzelne Module hinterlegt. Dieses Strommodul wird standardmäßig in allen IFEU-Ökobilanzen verwendet.

Der Energieträgermix und wesentliche technische Kenngrößen der Energieanlagen können frei eingestellt werden. Die Systemgrenze des IFEU-Strommaster umfasst die gesamte Well-to-Tank-Kette, also

- die Brennstoffvorketten (Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Kokerei- und Hochofengas, Kernbrennelemente, Biomasse)
- die Kraftwerksprozesse zur Stromerzeugung mit Stein- und Braunkohle, Erd-, Koks- und Hochofengas, Biomasse, sowie Kern-, Wasser- und Windkraft.
- die Verteilung des Stroms bis zum Verbraucher mit entsprechenden Leitungs- und Umspannverlusten.

Die Aufwendungen der Herstellung von Anlagen werden bei der fossilen und nuklearen Stromerzeugung vernachlässigt und nur bei den Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien berücksichtigt. Hier stellen sie aufgrund der als gegeben angenommen Primärenergie der erneuerbaren Quellen die einzige Quelle von Umweltbelastungen dar. Betrachtet wird dann die Bereitstellung der bedeutendsten Baustoffe (Stahl in verschiedenen Legierungsstufen, div. NE-Metalle, Kunststoffe, Zement, Beton, Bitumen u.a.) sowie die Energieaufwendungen zur Fertigung der Anlagen (Daten nach [Ecoinvent 2008]).

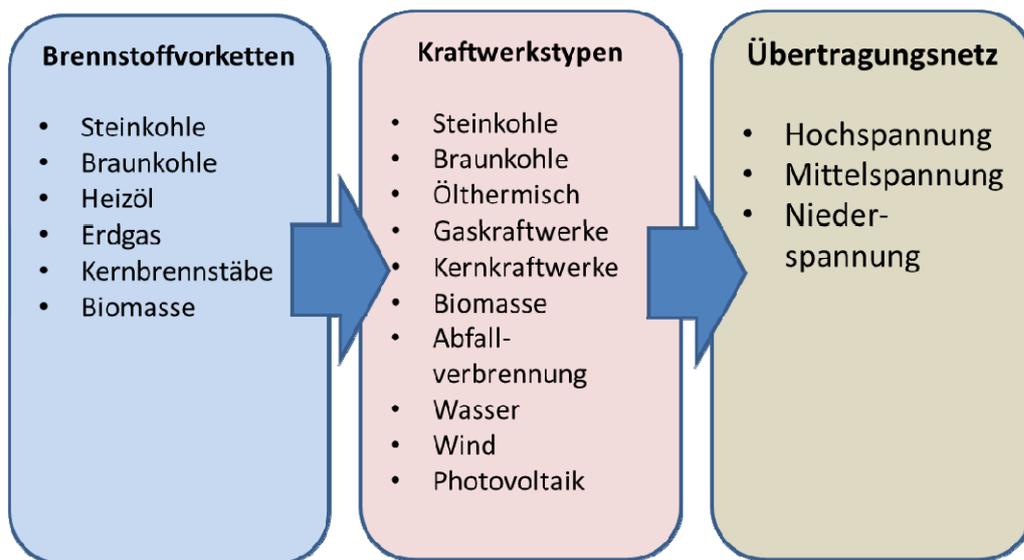


Abbildung 38: Module des IFEU-Strommaster

Abbildung 38 gibt eine Übersicht der einzelnen Module im IFEU-Strommaster: Brennstoffvorketten, Kraftwerkstypen und Netzebenen. Die Systemgrenze der Vorketten erstrecken sich vom Abbau bis zum Werktor des jeweiligen Kraftwerks und umfassen Transport, Aufbereitungs- und ggf. Raffinationsschritte. Berücksichtigt sind auch die Hilfs- und Betriebsstoffverbräuche wie auch die Beseitigung von entstehenden, nicht verwertbaren Abfällen.

Die Systemgrenze jedes Kraftwerksmoduls umfasst dann die eigentlichen Kraftwerksprozesse zur Stromerzeugung, die Vorketten der Hilfs- und Betriebsstoffe (z.B. Kalksteintmehl, Ammoniak) und die Beseitigung von entstehenden, nicht verwertbaren Abfällen auf Inertstoff- (z.B. Aschen, Granulate) oder Sonderabfalldeponien (z.B. REA-Schlamm).

Braun- und Steinkohle- und Gaskraftwerke erzeugen heute über 50 % des Stroms in Deutschland (Tabelle 24). Altersstruktur und Technologien unterscheiden sich deutlich. Für die Ermittlung der zukünftigen Umweltwirkungen des Kraftwerksparks werden jeweils moderne Braun- und Steinkohle- sowie Gaskraftwerk zu Grunde gelegt, die einen gegenüber dem Bestand höheren mittleren Wirkungsgrad aufweisen. Zusätzlich wird von einer

Reduktion der NO_x-Emissionen gegenüber dem Bestand von 20 % ausgegangen (dies kann z.B. durch Rauchgaswäsche nach neuestem Stand der Technik erreicht werden). Die Verbesserung des Kraftwerksparks in den Szenarien für 2030 wird durch einen größeren Anteil moderner Kraftwerke abgebildet.

Berücksichtigt werden auch Umspann- und Leitungsverluste. Die Höhe dieser Verluste hängt vom Spannungsniveau des nachgefragten Stroms ab. Als mittlere Netzverluste werden 6,1 % angenommen.

Tabelle 24: Stromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern (2010)

	Braunkohle	Steinkohle	Erdgas	Kernenergie	Erneuerbare	Sonstige
Anteil	23,5 %	18,8 %	13,4 %	22,5 %	16,5 %	5,5 %
Quelle: [AGEB 2011b]						IFEU 2011

Tabelle 25: Mittlerer Wirkungsgrad verschiedener Kraftwerke

Kraftwerkstyp	Technologie	Mittlerer Wirkungsgrad
Steinkohle	Modern	45,0 %
	Alt	34,7 %
Braunkohle	Modern	42,1 %
	Alt	30,5 %
Gas GuD	Modern	60,9 %
	Mittel	43,3 %
Gasturbine	Mittel	36,8 %
MVA	Mittel	31,8 %
Quelle: [Pehnt et al. 2011]	IFEU 2011	

Die mit Bereitstellung von Strom verbundenen Treibhausgasemissionen (siehe Abbildung 39) sind sehr unterschiedliche: Bei einem modernen Braunkohlekraftwerk entstehen durch die Bereitstellung einer Kilowattstunde Strom nach IFEU-Strommodul fast 1 kg Treibhausgasemissionen, jedoch nur wenige Gramm bei Nutzung von Windkraft. CO₂-intensiv ist vor allem die Nutzung fossiler Energieträger, wobei hier Gaskraftwerke am besten abschneiden. Durch den großen Anteil von Kohlekraftwerken an der Stromproduktion liegen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen in Deutschland bei etwas über 600 g CO₂ pro kWh.

Auch bei den übrigen betrachteten Umweltwirkungskategorien zeigen die erneuerbaren Energiequellen deutliche Vorteile gegenüber den fossilen Energieträgern. Hier und bei der Kernenergie schlagen die Umweltwirkungen des Anlagenbaus zu Buche, die bei den anderen Kraftwerken vernachlässigt wurden. Die Ergebnisse sind daher nicht direkt vergleichbar. Kernenergie ist mit sehr geringen hier bilanzierten Umweltwirkungen verbunden, bringt jedoch ungelöste Probleme, wie z.B. die Endlagerung radioaktiver Abfälle mit sich. Diese kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht belastbar bilanziert werden und ist daher in den verwendeten Daten nicht berücksichtigt.

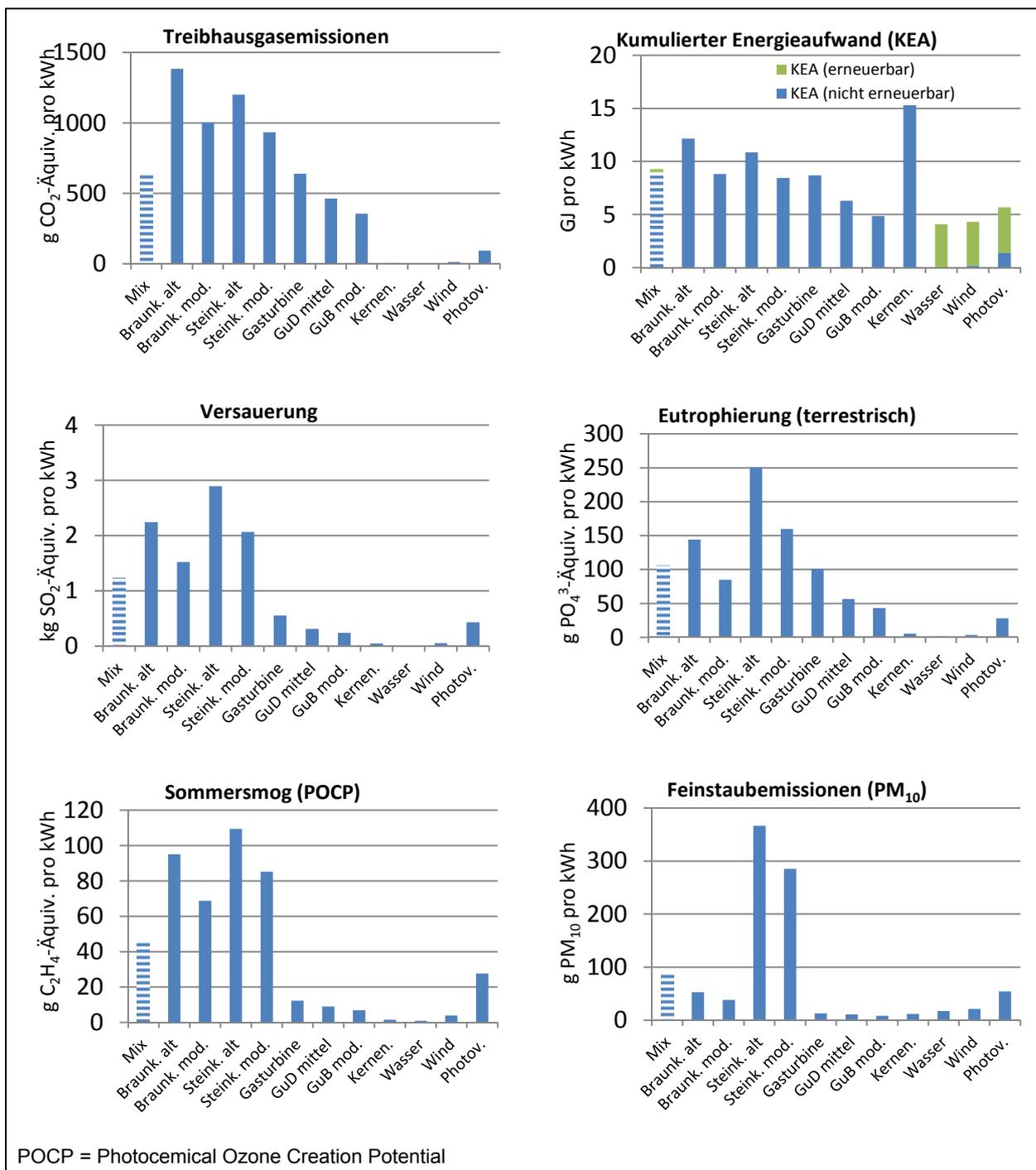


Abbildung 39: Umweltwirkungen der Strombereitstellung durch verschiedene Kraftwerke (2010)

6.1.2 Szenarien zum 'Betankungsstrommix'

Strom wird heute in Deutschland hauptsächlich in Braunkohle-, Steinkohle- und Kernkraftwerken erzeugt (siehe Tabelle 24). Die Umweltwirkungen der Stromerzeugung unterscheiden sich stark zwischen den einzelnen Kraftwerkstypen. Damit kommt dem Strommix der zur Betankung der Elektrofahrzeuge zur Anwendung kommt ('Betankungsstrommix') eine entscheidende Bedeutung für die Umweltbilanz zu. Der zukünftig weiter steigende Anteil erneuerbarer Energiequellen wird entsprechend in Szenarien abgebildet.

Im Strombereich existiert keine direkte physische Kopplung zwischen erzeugtem und verwendetem Strom, wie z.B. bei Kraftstoffen. Die Betrachtung eines Betankungsstrommixes ist daher vor allem eine Frage der Anrechnung im Sinne von Ursache und Wirkung.

Bei Elektrofahrzeugen handelt es sich um einen neuen – also zusätzlichen – Stromverbraucher. So lange nur wenige Elektrofahrzeuge genutzt werden, kann der Einfluss auf die Zusammensetzung der Stromerzeugung vernachlässigt werden. Steigt der zusätzliche Stromverbrauch, müssen entweder neue Kraftwerke gebaut werden oder es gelangen Kraftwerke zum Einsatz, die sonst nicht zur Stromerzeugung herangezogen worden wären. Diese sogenannten „marginalen Kraftwerke“ (oder Grenzkraftwerke) können beispielsweise ältere Steinkohlekraftwerke oder auch neue effiziente Gaskraftwerke sein. Zusätzlich haben Ladestrategien Einfluss auf die zeitliche Abnahme des Stroms.

Neben einer Betrachtung des durchschnittlichen deutschen Strommix wird für das Bezugsjahr 2030 daher auch der Strommix des zusätzlichen Strombedarfs durch Elektroautos betrachtet („Marginalbetrachtung“). Marginalbetrachtungen zur Elektromobilität werden von IFEU im Rahmen der ökologischen Begleitforschung zum vom BMU geförderten VW-Flottenversuch Elektromobilität und dem Begleitforschungsprojekt OPTUM des Öko-Institut durchgeführt. Im VW-Flottenversuch Elektromobilität untersuchen IFEU, Fraunhofer ISI und ISE, DLR, RWTH Aachen und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) die Energieversorgung der nächsten Jahrzehnte unter Einbezug von Elektromobilität (siehe [Pehnt et al. 2011]). Ein wichtiges Ziel des Projektes ist die verstärkte Integration erneuerbarer Energien bei der Beladung der Fahrzeuge.

Um den „Betankungsstrommix“ zu quantifizieren, werden verschiedene Modelle miteinander gekoppelt (siehe [Pehnt et al. 2011]). Im Kern sind dies ein lang- und ein kurzfristiges energiewirtschaftliches Modell (PERSEUS, siehe [Rosen 2008], und PowerACE, siehe [Sensfuss 2008]), so dass sowohl strukturelle Änderungen im Kraftwerkspark als auch Markteinflüsse modelltechnisch berücksichtigt werden können. Grundlage für die Quantifizierung ist ein Szenario zur zeitlich aufgelösten Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge. Hierfür wurde vom Berliner Institut für Verkehrsforschung des DLR die Anzahl der Elektrofahrzeuge modellmäßig ermittelt, welche konventionelle Fahrzeuge für die Periode 2010-2030 substituieren können. Dabei wurden im Zeitrahmen der Betrachtung dynamische Grundannahmen bezüglich Einschränkungen des Mobilitätsverhaltens von Haushalten und Unternehmen mit Elektrofahrzeugen getroffen (z.B. elektrische Reichweiten bei BEVs, Stellplatzverfügbarkeit und Fernreisen mit dem Pkw). Anschließend erfolgte eine Analyse der Wirtschaftlichkeit einer Substitution eines Benzin- oder Dieselfahrzeuges durch ein PHEV bzw. BEV für den jeweiligen Haushalt bzw. das Unternehmen ([Trommer et al. 2010]). Für die ermittelten 12 Mio. Elektrofahrzeuge in Deutschland im Jahr 2030 ergaben die Modellberechnungen einen Strombedarf 18 TWh oder ungefähr 3,5 % der gesamten heutigen Nachfrage in Deutschland.

Die Berechnungen mit dem Energiemodell PERSEUS zeigen, dass die Folgen von Elektromobilität für den Zubau von Kraftwerkskapazität unter diesen Randbedingungen zunächst weniger relevant sind. Insgesamt zeigt sich jedoch eine deutliche Verschiebung des Kraftwerksparks hin zu erneuerbaren Energien, deren Anteil in 2030 bei über 50 % liegt (siehe Tabelle 26). Darüber hinaus kommen fast ausschließlich moderne Kraftwerke mit fossilen Energieträgern zum Einsatz.

Eine stündlich aufgelöste Grenzkostenbetrachtung des Kraftwerksparks sowie die Einspeisung von erneuerbaren Energien wurden im Strommarktmodell PowerACE abgebildet. Hierzu werden drei verschiedene Ladestrategien betrachtet:

- **Tanken nach dem letzten Weg:** Ein Szenario, in dem die Fahrzeuge unmittelbar und ohne weitere Steuerung nach ihrem letzten Weg, also beispielsweise abends nach der Heimkehr, aufgeladen werden (Szenario „Letzter Weg“).
- **Demand Side Management (DSM):** Ein Szenario mit Lastmanagementanreiz, der sich an den Börsenpreisen orientiert. Dadurch werden Ladevorgänge vergleichmäßig und verlagert in Zeiten, in denen z.B. das Windenergieangebot besonders hoch und die Stromnachfrage gering ist (Szenario „DSM“).
- **DSM+Erneuerbare Energien:** Ein Szenario, in dem zusätzlich zu diesem Lastmanagement soviel erneuerbare Energiekapazität zugebaut wird, wie für die jährliche Erzeugung an Fahrstrom erforderlich ist (Szenario „DSM+EE“).

Das ungesteuerte Laden nach dem letzten Weg führt dazu, dass der zusätzliche Strombedarf der Elektrofahrzeuge vor allem durch Gaskraftwerke gedeckt wird, es steigt jedoch auch der Anteil an Steinkohle. Diese Marginalbetrachtung führt im Vergleich zum durchschnittlichen Strommix in 2030 zu deutlich höheren Treibhausgasemissionen pro Kilowattstunde sowie zu einem starken Anstieg der Spitzenlast. Durch das ungesteuerte Laden der rund 12 Millionen angenommenen Fahrzeuge steigt die Spitzenlast um 6,2 GW an.

Dieser Anstieg kann durch intelligentes Laden („DSM“) um 5 GW gesenkt werden, d.h. die Spitzenlast steigt nur noch um 1,2 GW an (siehe auch [Dallinger 2010]; [Link et al. 2010]). Zusätzlich können durch das gesteuerte Laden etwa 30 % des Stroms genutzt werden, der in Phasen eines Überangebotes (z.B. bei starkem Wind) abgeregelt werden müsste - dies entspricht einer Strommenge von rund 600 GWh. Damit würde ca. 3,5 % des Fahrstroms von E-Mobilen durch Überschussstrom bereitgestellt werden können. Dabei sind noch keine netzseitigen Restriktionen berücksichtigt. Intelligentes Laden reduziert also die Spitzenlast und trägt dazu bei, zusätzlichen fluktuierenden Strom aus Windenergie- und Solaranlagen zu integrieren.

Die Verlagerung des Ladevorgangs führt jedoch auch dazu, dass durch die Verstetigung des Ladevorgangs vor allem Kraftwerke mit geringen variablen Kosten genutzt werden - in diesem Fall Steinkohlekraftwerke. Durch diese relevante Verschiebung der Stromerzeugung von Gas GuD-Kraftwerken hin zu Steinkohlekraftwerken, sind die Treibhausgasemissionen pro getankter Kilowattstunde im DSM-Szenario noch einmal höher als bei der ungesteuerten Betankung nach dem letzten Weg (siehe Abbildung 40).

Erst durch den Zubau von zusätzlichen Anlagen zur Produktion von erneuerbarem Strom in Höhe des geladenen Fahrstroms in Verbindung mit gesteuertem Laden (DSM+EE) kommt es zu einer deutlichen Reduktion der mit der Strombereitstellung verbundenen Treibhausgasemissionen. Das Ziel einer nahezu klimaneutralen Betankung wird dann fast erreicht. Je nach Fragestellung der Ökobilanz ist ein durchschnittlicher oder ein marginaler Strommix zu betrachten - daher werden für 2030 auch beide dargestellt.

Tabelle 26: Szenarien für den Betankungsstrom in 2030

	Durchschnitt		Marginalbetrachtung	
	Mix 2030	Letzter Weg	DSM	DSM+EE
Braunkohle (modern)	16,7%	5,4%	10,1%	
Braunkohle (alt)	0,3%	0,9%	1,3%	
Steinkohle (modern)	21%	26,0%	45,5%	2,0%
Steinkohle (alt)	0,7%	1,5%	2,3%	
Gas GuD (modern)	8,2%	54,9%	35,7%	
Gas GuD (mittel)	0,1%	1,4%	0,2%	
Gasturbine	0,4%	9,7%	1,2%	
MVA	0,7%	0,1%	0,1%	
Wasserkraft	5,0%	0%	0,4%	9,7%
Windkraft	37,4%	0%	2,6%	70,5%
Photovoltaik	9,5%	0%	0,7%	17,8%
EE Gesamt	51,9%	0%	3,6%	98,2%
Quelle: [Pehnt et al. 2011]				IFEU 2011

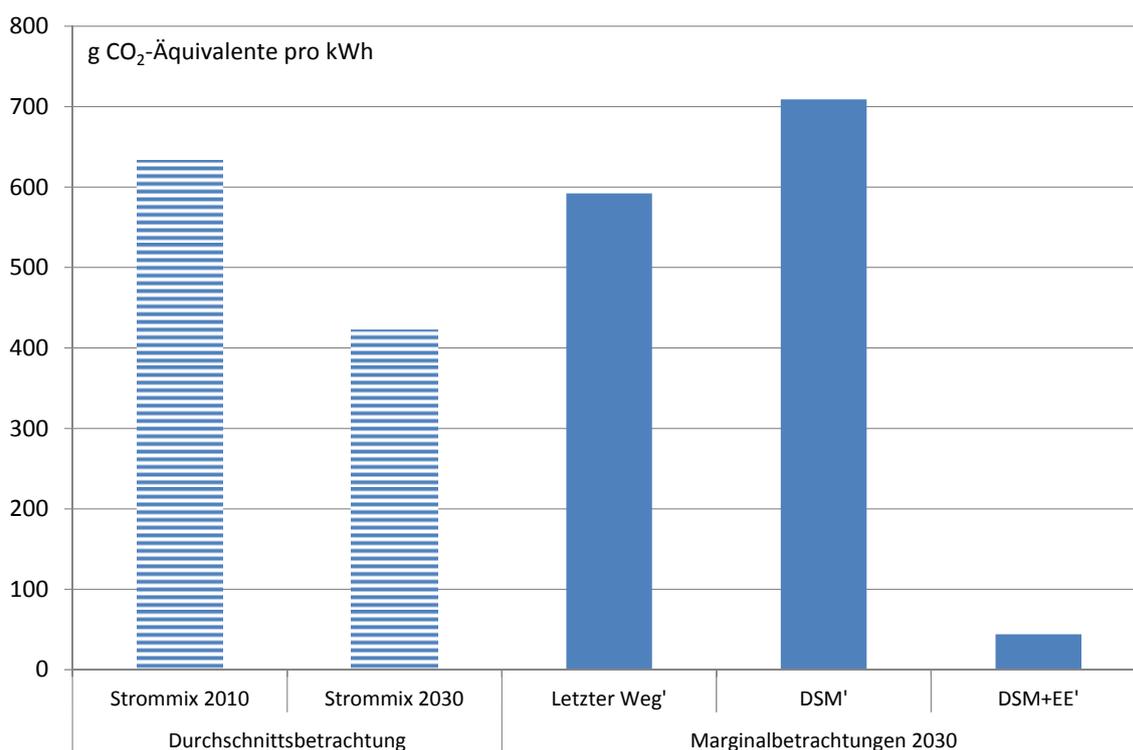


Abbildung 40: Treibhausgasemissionen verschiedener Strombereitstellungsszenarien 2010 und 2030

6.2 Bereitstellung von Wasserstoff

Wasserstoffmobilität wird parallel zur batterieelektrischen Mobilität in Forschung, Entwicklung und Pilotserie untersucht. Für einen Systemvergleich ist ökologische Bilanzierung verschiedener Produktionsverfahren von Wasserstoff notwendig. Wasserstoff kann mit einer Fülle von Verfahren produziert werden. Neben der klassischen Dampfreformierung

von Erdgas und der elektrolytischen Produktion stehen verschiedene Verfahren und verschiedene Rohstoffe zur Produktion zur Verfügung, beispielsweise Kohle und Biomasse. Daher werden zunächst die relevanten Bereitstellungspfade beschrieben. Anschließend erfolgt die Beschreibung der Datengrundlage für die Bilanzierung und die Darstellung der Wirkungsabschätzung.

6.2.1 Relevante Bereitstellungspfade

Wasserstoff kann auf verschiedenste Weise gewonnen werden: Sowohl durch Vergasung bzw. Reformierung aus organischen Brennstoffen wie Erdgas, Biomasse und Kohle als auch über die Elektrolyse von Wasser. Aus einer Vielzahl an prinzipiell technisch möglichen Produktionsverfahren werden hier die Erdgasdampfreformierung, die Vergasung von Kohle und Biomasse und die Elektrolyse betrachtet (siehe Abbildung 41). Diese Verfahren sind wichtige Bereitstellungspfade für eine zukünftige Wasserstoffmobilität.

Weitere Herstellungsverfahren wie die photobiologische Erzeugung von Wasserstoff oder die solarthermische Wasserspaltung sind vielversprechend. Die aktuelle Effizienz bzw. die technische Reife ermöglichen allerdings noch keine kommerzielle Nutzung. Außerdem fällt Wasserstoff bei der Chlorproduktion in Raffinerien und Kokereien als Nebenprodukt an. Die externe Nutzung von diesem Industrie-Wasserstoff gilt langfristig jedoch als rückläufig, da Raffinerien selbst einen zunehmenden Bedarf an Wasserstoff aufweisen und die Anzahl an Kokereien in Deutschland aufgrund des Elektrostahlverfahrens und der insgesamt abnehmenden Kokskohleförderung sinkt [NRW 2009].

Bei den untersuchten Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff handelt es sich, abgesehen von der on-site Elektrolyse, um zentrale, d.h. großtechnische Anlagenkonzepte. Der erzeugte Wasserstoff wird zur Tankstelle transportiert. Prinzipiell kann der Transport von Wasserstoff sowohl in gasförmiger als auch in flüssiger Form erfolgen, wobei der gasförmige Transport per Lkw und per Pipeline möglich ist.

Auf Grundlage der Studie [GermanHy 2009], welche unter anderem der Frage nach einem kostenoptimalen Aufbau einer zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur nachgeht, lassen sich in Abhängigkeit der Wasserstoffnachfrage zwei Haupttransportpfade für Wasserstoff definieren:

- Lkw-Transport von Flüssigwasserstoff (LH_2) und
- Pipelinetransport von Druckwasserstoff (CGH_2)

Während nach [GermanHy 2009] der Lkw-Transport in der Einführungsphase von Brennstoffzellen-Pkw und in Regionen mit geringer Tankstellendichte dominieren wird, ist bei einem höheren Anteil von Wasserstofffahrzeugen der Ausbau eines Pipelinenetzes die wirtschaftlich attraktivere Möglichkeit.

Die Betankung des Brennstoffzellen-Pkw erfolgt durch Überströmen von hochkomprimiertem Wasserstoff aus der Tanksäule in den Fahrzeugtank. Um einen effektiven Tankdruck von 700 bar zu erreichen muss das Druckniveau von Wasserstoff mit Hilfe eines Booster-Kompressors zuvor auf 880 bar angehoben werden. Die mehrstufig arbeitenden Kompressoren ermöglichen kurze Betankungszeiten.

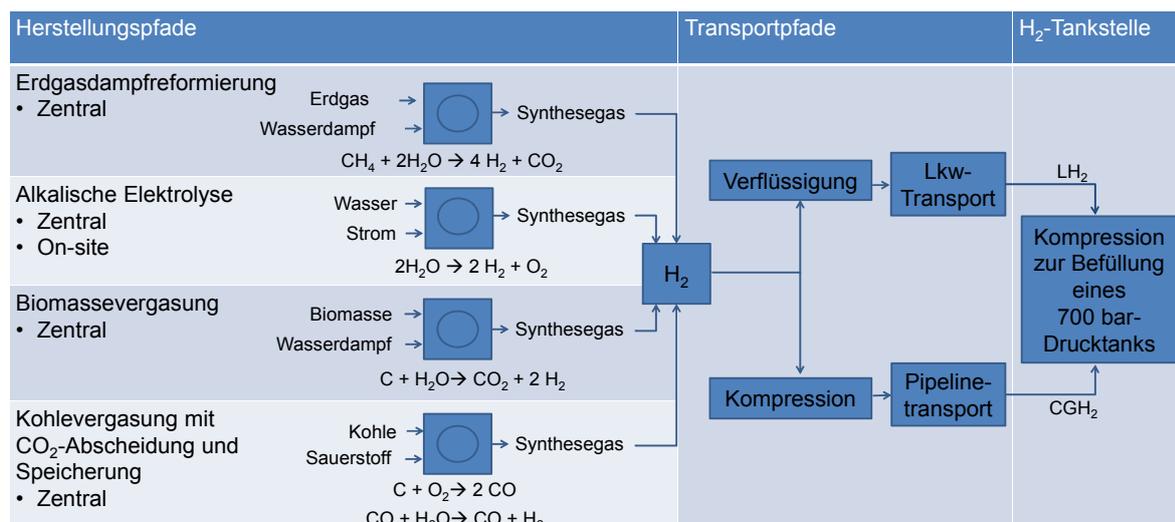


Abbildung 41: Untersuchte Bereitstellungspfade für Wasserstoff

6.2.2 Datengrundlage und Systemgrenze

Die strategisch ausgerichtete Bilanzierung zukünftiger Technologien in einem noch marktfernen Stadium ist mit Datendefiziten verbunden. Während Anlagen zur Dampfpreformierung und Elektrolyse großtechnisch verfügbar sind, basieren die Daten der Biomasse- und Kohlevergasung auf wissenschaftlichen Modellen und haben dementsprechende Unsicherheiten. Dies gilt ebenfalls für die Datengrundlage der Wasserstoffinfrastruktur, wobei insbesondere für den Pipelinetransport von Wasserstoff und die Fahrzeugbetankung bei 700 bar bisher keine Praxisdaten vorliegen.

Die Systemgrenze der Wasserstoffbereitstellung umfasst:

- die Vorketten für Steinkohle, Erdgas und Biomasse
- die Bereitstellung von Strom aus dem deutschen Strommix 2030 und - in einer Marginalbetrachtung – aus erneuerbaren Energien
- den Bau von Produktionsanlagen und Transportinfrastrukturen für Wasserstoff
- die Prozesse zur Erzeugung, Kompression und Verflüssigung von Wasserstoff
- sowie die Betankung des Brennstoffzellen-Pkw bei 700 bar.

6.2.2.1 Erdgasdampfpreformierung

Wasserstoff wird heute weltweit mit einem Anteil von etwa 48 % durch die katalytische Reformierung von Kohlenwasserstoffen mit Wasserdampf hergestellt [Ball et al. 2009]. Dabei ist die Verwendung von Erdgas, aufgrund des gegenüber anderen Kohlenwasserstoffen günstigeren spezifischen CO₂-Ausstoßes und der flächendeckenden Verfügbarkeit, besonders zur Reformierung geeignet.

Die Erdgasdampfpreformierung stellt ein etabliertes Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff dar und wird seit vielen Jahren eingesetzt, um die chemische Industrie und Raffinerien mit Wasserstoff zu versorgen. Aus diesem Grund wird insbesondere dieses Verfahren bei einem Mehrbedarf durch die Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen relevant sein.

Bilanziert wird der Anlagenbau und -betrieb einer Produktionsanlage (8000 Nm³ H₂/h) der Firma Lurgi, deren Daten in [Pehnt 2002] veröffentlicht wurden. Der Wirkungsgrad des Dampfreformers hängt von der Anlagenkapazität ab und beträgt 72 % (siehe Tabelle 27). Auch bei größeren Wasserstoffproduktionsanlagen steigt der Wirkungsgrad nicht signifikant an; durch Dampfnutzung kann er auf max. 80 % gesteigert werden. Aufgrund des fortgeschrittenen Entwicklungsstandes von Erdgasdampfreformern sind keine signifikanten Effizienzsteigerungen zukünftiger Anlagen zu erwarten.

Tabelle 27: Betriebsparameter von Erdgasdampfreformern - Literaturwerte

Quelle	Anlagenkapazität [Nm ³ H ₂ /h]	Durchschnittliche Wirkungsgrade [%]	Erdgasverbrauch [MJ/MJ H ₂]
[LBST 2003]	100.000	70,4	1,42
[Eichlseder & Klell 2010]	bis zu 100.000	75 - 80	1,33 - 1,25
[Ball et al. 2009]	20.000 – 100.000	71 - 76	1,41 - 1,32
	3.300	69,4	1,44
[Pehnt 2002]	8.000	72	1,39

IFEU 2011

6.2.2.2 Elektrolyse

Die Elektrolyse spielt mit einem Anteil von vier Prozent heute nur eine marginale Rolle bei der weltweiten Herstellung von Wasserstoff [Ball et al. 2009]. Ein wesentlicher Grund dafür sind die hohen Wasserstoffgestehungskosten. Im Zusammenhang mit dem Ausbau erneuerbarer Energien kann die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff jedoch an Bedeutung gewinnen: Fluktuierender erneuerbarer Strom, insbesondere aus der Wind- und Solarstromerzeugung, lässt sich nicht immer vollständig im Stromnetz nutzen und eignet sich daher besonders für den Betrieb von Elektrolyseuren und zur Speicherung in Form von Wasserstoff.

Neben der bereits verbreiteten alkalischen Wasserelektrolyse werden derzeit weitere Elektrolyseverfahren entwickelt, z.B. die Membran- oder Hochtemperaturelektrolyse mit unterschiedlichen Betriebsdrücken (Atmosphärendruck-, Niederdruck- und Hochdruckelektrolyse). Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage moderner Elektrolyseure wird hier die seit langer Zeit kommerziell verfügbare alkalische Elektrolyse bilanziert.

Die Datengrundlage für die Herstellung und den Betrieb eines zentralen Elektrolyseurs (300 Nm³ H₂/h) basiert auf Angaben in [Pehnt 2002]. Der Wirkungsgrad von 70 % entspricht dabei aktuellen Literaturdaten (siehe Tabelle 28).

Zur Abbildung eines on-site Elektrolyseurs, der Wasserstoff direkt an der Tankstelle produziert, wurde beispielhaft ein Elektrolyseur des Herstellers Sagim ausgewählt. Dieser kann bis 80 Nm³ H₂/h produzieren und hat einen Strombedarf von 4,7 kWh/Nm³ H₂ und damit einen Wirkungsgrad von 64 % (der damit höher liegt als bei Elektrolyseuren von Piel). Die Daten zur Bilanzierung des Anlagenbaus wurden entsprechend der Anlagengröße skaliert (Tabelle 29).

Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen der elektrolytischen Wasserstofferzeugung spielt die Herkunft des verwendeten Stroms eine wesentliche Rolle. Im Folgenden wird sowohl die Bereitstellung von Strom aus dem deutschen Strommix 2030 als auch aus erneuerbaren Energieanlagen berücksichtigt.

Tabelle 28: Betriebsparameter zentraler Elektrolyseure in wissenschaftlichen Studien

Quelle	[Pehnt 2002] hier verwendet	[LBST 2003]	[Stubinitzky 2009]	[Stolten & Krieg 2010]	[Wietschel & Bünger 2010]
Kapazität in Nm ³ /h	200 – 400	340	485	100 - 760	800
Strombedarf in kWh/Nm ³	4,3	4,8	4,3	4,3 - 4,65	4,3
Wirkungsgrad in %	70	63	70	65 - 70	70
Druckniveau in bar	30	26	30	30	k.A.
IFEU 2011					

Tabelle 29: Betriebsparameter von on-site Elektrolyseuren (Sagim, Piel)

Hersteller	Sagim			Piel	
Kapazität in Nm ³ /h	0,5 – 1	0,5 - 10	bis zu 80	7,6	bis zu 14
Strombedarf in kWh/Nm ³	5	5	4,7	5,4	5,85
Wirkungsgrad in %	60	60	64	56	51
Druckniveau in bar	8	10	3 - 6	bis 3	18
Quelle: [Stolten & Krieg 2010]					IFEU 2011

6.2.2.3 Biomassevergasung

Verschiedene Arten von biogenen Rohstoffen (Holz, Holzreste, Feldfrüchte, Pflanzen, Gräser, organische Abfälle etc.) können mit geeigneten Verfahren aufgeschlossen und für die Herstellung von Wasserstoff verwendet werden. In der Praxis ergeben sich jedoch einige Einschränkungen in Bezug auf spezifische Rohstoffeigenschaften, Verfügbarkeiten und technischen Möglichkeiten [Stubinitzky 2009]. Im Folgenden wird die Vergasung von Holzhackschnitzeln der schnellwachsenden Baumart Pappel bilanziert. Dabei handelt es sich um eine allotherme Wasserdampfvergasung in einem stationären Wirbelbett. Die Massen- und Energiebilanzen wurden in [Stubinitzky 2009] erarbeitet und auf Basis theoretischer Überlegungen optimiert, wobei unter anderem die energetische Verwendung des anfallenden Restgases berücksichtigt wird. Da die direkten Emissionen beim Betrieb der Anlage nicht im Fokus der Arbeit von [Stubinitzky 2009] stehen, müssen zur Bilanzierung weitergehende Annahmen getroffen werden:

- Da das im Prozess anfallende und energetisch genutzte Restgas hauptsächlich aus Methan besteht, wird dessen energetische Nutzung bei den meisten Emissionen analog zur Erdgasfeuerung ([Ecoinvent 2008]) bilanziert.
- Die Schwefeldioxidemissionen werden über den Schwefelgehalt der Pappel (0,09 Gew.-% nach Analysen von [Craig & Mann 1996]/ [Maier & Vetter 2009]) bestimmt. Zur Reduktion der SO₂-Emissionen wird eine Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) mit einem Abscheidewirkungsgrad von 80 % angenommen.
- Die biogenen Kohlendioxidemissionen werden aufgrund des geschlossenen Kohlenstoffkreislaufs nachwachsender Rohstoffe für die Bewertung des anthropogenen Treibhauseffekts vernachlässigt.

6.2.2.4 Kohlevergasung mit CO₂-Abscheidung und Speicherung

Mittlerweile wurden zahlreiche Verfahren zur Vergasung von Kohle entwickelt, welche sich durch die Art der Prozesswärmeerzeugung (autotherm oder allotherm), die Bauweise des Reaktors (Festbett-, Wirbelschicht- oder Flugstromreaktor), Strömungszustände (Gleichstrom oder Gegenstrom), das verwendete Vergasungsmittel (Sauerstoff, Luft oder Wasserdampf) und durch die Verwendung des entstehenden Synthesegases (energetisch oder stofflich) unterscheiden [Ball et al. 2009].

Bilanziert wird hier eine Vergasungsanlage mit integrierter CO₂-Abscheidung, welche im Rahmen des Clean Coal Fuel-Programms des U.S. Department of Energy (DOE) zur Gewinnung von Wasserstoff aus Kohle konzeptioniert wurde. Ausgehend von den Angaben in [DOE 2003] werden pro MJ Wasserstoff 160 g CO₂ zur langfristigen Speicherung abgetrennt. Zur Bilanzierung der direkten CO₂-Emissionen wurde ein Abscheidewirkungsgrad von 90 % angesetzt ([Wietschel & Bünger 2010], [Henkel 2006]). Die Anlageninfrastruktur richtet sich nach [Fiaschi & Lombardi 2002]. Da bisher keine Anlage dieser Art kommerziell betrieben wird, basieren die Daten der Literaturquellen auf Modellrechnungen.

Die CO₂-Prozesskette, welche sich an die prozessinterne CO₂-Abscheidung mittels Pre-Combustion-Verfahren anschließt, berücksichtigt den Pipelinetransport von komprimiertem Kohlendioxid und den Energieaufwand zur Verpressung von Kohlendioxid in den Untergrund. Die Daten zur Bilanzierung werden aus einer Diplomarbeit zum Thema "Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Storage" ([Henkel 2006]) übernommen, die am IFEU durchgeführt wurde. Ökologische Risiken einer langfristigen CO₂-Speicherung, wie z.B. Leckageverluste, werden nicht berücksichtigt.

6.2.2.5 Wasserstoffverteilung

Lkw-Transport von Flüssigwasserstoff

Bilanziert werden der Strombedarf zur Verflüssigung von Wasserstoff und dessen Lkw-Transport über eine einfache Entfernung von 200 km zur Tankstelle. Der Bau der Verflüssigungsanlage wird vernachlässigt.

Die großtechnische Verflüssigung von Wasserstoff basiert nach dem heutigen Stand der Technik auf dem Claude-Prozess. Der Energieaufwand bestehender Verflüssiger (z. B. der Firma Linde) liegt weit über dem theoretisch minimalen Aufwand zur Verflüssigung von Wasserstoff. Der Stromverbrauch einer Verflüssigungsanlage hängt in der Praxis vom Eingangsdruck des Wasserstoffs und der Größe der Anlage ab. Praxisdaten für Verflüssigungsanlagen mit größeren Kapazitäten existieren nicht. Die Verflüssigung von Wasserstoff wird nach Angaben in [Wietschel & Bünger 2010] bilanziert, wonach eine potentielle Verflüssigungsanlage mit 300 MW_{H₂} im Jahr 2030 einen Verbrauchswert von 0,058 kWh_{el}/MJ H₂ aufweist. Zum Vergleich: In Stubinitzky (2009) wurde von 0,07 kWh_{el}/MJ H₂ für eine Anlage mit 50 t LH₂ pro Tag Kapazität ausgegangen. Für den Lkw gilt nach PEHNT (2002) ein zulässiges Gesamtgewicht von 40 t, eine Transportkapazität von 3,5 t LH₂ und ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von 19,1 MJ Diesel pro km.

Pipelinetransport

Bilanziert werden Material- und Energieaufwand zur Kompression von Wasserstoff an einer Verdichterstation mit Gasturbine und der Bau einer 200 km langen Pipeline durch Einsatz von Stahl und Sand.

Es wird angenommen, dass Wasserstoff die zentralen Produktionssysteme mit einem Druckniveau von 30 bar verlässt. Um eine angemessene Energiedichte im Pipelinenetz zu gewährleisten werden Kopfverdichter zur Kompression von Wasserstoff auf 100 bar eingesetzt. Im Anschluss an die Erdgasdampfreformierung werden diese mit einem Brenngasgemisch aus Erdgas und Wasserstoff betrieben, in den anderen Fällen mit reinem Wasserstoff, da keine Anbindung an das Erdgasnetz gewährleistet ist. Die Auslastung der Pipeline wird mit 90 % angesetzt; eine Kompensation von Druckverlusten wird aufgrund der kurzen Transportstrecke vernachlässigt (Tabelle 30).

Tabelle 30: Pipelinetransport von Wasserstoff

Technische Daten der Pipeline	Einheit	[Pehnt 2002] und [Finkenwirth 1999]
Länge	km	200
Durchmesser	mm	700
Volumenstrom	Nm ³ H ₂ /s	239
Druckniveau	bar	80-100
Lebensdauer	Jahre	50
Auslastung	%	90
Baumaterialien		
Stahl, niedrig legiert	t/km	1030
Sand	t/km	310
Energiebedarf für die Kompression von 30 auf 100 bar		
Kopfverdichter mit Erdgasturbine	MJ Erdgas/MJ H ₂	0,0079
	MJ H ₂ /MJ H ₂	0,0345
Kopfverdichter mit Wasserstoffturbine	MJ H ₂ /MJ H ₂	0,0424
IFEU 2011		

6.2.2.6 Wasserstofftankstellen

Der in flüssigem Zustand an die Tankstelle per Lkw gelieferte Wasserstoff muss vor der Fahrzeugbetankung zunächst verdampft werden. Hierfür nehmen [Wietschel & Bünger 2010] die Verwendung einer elektrisch betriebenen Heizung an und stützen sich dabei auf [Concawe 2007]. Anschließend wird der verdampfte Wasserstoff unter zusätzlichem Energieaufwand auf 880 bar komprimiert. Der gesamte Strombedarf der Vertankung (Stromverbrauch der Heizung; Kompressoren) beträgt nach [Wietschel & Bünger 2010] etwa 0,014 kWh/MJ H₂.

Gasförmiger Wasserstoff wird entweder direkt an der Tankstelle hergestellt (on-site Elektrolyse) oder über das Pipelinenetz bereitgestellt. Der Strombedarf zur Kompression auf 880 bar hängt in diesem Fall entscheidend vom Ausgangsdruck des bereitgestellten Wasserstoffs ab. Dieser beträgt nach der on-site Elektrolyse 6 bar und in Verbindung mit der Wasserstoffpipeline 100 bar. Da sich Literaturangaben häufig auf andere Druckniveaus beziehen, wird der Strombedarf einer adiabatischen Kompression nach [Hobein & Krüger 2010] berechnet:

$$W = [y/(y - 1)] P_0 V_0 [(P/P_0)^{(y-1)/y} - 1]$$

Ausgehend von einem Druck von $P_0 = 0,1 \text{ MPa}$ und dem spezifischen Volumen $V_0 = 11,11 \text{ m}^3/\text{kg H}_2$, kann durch Anwendung der obenstehenden Gleichung die theoretische

tisch notwendige Arbeit (W) zur Kompression von Wasserstoff auf ein beliebiges Druckniveau (P) bestimmt werden. Für den adiabatischen Koeffizienten gilt $\gamma = 1,41$.

Für die Kompression von 6 bar ergibt sich daraus ein Strombedarf von 0,048 kWh/MJ H_2 , für die Kompression von 100 bar 0,03 kWh/MJ H_2 . Wietschel und Bünger (2010) setzen etwas niedrigere Werte an, beispielsweise 0,03 kWh/MJ H_2 für die Kompression von 10 bar. Die angenommenen Werte sind daher als eher konservativ einzuschätzen.

6.2.3 Ergebnisse der untersuchten Bereitstellungspfade

Den größten Anteil an den Treibhausgasemissionen der Wasserstoffbereitstellungskette hat die Herstellung von Wasserstoff. Wird Wasserstoff aus fossilen Energien erzeugt, dann macht der Anteil des Herstellungsprozesses 86 bis 93 Prozent der Treibhausgasemissionen entlang der H_2 -Bereitstellungskette aus (Ausnahme: on-site, wo der Transport entfällt). Wird Wasserstoff jedoch aus regenerativen Energien hergestellt, sinkt der Anteil der THG-Emissionen auf deutlich niedrigere Werte. Die THG-Emissionen im Zuge des Pipelinebaus sind, aufgrund der hohen Auslastung und des Bezuges auf einen Fahrkilometer, sehr gering. Die Auswirkung auf die Klimabilanz durch Bereitstellung per Lkw ist durch die energieintensive Verflüssigung von Wasserstoff deutlich höher.

Die Höhe der Treibhausgasemissionen der Herstellung hängt stark von den eingesetzten fossilen Energieträgern, in Form der Primärenergieträger Erdgas und Kohle oder in Form des deutschen „Strommixes 2030“, ab (siehe Abbildung 42):

- Bei der Erdgasdampfreformierung treten die THG-Emissionen hauptsächlich im Reformierungsprozess auf.
- Die hohen Emissionen bei der Kohlevergasung werden durch die CO_2 -Abscheidung um 90 Prozent reduziert. Damit weist die Kohlevergasung mit 76 g CO_2 -Äquivalente/MJ H_2 die beste Klimabilanz unter den hier berücksichtigten fossilen Herstellungsverfahren auf. Dies wird mit einem hohen energetischen Aufwand erkaufte. Nicht berücksichtigt sind hierbei Fragen der Dauerhaft und Leckage von CO_2 -Emissionen in einer sehr langfristigen Perspektive (siehe [Henkel & Pehnt 2009]).
- Bei der Biomassevergasung entstehen nur geringe fossile CO_2 -Emissionen.
- Bei der Elektrolyse ist der Strommix entscheidend: Wird zusätzlicher Windstrom oder andere erneuerbare Energieträger bereitgestellt, dann liegen die THG-Emissionen etwa 90 Prozent niedriger als beim bundesdeutschen Strommix. Die erkennbaren Mehrmissionen beim Betrieb der on-site Elektrolyseure (ohne Transport) sind auf den geringeren Anlagenwirkungsgrad dezentraler Anlagen zurückzuführen.

Die Energieträger sind auch in den anderen Wirkungskategorien bedeutsam (Abbildung 43): Auch hier haben die Biomassevergasung und Elektrolyse mit erneuerbaren Energien für die meisten Umweltkategorien die beste Bilanz. Die mit Bereitstellung und Nutzung fossiler Energieträger verbundenen Umweltwirkungen machen sich besonders bei Eutrophierung und Versauerung für die Kohle-Anlage wie auch die Elektrolyse bemerkbar. Die vergleichsweise niedrigen Emissionen einer Erdgas-Reformierungsanlage führen zu einer in allen analysierten Umweltkategorien deutlich besseren Umweltbilanz als die Elektrolyse mit dem zukünftigen Strommix bzw. dem Kohlepfad.

Bei der elektrolytischen Bereitstellung von Wasserstoff aus Windstrom verbleiben die Umweltwirkungen der Herstellung der Infrastruktur bzw. die Logistikkette. Der Unterschied zwischen On-site und Zentral liegt in der erforderlichen Bereitstellungskette. In Abbildung

42 ist der Unterschied zwischen der Flüssigwasserstoff- (Lkw) und Druckwasserstoffkette (Pipeline) besonders deutlich erkennbar. Der Energiebedarf der Verflüssigung führt zu steigenden Umweltlasten.

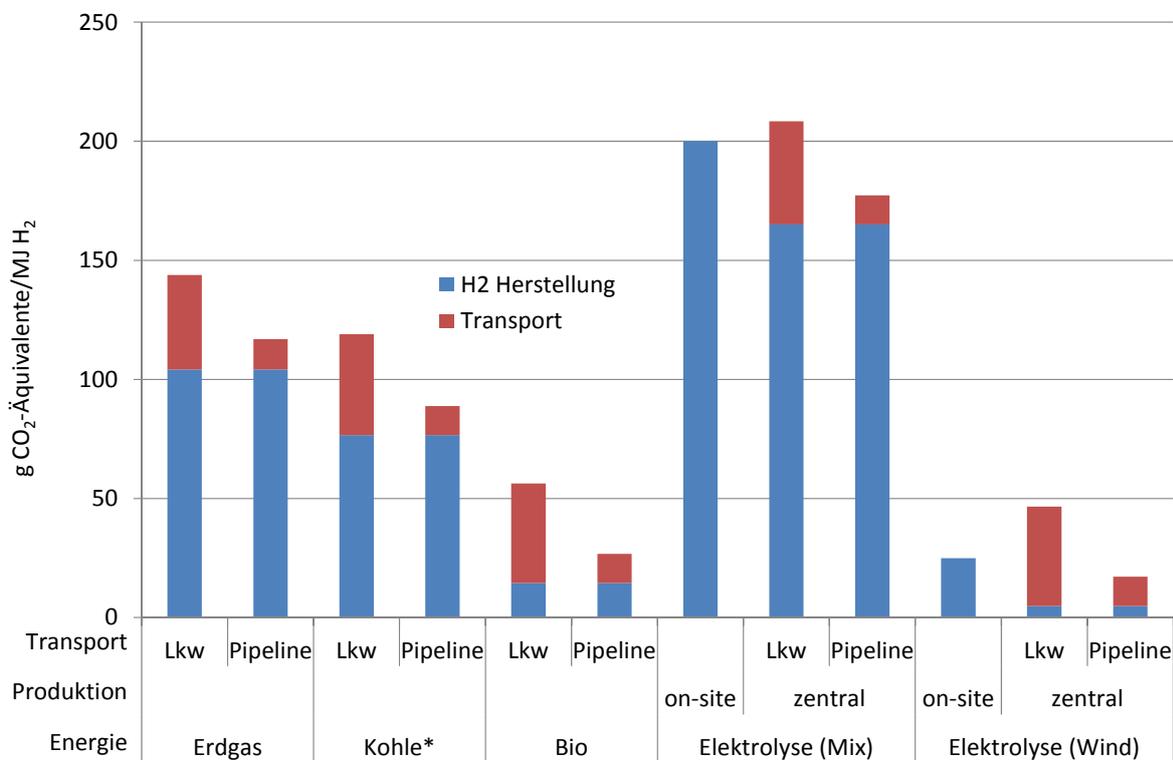


Abbildung 42: Treibhausgasemissionen der Wasserstoffbereitstellung 2030 (verschiedene Pfade)

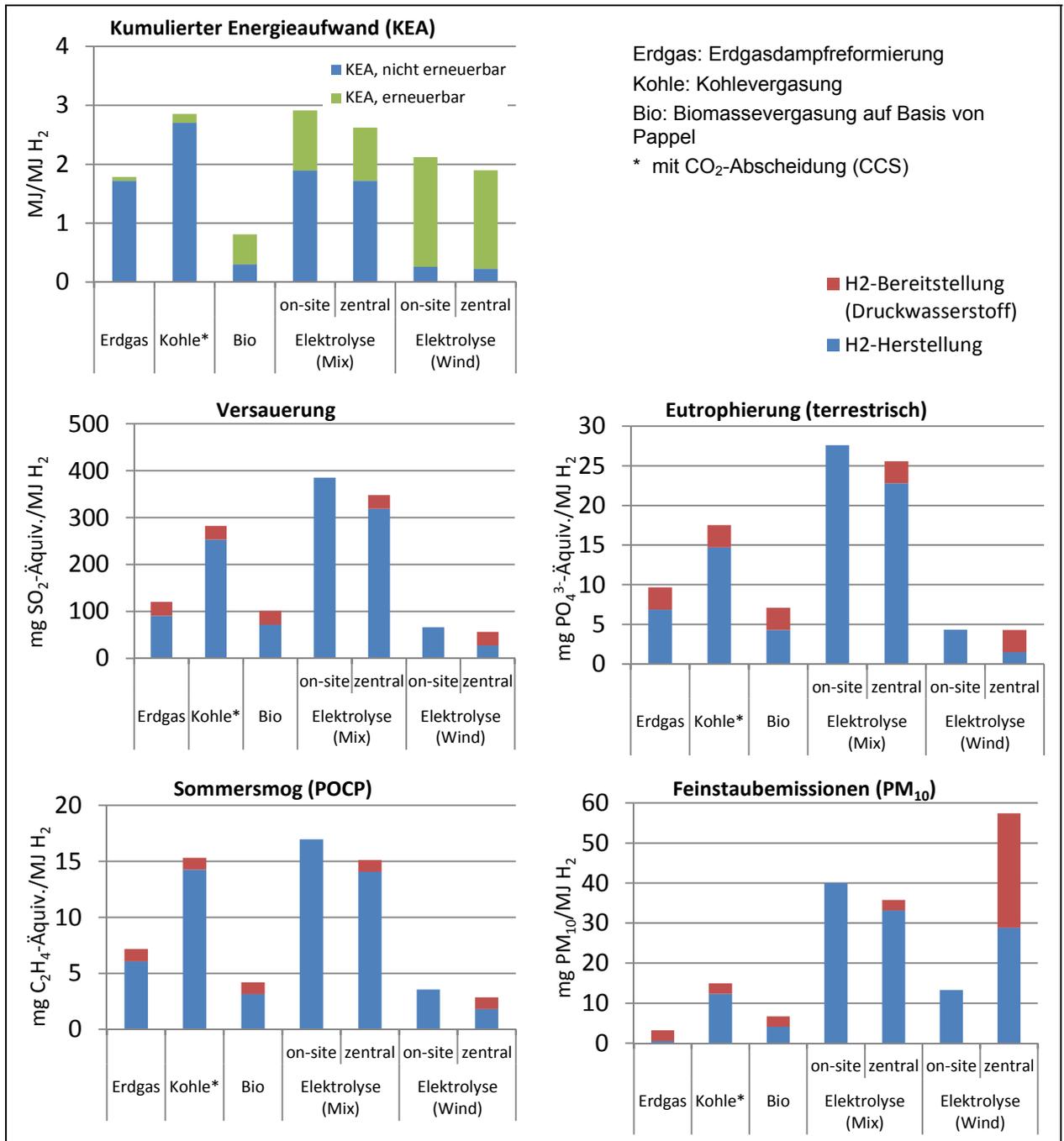


Abbildung 43: Umweltwirkungen der Wasserstoffbereitstellung (Transport mit Pipeline)

6.3 Bereitstellung von Kraftstoffen

Im Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (Diesel- und Otto-Pkw, Plug-In Hybride und Fahrzeugen mit Range Extender) werden heute vorwiegend die erdölbasierte Diesel- und Otto-Kraftstoffe eingesetzt. Aufgrund der EU-Biokraftstoffrichtlinie 2003/30/EC ([EU 2003]) und der in Deutschland bis 2007 wirksamen Steuerbefreiung von Biokraftstoffen hat sich der Anteil der Biokraftstoffe in den letzten Jahren in Deutschland stark erhöht. Biokraftstoffe verbessern in der Regel die Klimabilanz konventioneller Fahrzeuge, da der enthaltene Kohlenstoff zuvor durch Wachstum der Biomasse aus der Atmosphäre entnommen wurde.

Es muss davon ausgegangen werden, dass vor dem Hintergrund knapper werdender konventioneller Erdölfelder auch die Nutzung unkonventioneller Ölvorkommen (z.B. Ölsande) zunimmt. 2035 könnte der Anteil an der weltweiten Ölproduktion nach [IEA 2010] bereits über 10 % betragen. Daher werden hier betrachtet:

- Benzin und Dieselkraftstoff aus deutschen Raffinerien
- Biokraftstoffe (Bioethanol, Biodiesel)
- Neue fossile Kraftstoffpfade (Ölsande, Ctl)

6.3.1 Datengrundlagen

Benzin und Dieselkraftstoff

Die Modellierung der Raffinierprozesse erfolgt in UMBERTO mit einem am IFEU entwickelten Raffinerie-Modell, das in verschiedenen IFEU-Projekten entwickelt und eingesetzt wurde (insbesondere [UBA 2004]). Zudem wird die Bereitstellung der Energieträger (vom Bohrloch bis zur Raffinerie) berücksichtigt. Die wesentlichen Basisdaten gehen zurück auf [Hedden & Jess 1994] und [FZ Jülich 1994], den Mineralölwirtschaftsverband ([MWV 2001]) und zahlreiche von ifeu direkt recherchierte Unternehmensdaten.

Die Zurechnung auf das Kuppelprodukt Heizöl erfolgt nach massenbasierte Allokation. Der Aufwand von Crackprozessen, die zur Minimierung schwerer Rückstände dienen, wird nicht auf die danach verbleibenden Rückstände angerechnet.

Biokraftstoffe

Die Basisdaten zur Bereitstellung der hier betrachteten Biokraftstoffe basieren auf den bisher noch unveröffentlichten Ergebnissen eines Forschungsvorhabens im Auftrag der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik und dem Umweltbundesamt ([IFEU 2011]). Die Berechnungsweise der Treibhausgaswerte für die betrachteten Biokraftstoffe folgt dabei den Regeln der Erneuerbare Energie Richtlinie ([EU 2009b]) und wurde um die klassischen Luftschadstoffe sowie Primärenergie erweitert.

Die Daten für Luftschadstoffe wurden dabei nach der gleichen methodischen Vorgehensweise und den analogen Basisdaten, die den „typischen Werten“ für THG-Emissionen nach Anhang V der Richtlinie 2009/28/EG entsprechen, errechnet. Dabei wurden zunächst die Daten- und Modellstruktur der Herstellungsketten herangezogen, wie sie im von der EU geförderten Projekt BioGrace¹⁰ zu Grunde gelegt wurden, um die „typischen Werte“ für THG-Emissionen nach Anhang V der Richtlinie 2009/28/EG ([EU 2009b]) exakt nachzuberechnen. So wurden z.B. zu den entsprechenden Strom-, Dünger-, Diesel-Vorkettenwerten die Datenwerte zu Emissionen und Primärenergie aus den dort verwendeten Datenquellen in ein Umberto-Netz eingepflegt. Lagen in den Originaldatenquellen nur Treibhausgaswerte vor, so wurden die Daten von IFEU nach Maßgabe höchstmöglicher Analogie zu den Originaldaten ergänzt.

¹⁰ Siehe: <http://biograce.net/>

Neue fossile Kraftstoffpfade

Neben Benzin und Diesel aus Ölsanden wird der Pfad „Coal to Liquid“ (CTL) betrachtet. Die Bilanzierung beider Prozessketten basiert auf [Schimpf 2010], wobei die folgenden Prozessstufen berücksichtigt wurden:

- Rohstoffgewinnung (z. B. Kohlebergbau, Erdölförderung),
- Rohstoff-Transport (z. B. Hydrotransport des Ölsands zur Extraktionsanlage),
- Produktion des Kraftstoffs (z. B. CtL-Werk, Extraktionsanlage und Upgrading bei Ölsanden, Raffinerie),
- Transport und Verteilung des Kraftstoffs,

Vernachlässigt wurden die Herstellung und Entsorgung der Infrastruktur (Maschinen, Betriebsstätten, Transportmittel, Straßen), Wasserentnahmen sowie Umweltwirkungen durch Unfälle.

6.3.2 Ergebnisse für die Kraftstoffbereitstellung

Die hier betrachteten Kraftstoffe unterscheiden sich z.T. erheblich hinsichtlich ihrer Dichte und ihres Energiegehaltes (siehe Tabelle 31). Die Ergebnisdarstellung erfolgt daher energiebasiert pro Energieinhalt (MJ).

Tabelle 31: Kraftstoffeigenschaften

	Benzin fossil	Bioethanol	Diesel fossil	Biodiesel
Energiegehalt (kJ/kg)	43.543	26.917	42.960	37.242
Dichte (kg/l)	0,742	0,782	0,832	0,879
Quelle: [IFEU 2009]				IFEU 2011

Die mit der Herstellung eines MJ Kraftstoff verbundenen Treibhausgasemissionen (Abbildung 44) liegen für Otto-Kraftstoff aus konventionellen Ölvorkommen bei etwa 18 g CO₂-Äquivalenten/MJ, für Diesel bei etwa 12 g CO₂-Äquivalenten/MJ. Diese Treibhausgasemissionen betragen damit für Otto-Kraftstoff etwa 25 % und für Diesel etwa 16 % der CO₂-Emissionen die durch Verbrennung der Kraftstoffe entstehen.

Die Treibhausgasemissionen der Bereitstellung von Kraftstoffen aus Ölsanden sind etwa doppelt so hoch. Besonders hohe Emissionen sind mit Coal-to-Liquids (CtL) verbunden, diese liegen etwa 20x höher als bei Dieselmotorkraftstoff aus konventionellen Ölvorkommen.

Die Bereitstellung von Biokraftstoffen ist mit deutlich höheren Treibhausgasemissionen verbunden als die Herstellung von Kraftstoffen aus fossilen Rohstoffen. Diese resultieren hauptsächlich aus den landwirtschaftlichen Prozessen (z.B. Düngung). Es entsteht jedoch keine weitere Klimabelastung aus der Kohlenstoffverbrennung in der Nutzungsphase, da der enthaltene Kohlenstoff vorher der Atmosphäre entnommen wurde. In der Gesamtbeurteilung (Well-to-Wheel) stehen Biokraftstoffe daher in der Regel deutlich besser da als fossile Kraftstoffe.

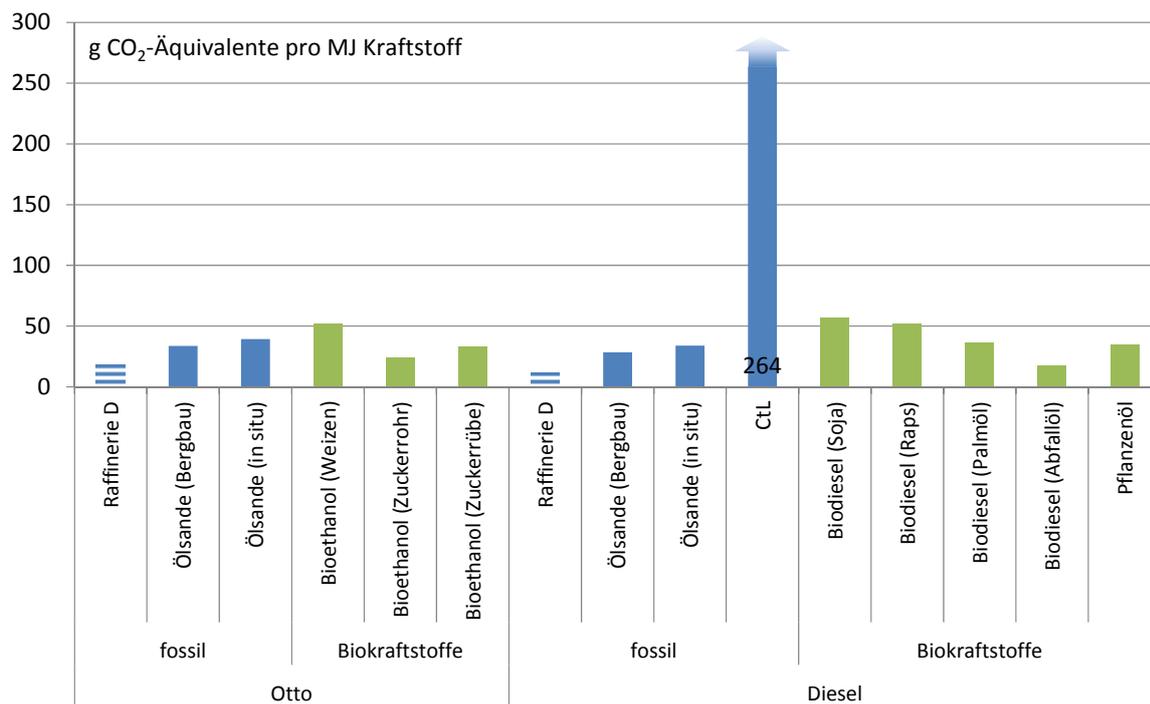
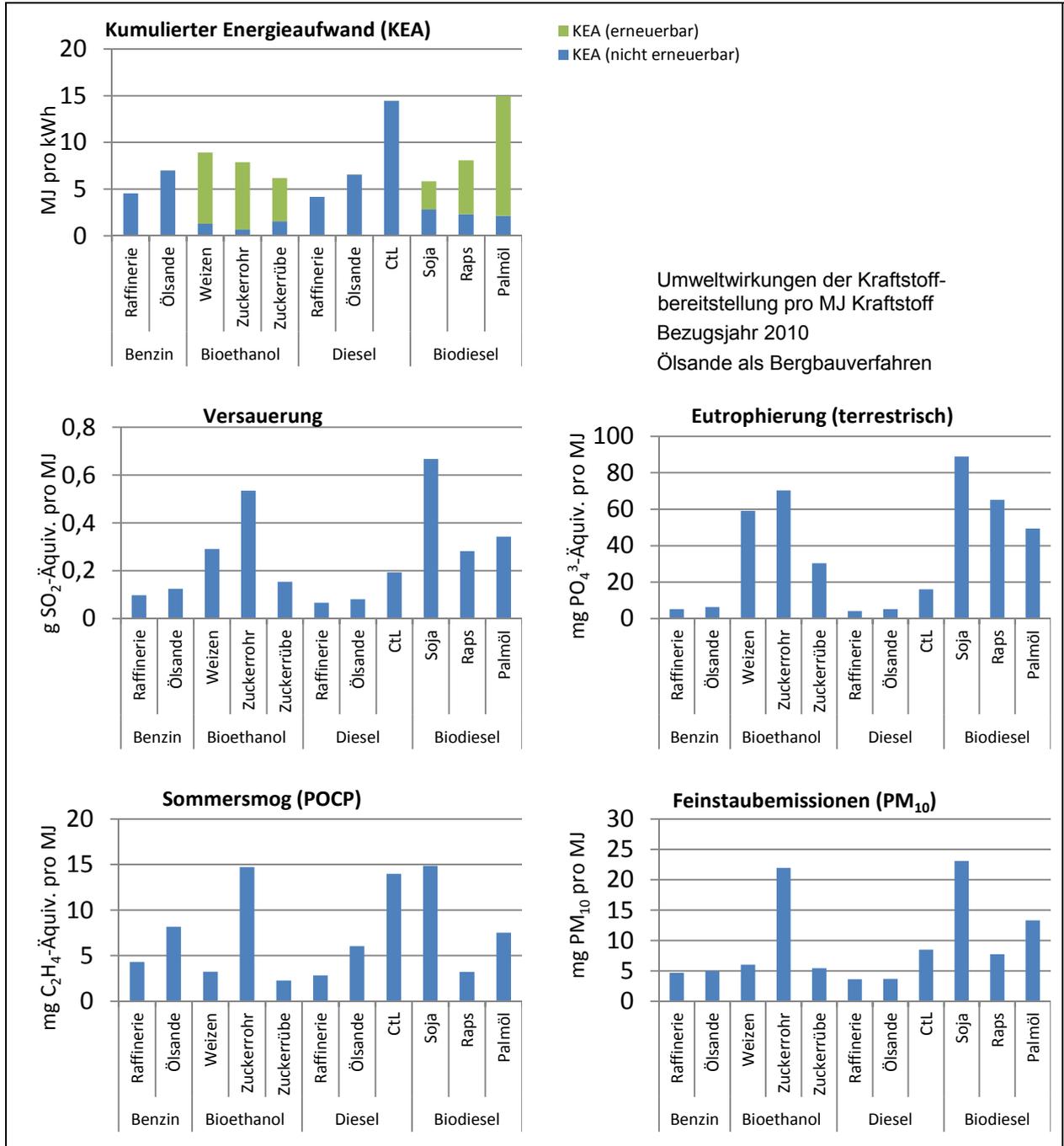


Abbildung 44: Treibhausgasemissionen der Bereitstellung von Kraftstoffen (Deutschland 2010)

Auch in den übrigen Wirkungskategorien zeigen sich deutliche Unterschiede (siehe Abbildung 45):

- Kraftstoffe aus konventionellen Ölvorkommen schneiden neben den Treibhausgasemissionen auch bei Umweltwirkungen wie Versauerung, terrestrischer Eutrophierung und Feinstaubbelastung am besten ab.
- Biokraftstoffe zeigen höhere Umweltwirkungen als die fossilen Kraftstoffe im Bereich der terrestrischen Eutrophierung und bei der Versauerung. Dies liegt vor allem am Einsatz von Düngemitteln.
- Ölsande haben insbesondere beim Sommersmog deutliche Nachteile gegenüber Kraftstoff aus konventionellen Vorkommen.



Umweltwirkungen der Kraftstoffbereitstellung pro MJ Kraftstoff
Bezugsjahr 2010
Ölsande als Bergbauverfahren

Abbildung 45: Umweltwirkung der Kraftstoffbereitstellung im Jahr 2010

6.3.3 Kraftstoffmix für die Gesamtbilanzen

Die oben genannten Pfade decken alle relevanten Kraftstoffe für die heutige Situation ab. Die weitere Entwicklung wird hinsichtlich des Kraftstoffmixes als Szenario abgebildet, die Bereitstellungsprozesse werden dabei unverändert übernommen. Zwar sind zusätzliche Kraftstoffpfade (z.B. Biokraftstoffe der so genannten zweiten Generation) und weitere Prozessoptimierung denkbar. Eine detaillierte Modellierung dieser Entwicklungen ist jedoch nicht Fokus dieser Studie. Die weitere Entwicklung des Kraftstoffmixes wird in den Szenarien für 2030 durch einen steigenden Anteil von Biokraftstoffen dargestellt.

Biokraftstoffe

Der in den Berechnungen angenommene Biokraftstoffanteil (siehe Tabelle 32) basiert für Deutschland auf TREMOD. Für 2010 wird Biodiesel vollständig aus Raps (RME) und Bioethanol zu gleichen Teilen aus Weizen und Zuckerrohr angenommen. Für 2030 werden die hier betrachteten Biokraftstoffe mit der günstigsten Treibhausgasbilanz angenommen, also Biodiesel aus Raps und Bioethanol aus Zuckerrohr.

Die Ergebnisse in Abbildung 46 zeigen jeweils höhere Treibhausgasemissionen im Kraftstoffmix mit Biokraftstoffen. Dieser Erhöhung stehen dann durch den erneuerbaren Kohlenstoff deutliche Einsparungen in der Nutzungsphase gegenüber. Im Saldo ergibt sich dann eine Verbesserung der Klimabilanz. Dies liegt vor allem an der günstigen Klimabilanz von Ethanol aus Zuckerrohr. Die Bereitstellungsaufwendungen von fossilem Dieselmotorkraftstoff liegen zwar deutlich unter denen von fossilem Otto-Kraftstoff, aber durch die Beimischung von Biodiesel steigen die Aufwendungen deutlich an.

Neue fossile Kraftstoffpfade

Bei Kraftstoffen aus unkonventionellen Ölvorkommen ist es aufgrund des hohen Bedarfes des Nordamerikanischen Marktes nach dem heute hauptsächlich in Frage kommenden Öl aus Kanadischem Ölschiefer fraglich, ob diese tatsächlich auf den deutschen Markt gelangen. Die Nachhaltigkeit von Öl aus Ölsanden wird auf EU-Ebene bereits kritisch diskutiert ([McLennan 2011]). Deshalb werden diese Kraftstoffe nur in diesem Abschnitt als Sensitivität, jedoch nicht in den Szenarien über den Lebensweg von Vergleichsfahrzeugen in Deutschland betrachtet. Bereits bei Einsatz von 10 % Ölsanden (Bergbau) bei unverändertem Biokraftstoffanteil kommt es zu einer deutlichen Steigerung der mit der Bereitstellung der Kraftstoffe verbundenen Treibhausgasemissionen (siehe Abbildung 46). Werden dem Dieselmotorkraftstoff 10 % CtL beigefügt, verschlechtert sich die Bilanz dramatisch. Im Saldo ergibt sich trotz unverändertem Biokraftstoffanteil mehr als eine Verdreifachung der Treibhausgasemissionen gegenüber dem Dieselmotorkraftstoff 2010 und Raffineriekraftstoff.

Tabelle 32: Durchschnittlicher energetischer Kraftstoffmix in Deutschland 2010 und Szenarien für 2030

	2010		2030	
	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel
Fossil (Raffinerie)*	97 %	95 %	90 %	87 %
Biokraftstoffe (Gesamt)	3 %	5 %	10 %	13 %
Quelle: [IFEU 2009]				IFEU 2011

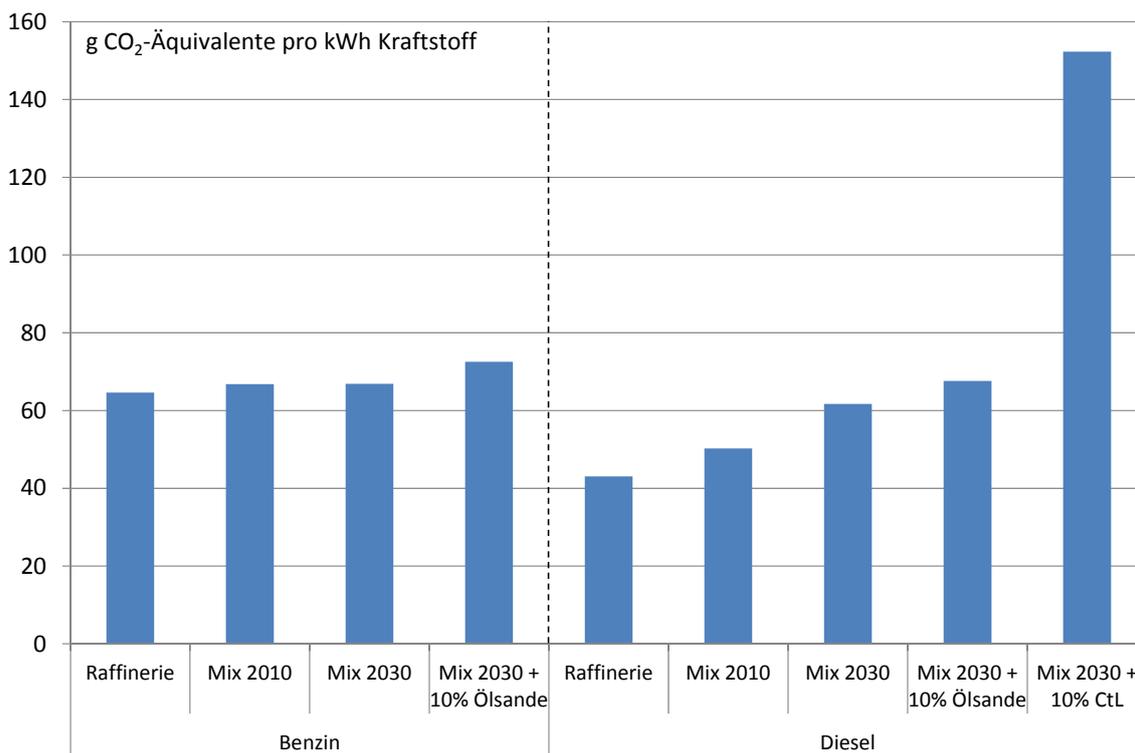


Abbildung 46: Treibhausgasemissionen Bereitstellung Kraftstoffe – 2010 und Szenarien 2030

7 Bilanzen über den Lebensweg

Die in den vorhergehenden Kapiteln abgeleiteten Teilbilanzen für die Fahrzeugherstellung, -nutzung und Energiebereitstellung werden in diesem Kapitel zu Bilanzen über den gesamten Lebensweg zusammengeführt. Fokus ist dabei die Mobilität, der gefahrene Kilometer ist die funktionelle Einheit. Die Darstellung folgt dabei folgenden Leitfragen:

Betrachtung der heutigen Situation:

- Wo stehen die verschiedenen Antriebskonzepte *heute* im direkten Vergleich?
- Wie relevant sind die untersuchten Umweltwirkungen?
- Welchen Einfluss hat der verwendete Strom(mix) *heute* auf die Klimabilanz?
- Gibt es *heute* besonders vorteilhafte Fahrzeuge oder Nutzungsmuster?

Betrachtung der Entwicklungsperspektiven:

- Wie werden sich die verschiedenen Antriebskonzepte *zukünftig* entwickeln?
- Welche Auswirkungen hat die *zukünftige* Entwicklung des Energiesektors?
- Wo stehen Elektrofahrzeuge im Vergleich mit *zukünftigen* Brennstoffzellenfahrzeugen?

7.1 Betrachtung der heutigen Situation

7.1.1 Wo stehen die verschiedenen Antriebskonzepte im direkten Vergleich?

Zum Vergleich der Umweltwirkungen der Antriebskonzepte wird ein mittlerer Pkw mit einem durchschnittlichen Nutzungsmuster¹¹ und einer Lebenslaufleistung von 150.000 km betrachtet. Hier zeigen sich bei den Treibhausgasemissionen folgende Beiträge über den Lebensweg:

- Bei konventionellen Fahrzeugen gehen die Treibhausgasemissionen insbesondere auf die direkten Fahrzeugemissionen in der Nutzungsphase zurück, vor allem Kohlendioxidemissionen (CO₂). Neben den direkten Auspuffemissionen mit dem größten Beitrag, sind auch die Umweltwirkungen der Kraftstoffbereitstellung (Ölgewinnung, Raffinierung und Distribution) relevant. Diese betragen für Otto-Kraftstoff etwa 25 % und für Diesel etwa 16 % der Klimawirkung die durch Verbrennung der Kraftstoffe entsteht. Insgesamt sind die direkten und indirekten Treibhausgasemissionen der Nutzungsphase für etwa 80 % der Klimawirkung über den Lebensweg verantwortlich.
- Der größte klimawirksame Beitrag (64 %) der Elektrofahrzeuge kommt aus der Strombereitstellung und ist damit indirekt ebenfalls durch die Nutzungsphase bedingt. Über den Lebensweg tragen heute aber auch die Herstellungsaufwendungen mit einem Anteil von über 30 % relevant zu den Treibhausgasemissionen bei.
- Fahrzeugentsorgung und -wartung spielen bei allen Antriebskonzepten nur eine geringe Rolle.

¹¹ Nach [IFEU 2009] wird die Lebensfahrleistung etwa zu 30 % innerorts, 40 % außerorts und 30 % auf der Autobahn erbracht.

Im Vergleich der Treibhausgasemissionen haben Diesel-Pkw heute einen Vorteil gegenüber Otto-Pkw. Grund sind der höhere Wirkungsgrad des Dieselmotors und die geringeren Vorkettenemissionen. Ein batterieelektrischer Pkw (BEV) hat durch die Batterie (24 kWh) zwar höhere Herstellungsaufwendungen als der konventionelle Pkw. In der Nutzungsphase, also im Vergleich zwischen Strombereitstellung und Kraftstoffbereitstellung und Direktmissionen des Otto-Pkw, fällt die Klimabilanz des BEV aufgrund des effizienten Antriebsstrangs und auch heute schon relevanten Anteils erneuerbarer Energie im deutschen Strommix deutlich besser aus (siehe Abbildung 47). Über den gesamten Lebensweg werden die THG-Emissionen eines batterieelektrischen Pkw gegenüber einem Otto-Pkw schon ab einer Fahrleistung von 100.000 km ausgeglichen. Bei Diesel Pkw liegen die Treibhausgasemissionen der Nutzung nur wenig über denen von batterieelektrischen Fahrzeugen. Die Herstellungsaufwendungen für die Batterie können daher heute gegenüber Diesel-Pkw erst ab Fahrleistungen über 200.000 km ausgeglichen werden.

Batterieelektrische Fahrzeuge, die mit dem heute durchschnittlichen Strommix in Deutschland betrieben werden, liegen damit bei den Treibhausgasemissionen etwa zwischen dem Otto- und Diesel-Pkw. Die Unterschiede liegen aber für mittlere Pkw mit jeweils etwa 9 % nahe der Signifikanzschwelle. Insgesamt ist die Klimabilanz des BEV unter heutigen Bedingungen ähnlich der Bilanz konventioneller Pkw mit Verbrennungsmotor.

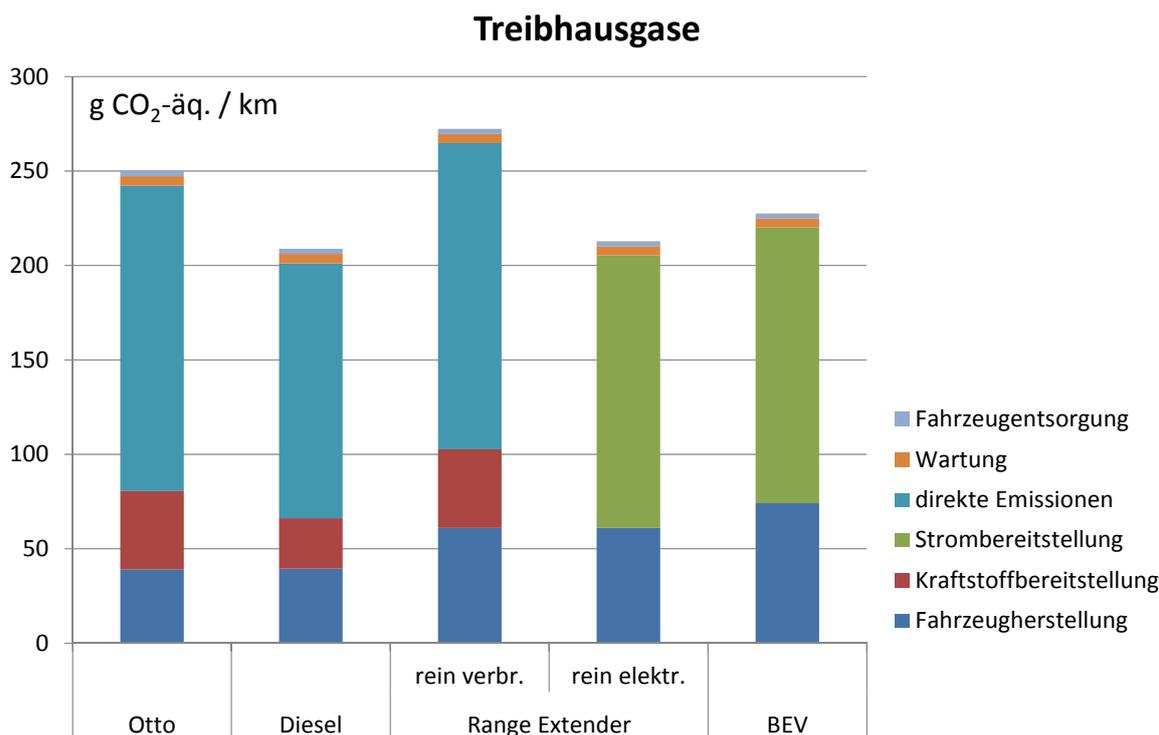


Abbildung 47: Treibhausgasemissionen eines mittleren Pkw (2010) mit 150.000 km Lebenslaufleistung nach Antriebskonzept

Bei Fahrzeugen mit Range-Extender (RE) hängen die Treibhausgasemissionen vom Anteil des elektrischen Betriebes ab: Können alle Strecken rein elektrisch zurückgelegt werden, ist die Klimabilanz vergleichbar mit dem BEV, aufgrund der geringeren Batteriekapazität und damit geringerer Herstellungsaufwendungen sogar etwas günstiger. Im verbrennungsmotorischen Betrieb ist die Bilanz jedoch in der hier dargestellten gemischten Nutzung, die auch Fahrten auf Landstraßen und Autobahnen enthält, aufgrund der Batterie etwas schlechter als beim Otto-Pkw. Beim Kraftstoffverbrauch kann der Nachteil des zusätzlichen Gewichtes aber bei hinreichendem Innerortsfahranteil durch den dort beson-

ders effizienten seriellen Betrieb ausgeglichen werden. Vorteile gegenüber konventionellen Otto-Pkw kann der RE also dann ausspielen, wenn ein großer Teil der Fahrleistung auch tatsächlich rein elektrisch erbracht wird. Zusätzlich erlaubt der RE-Pkw gegenüber dem BEV durch die höhere Reichweite ein deutlich breiteres Nutzungsspektrum.

Bei anderen Umweltwirkungen zeigen sich deutlichere Unterschiede zwischen den betrachteten Antriebskonzepten (Abbildung 48):

- Bei der Versauerung weisen BEV bzw. RE-Pkw aufgrund der aufwendigen Batterieherstellung deutlich höhere Umweltwirkungen als Otto- und Diesel Pkw auf.
- Die Eutrophierung liegt heute (= Euro 5) aufgrund der direkten Auspuffemissionen am höchsten für den Diesel-Pkw.
- Beim Sommersmogpotenzial zeigt der Otto-Pkw, bzw. RE-Pkw im verbrennungsmotorischen Betrieb, aufgrund der höheren Kohlenwasserstoff-Emissionen, die größte Umweltwirkung.
- Bei Elektrofahrzeugen werden die Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung, Sommersmogpotenzial und Feinstaubbelastung von der Fahrzeug-, insbesondere der Batterieherstellung, dominiert. Die Batterieherstellung ist für 50 % bis 90 % der genannten Umweltwirkungen verantwortlich. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor dagegen liegt der Anteil der Fahrzeugherstellung deutlich geringer.

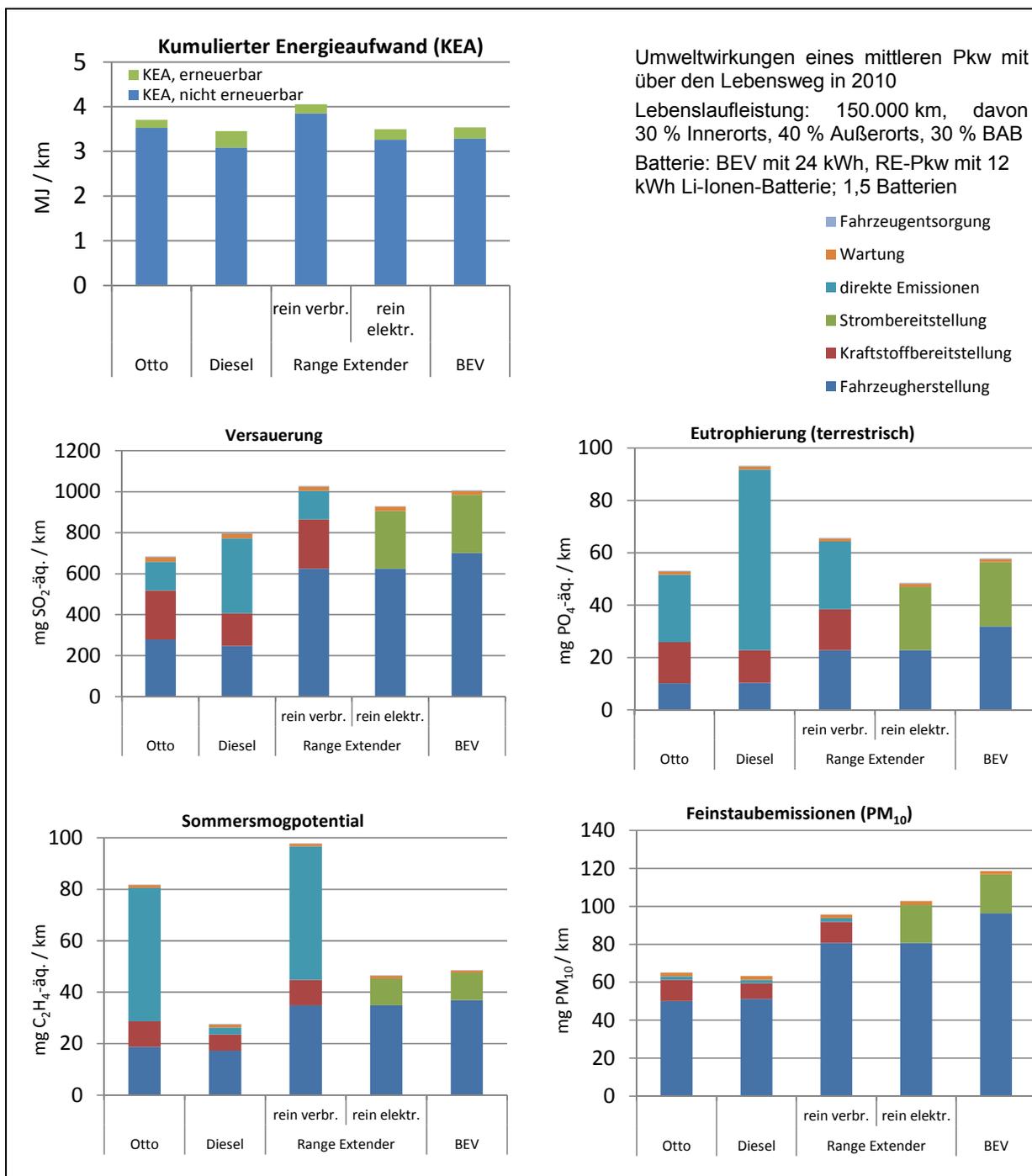


Abbildung 48: Umweltwirkungen eines Kompaktklassen- Pkw (2010) mit 150.000km Lebenslaufleistung nach Antriebskonzept

7.1.2 Wie relevant sind die untersuchten Umweltwirkungen?

Die absoluten Ergebnisse der Umweltwirkungen erlauben einen schnellen direkten Vergleich zwischen den betrachteten Antriebssystemen. Wie aber sind diese Umweltwirkungen einzuordnen, wie relevant sind? Zur besseren Anschaulichkeit werden die Ergebnisse an den Umweltwirkungen normiert, die jährlich in Deutschland pro Kopf der Bevölkerung verursacht werden. Diese Referenzwerte werden als ‚Einwohnerdurchschnittswerte‘ (EDW) bezeichnet und häufig in Ökobilanzen zur besseren Veranschaulichung verwendet (siehe z.B. [Klöpfer & Grahl 2009]). Der relative Unterschied der Ergebnisse wird dadurch nicht beeinflusst und es können so verschiedene Umweltwirkungen nebeneinandergestellt werden.

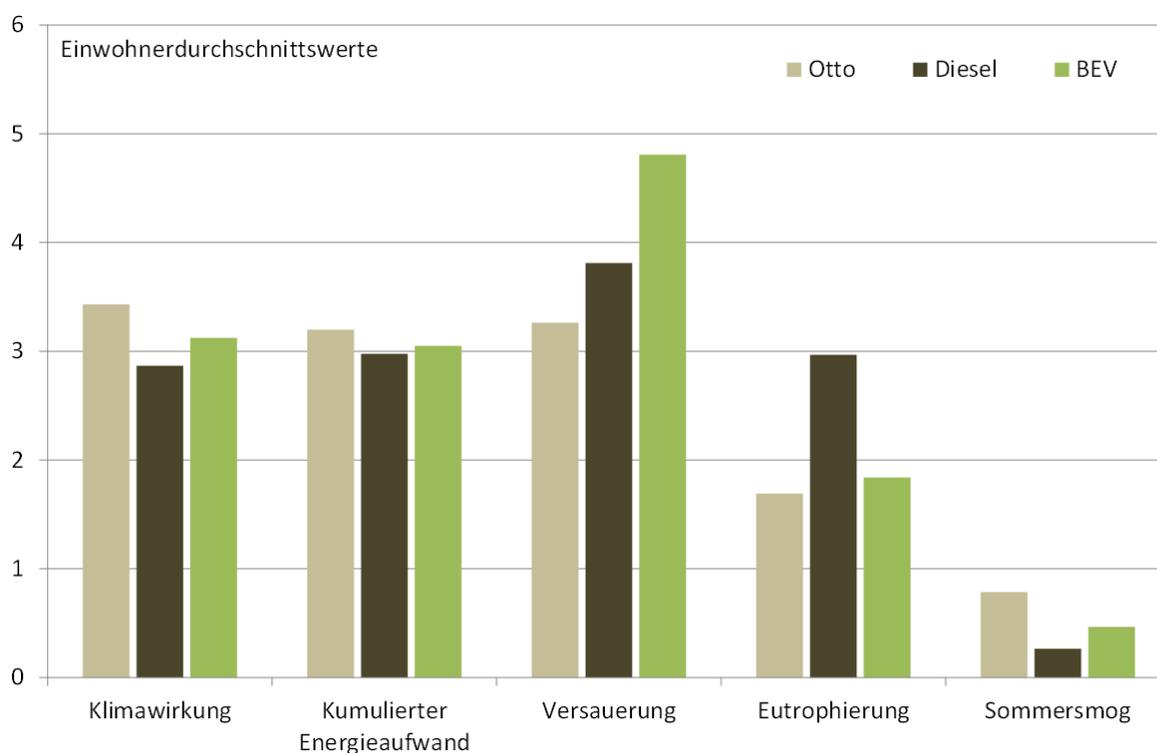


Abbildung 49: Einwohnerdurchschnittswerte für den Lebensweg eines mittleren Pkw (2010) mit 150.000 km Lebenslaufleistung

Es zeigt sich für Treibhausgasemission und den kumulierten Energieaufwand ein ähnlicher Beitrag von etwa 3 EWD. Bei der Versauerung liegt dieser Beitrag außer bei Otto-Pkw etwas höher: Bei Diesel-Pkw aufgrund der höheren direkten Auspuffemissionen mit versauernder Wirkung bei knapp 4 EWD, bei Elektrofahrzeugen durch die Batterie sogar bei bis zu 5 EWD.

Die Relevanz der Eutrophierung ist demgegenüber geringer und liegt nur für den Diesel-Pkw aufgrund der hohen NO_x -Emissionen deutlich über 2 EWD. Die Sommersmogbeiträge liegend durchgehend unter 1 EWD und sind damit gegenüber den anderen Umweltwirkungskategorien von deutliche geringerer Relevanz

7.1.3 Welchen Einfluss hat der verwendete Strom und Kraftstoff *heute* auf die Klimabilanz?

Die Treibhausgasemissionen von Elektrofahrzeugen werden stark durch die Strombereitstellung bestimmt. Der Kraftwerkspark, der zur Strombereitstellung verwendet wird, variiert jedoch nach Land sowie nach Jahreszeit, Wochentag und Tageszeit.

Der durchschnittliche deutsche Strommix ist heute ein guter erster Indikator um die in Deutschland mit der Strombereitstellung verbundenen Treibhausgasemissionen abzuschätzen. In der Realität werden je nach Zeitpunkt jedoch sehr unterschiedliche Kraftwerke zur Strombereitstellung herangezogen. Der konkrete Kraftwerkspark der Strombereitstellung zu einem bestimmten Zeitpunkt wird dabei u.a. durch die so genannte ‚Merit Order‘ bestimmt, in der die Kraftwerks-Erzeugungskapazitäten nach Betriebskosten sortiert dargestellt werden. Für diese Merit Order sind unterschiedliche energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen ausschlaggebend, insbesondere die Brennstoff- und Zertifikatspreise.

Zur umfassenden Bewertung der Umweltwirkung von Elektromobilität werden neben dem durchschnittlichen Strommix daher auch die Bilanzen für die Stromerzeugung mit einzelnen Kraftwerken dargestellt. Abbildung 50 stellt der Lebenswegbilanz eines mittleren batterieelektrischen Pkw im Jahr 2010 bei Nutzung von Strom aus verschiedenen Kraftwerkstypen die Bilanzen der konventionellen Referenzfahrzeuge mit fossilem Kraftstoff und Biokraftstoff gegenüber.

Die Betrachtung des zum Laden verwendeten Stroms ist dabei vor allem eine Frage der Anrechnung im Sinne von Ursache und Wirkung und kann dabei folgendermaßen interpretiert werden:

- Sind Elektrofahrzeuge ein relevanter neuer Verbraucher, muss die zusätzliche Stromnachfrage durch eine stärkere Nutzung vorhandener Kraftwerke oder auf längere Frist durch Kraftwerksneubau bedient werden. Würde allein Strom aus einem älteren Steinkohlekraftwerk berücksichtigt, dann verschlechtert sich damit die Klimabilanz deutlich und liegt über der konventioneller Fahrzeuge (siehe Abbildung 51). Der Nachteil des Elektrofahrzeugs geht dann nicht nur auf die Batterieherstellung zurück, sondern auch in der Nutzungsphase sind die Treibhausgasemissionen des BEV vergleichbar mit Otto-Pkw und sogar höher als beim Diesel-Pkw.
- Würde die zusätzliche Stromnachfrage dagegen durch moderne Gas-GuD-Kraftwerke gedeckt, dann ergeben sich trotz Nutzung eines fossilen Energieträgers deutliche Vorteile auch gegenüber konventionellen Dieselfahrzeugen. Bereits nach etwa 60.000 km sind die zusätzlichen Treibhausgasemissionen aus der Batterieherstellung kompensiert (siehe Abbildung 51).
- Elektrofahrzeuge können zahlreiche erneuerbare Energiequellen für den Verkehrsbe- reich erschließen. So verbessert sich die Klimabilanz bei Nutzung von Windstrom aus zusätzlichen Anlagen deutlich. Bereits nach etwa 30.000 km sind die zusätzlichen Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung gegenüber konventionellen Pkw mit fossilem Kraftstoff kompensiert, über den Lebensweg ergeben sich deutliche Klimavorteile (siehe Abbildung 51). Wichtig für die Anrechnung des Windstroms für die Bilanz von Elektrofahrzeugen ist es, dass es sich um zusätzliche Anlagen handelt, die ohne den Betrieb von Elektrofahrzeugen nicht installiert worden wären.
- Auf der anderen Seite können auch konventionelle Fahrzeuge erneuerbare Energiequellen in Form von Biokraftstoffen nutzen. Deren Bereitstellung ist jedoch mit zusätz-

lichen Treibhausgasemissionen verbunden (siehe Abbildung 50). Die Klimabilanz der Nutzung konventioneller Pkw mit Biokraftstoffen ist daher trotz der Zusatzaufwendung für die Batterieherstellung ungünstiger als bei einem mit Windstrom betriebenen BEV.

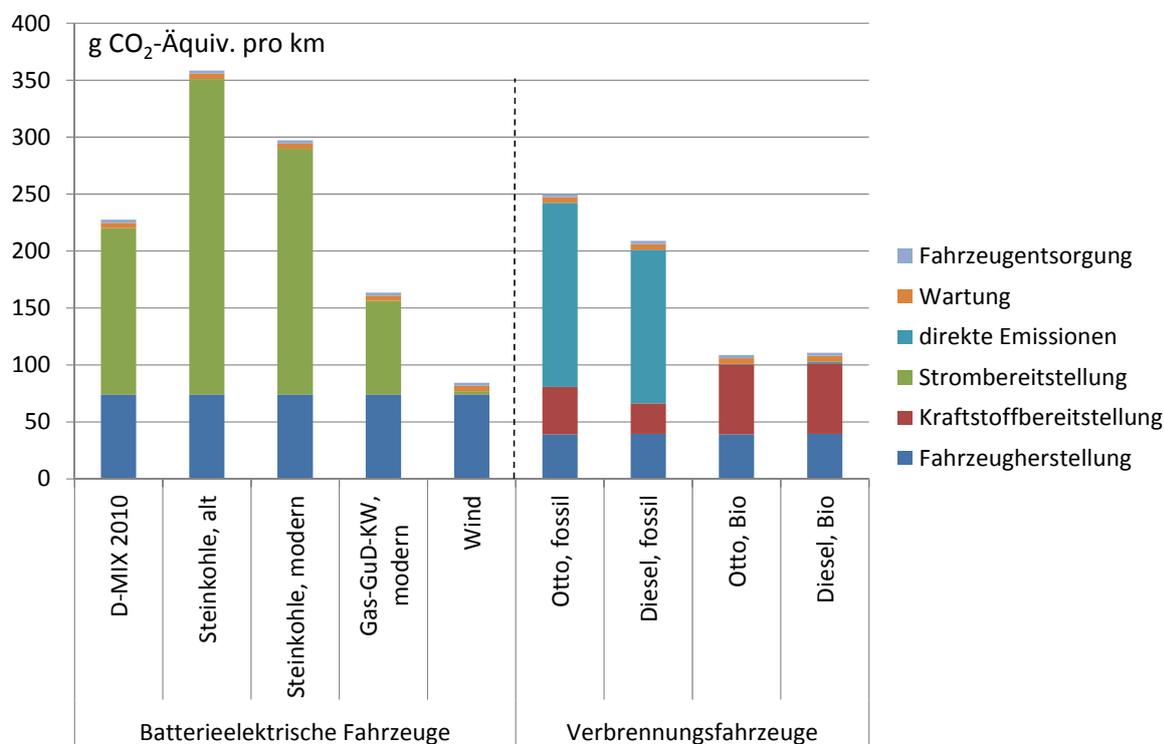


Abbildung 50: Treibhausgasemissionen eines mittleren Pkw (2010) mit 150.000km Lebenslaufleistung nach Kraftwerkstypen und Kraftstoffe

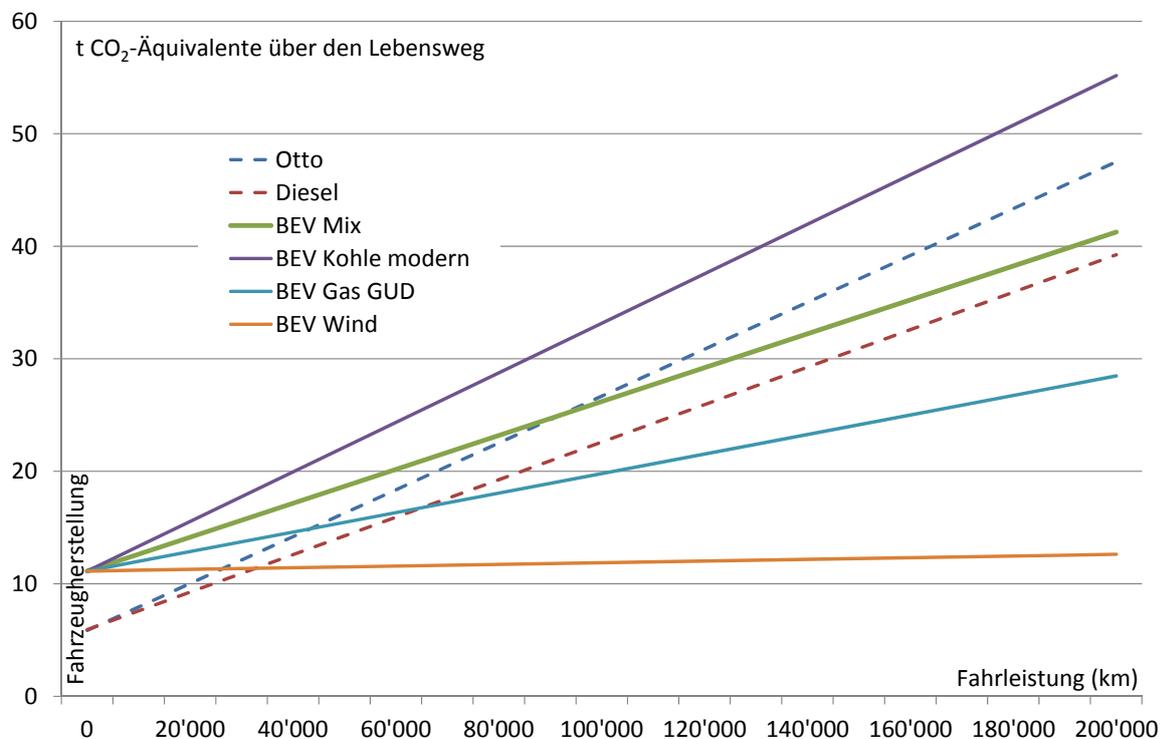


Abbildung 51: Treibhausgasemissionen über den Lebensweg nach Fahrleistung für verschiedene Kraftwerkstypen

Bei anderen Umweltwirkungskategorien bleibt beim BEV die Fahrzeug- und Batterieherstellung der dominierende Faktor, insbesondere bei Nutzung von Windstrom. Bei Nutzung von Kohlestrom gewinnt die Nutzungsphase dagegen bei der Eutrophierung und den Feinstaubemissionen an Bedeutung und dominiert auch die Bilanz über den Lebensweg (Abbildung 52).

Zusätzlich sind mit den Biokraftstoffen durch landwirtschaftliche Prozesse deutlich höhere Umweltwirkungen im Bereich der Versauerung und Eutrophierung (u.a. durch Düngung) verbunden. Hier schneiden sie auch deutlich schlechter ab als die mit fossilem Raffineriekraftstoff betriebenen Referenzfahrzeuge. Zusätzlich kann es zu Nutzungs- und Flächenkonkurrenzen kommen, die bei der Erzeugung erneuerbaren Stroms kaum eine Rolle spielen.

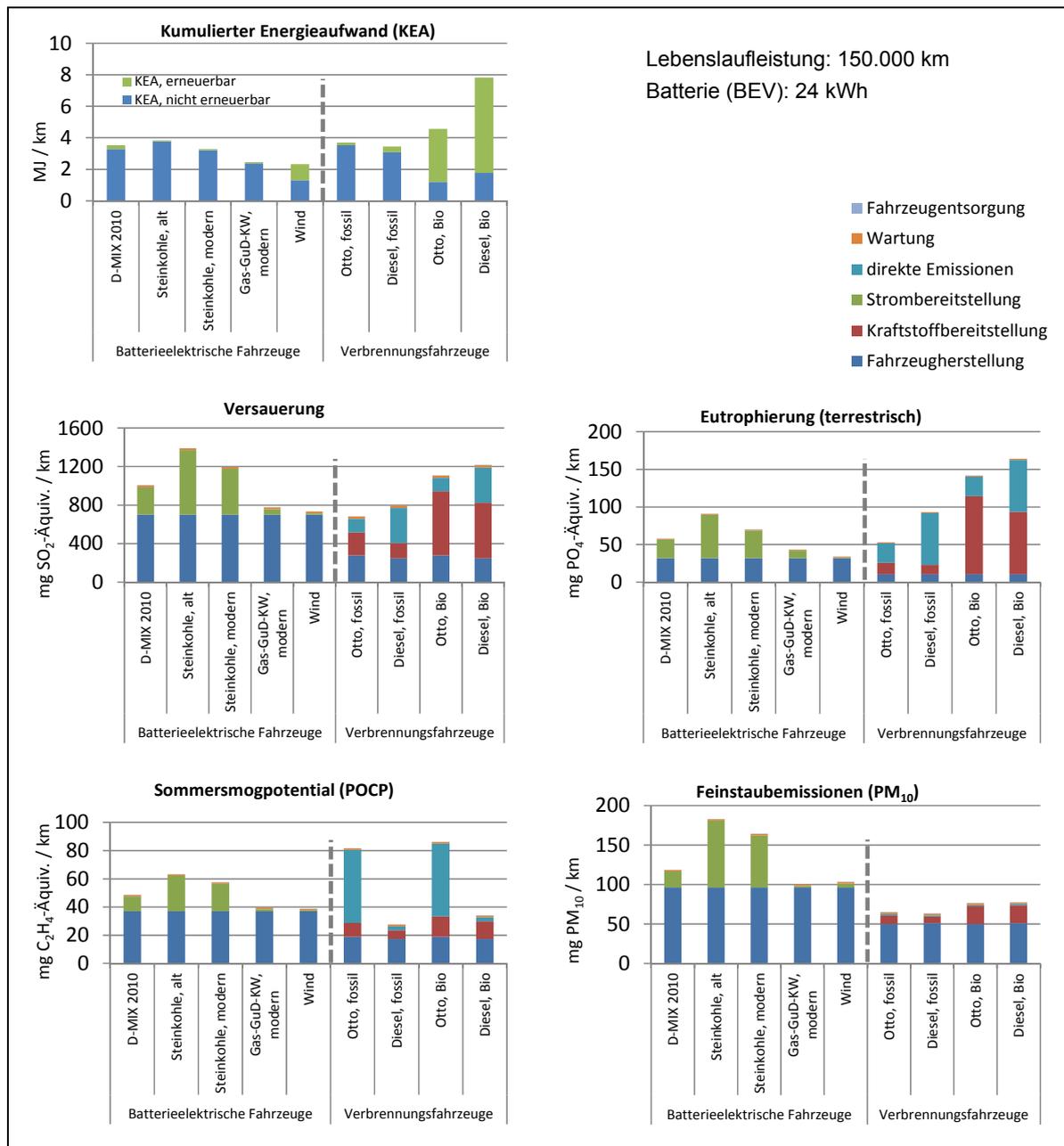


Abbildung 52: Umweltwirkungen eines mittleren Pkw (2010) mit 150.000km Lebenslaufleistung nach Kraftwerkstypen und Kraftstoffen

7.1.4 Gibt es heute besonders vorteilhafte Fahrzeuge oder Nutzungsmuster?

Nicht nur das Antriebskonzept, sondern auch die Fahrzeuggröße und das Nutzungsmuster haben einen Einfluss auf die Umweltbilanz über den Lebensweg. Wichtige Parameter sind dabei die Lebensfahrleistung und ihre Aufteilung auf die verschiedenen Straßenkategorien. Da Fahrzeuge mit Range Extender andere Nutzungsmuster ermöglichen, werden sie hier getrennt dargestellt.

7.1.4.1 Batterieelektrische Pkw

Die Auswirkungen auf die Lebenswegbilanz werden anhand von Beispielen definierter typischer Nutzungen dargestellt. Dabei werden Fahrzeuggröße, Lebensfahrleistung und die Nutzung nach Straßenkategorien variiert.

Stadtverkehr – Zweitwagen (klein):

Es wird ein überwiegend in der Stadt (70 % der Fahrleistung) genutzter Kleinwagen (BEV-Pkw-City) betrachtet. Das Fahrzeug wird dabei als Zweitwagen angenommen. Dies entspricht auch den Erfahrungen im Mini E 1.0-Projekt ([BMW 2010a]), wo die Fahrzeuge vorwiegend als Zweitwagen und häufig für tägliche Pendelfahrten eingesetzt wurden. Hier betrug die tägliche durchschnittliche Fahrleistung etwa 40 km und überstieg nur in seltenen Fällen 100 km. Die Lebensfahrleistung für eine solche Nutzung als städtischer Zweitwagen wird mit 120.000 km als begrenzt angenommen.

Standard Nutzung – Hauptfahrzeug (klein, mittel, groß):

Es werden BEVs aller drei Pkw-Größenklassen (klein, mittel, groß) zu Vergleichszwecken mit einer Lebensfahrleistung von 150.000 km betrachtet. Höhere Fahrleistungen werden bei rein batterieelektrischen Pkw aufgrund der begrenzten Reichweite (ca. 100 km) als unrealistisch angesehen. Die Aufteilung der Fahrleistung nach Straßenkategorien orientiert sich dabei an der durchschnittlichen Fahrleistungsaufteilung in Deutschland nach [IFEU 2009], die Werte wurden jedoch gerundet (siehe Tabelle 33). Autobahnfahrten werden von den Elektrofahrzeugen z.B. auf Pendelfahrten oder kürzeren Ausflügen unternommen.

Intensive Nutzung – Städtisches Gewerbe (groß):

Im Stadtbereich ist auch gewerbliche Nutzung von Elektro-Pkw denkbar, z.B. in Taxiunternehmen, Kundendiensten etc. Hier wird als Extremfall davon ausgegangen, dass bei einer solchen gewerblichen Nutzung ein großer Pkw ausschließlich im Stadtbereich eingesetzt wird und dort eine Lebenslaufleistung von 200.000 km erreicht. Bei einer Fahrzeuglebensdauer von 12,5 Jahren und 250 Arbeitstagen pro Jahr entspricht das einer täglichen Fahrleistung von gut 60 km.

Tabelle 33: Betrachtete batterieelektrische Fahrzeuge und Nutzungsmuster

Nutzungsmuster	BEV-Pkw-City	BEV-Pkw-Standard	BEV-Pkw-Gewerbe
Fahrzeuggröße	klein	klein/mittel/groß	groß
Lebensfahrleistung	120.000 km	150.000 km	200.000 km
Anteil Innerorts	70 %	30 %	100 %
Anteil Außerorts	20 %	40 %	-
Anteil Autobahn	10 %	30 %	-

IFEU 2011

Ergebnisse:

Bei einer überwiegend städtischen Nutzung als Zweitwagen (120.000 km) ist die Klimabilanz eines kleinen BEVs vergleichbar mit dem Diesel-Pkw und etwa 17 % günstiger als beim Otto-Pkw. Dies liegt am effizienten Elektroantrieb im Stadtbereich, der insbesondere Vorteile gegenüber dem Otto-Motor hat. Die städtische Nutzung als Zweitwagen ist damit, trotz der geringeren Fahrleistungen eine günstige bis vorteilhafte Anwendung für Elektrofahrzeuge.

Bei Betrachtung einer gemischten Nutzung, die auch wesentliche Anteile von Landstraßen und Autobahnfahrten enthält, liegen die Treibhausgasemissionen des batterieelektrischen Pkw dagegen für alle betrachteten Fahrzeuggrößen zwischen den konventionellen Referenzfahrzeugen mit Otto- und Dieselmotor. Zwar zeigt sich mit steigender Fahrzeuggröße eine Annäherung an den klimagünstigeren Diesel-Pkw, diese Effekte liegen jedoch unter der Signifikanzschwelle (Abbildung 53).

Beim städtischen Gewerbe Pkw mit besonders intensiver Nutzung (200.000 km) liegt die Treibhausgasbilanz dagegen 28 % günstiger als der Otto- und immer noch 8 % günstiger als der Diesel-Pkw. Als besonders Vorteilhaft stellt sich hier die Kombination aus hoher Fahrleistung und städtischer Nutzung dar.

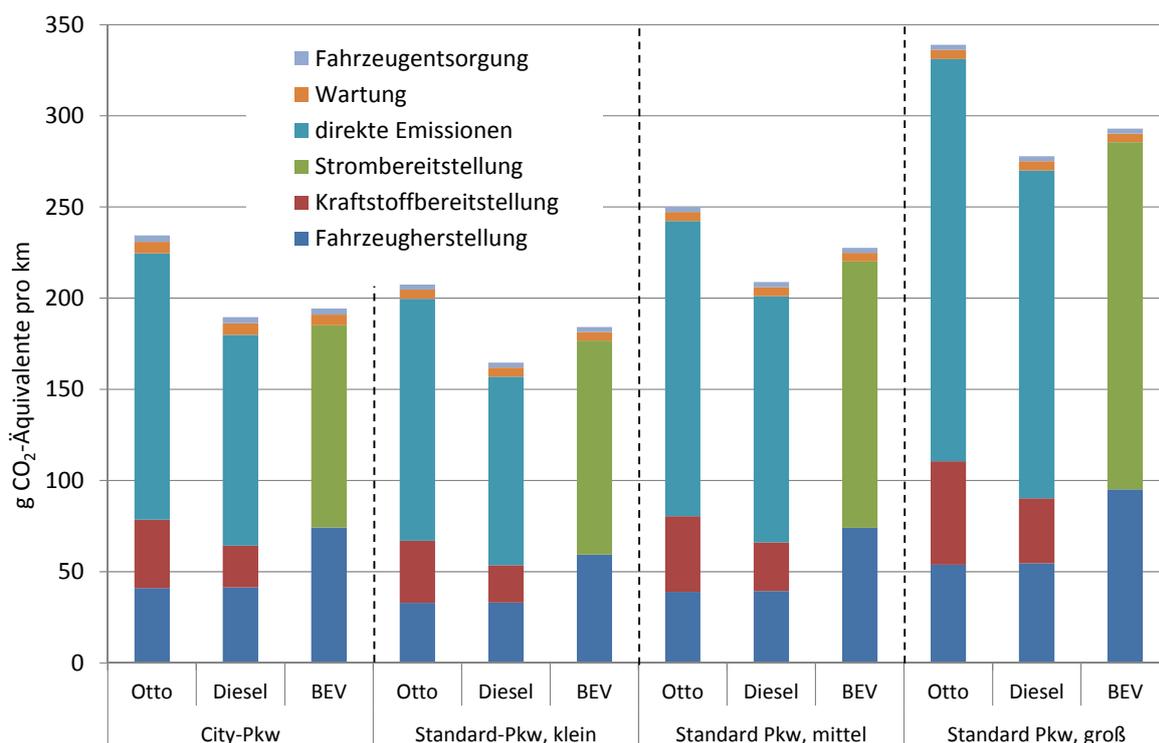


Abbildung 53: Klimabilanz von Pkw für verschiedene Nutzungsmuster (2010)

Die wesentlichen Parameter einer günstigen Klimabilanz von Elektrofahrzeugen sind daher städtische Nutzung und hohe Fahrleistungen. Dies wird in Abbildung 54 veranschaulicht: Hier ist ein mittlere Pkw in durchschnittlicher (blau) und städtischer Nutzung (grün) dargestellt. Da beim Otto-Pkw der Verbrauch im Stadtbereich am höchsten ist, steigt die Klimabilanz über den Lebensweg mit der Fahrleistung steiler an. Beim BEV liegt der Energieverbrauch dagegen bei städtischer Nutzung etwas niedriger als bei gemischter Nutzung.

Dementsprechend werden bei städtischer Nutzung die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung gegenüber Otto-Pkw bereits ab etwa 50.000 km kompensiert, bei durchschnittlicher Nutzung jedoch erst bei 90.000-100.000 km. Umgekehrt: Eine städtische Nutzung ist bei Otto-Pkw Vorteilhaft, wenn die Lebenslaufleistung über 50.000 km liegt. Gegenüber Diesel-Pkw ergeben sich für ein Stadt-BEV Vorteile ab etwa 100.000 km.

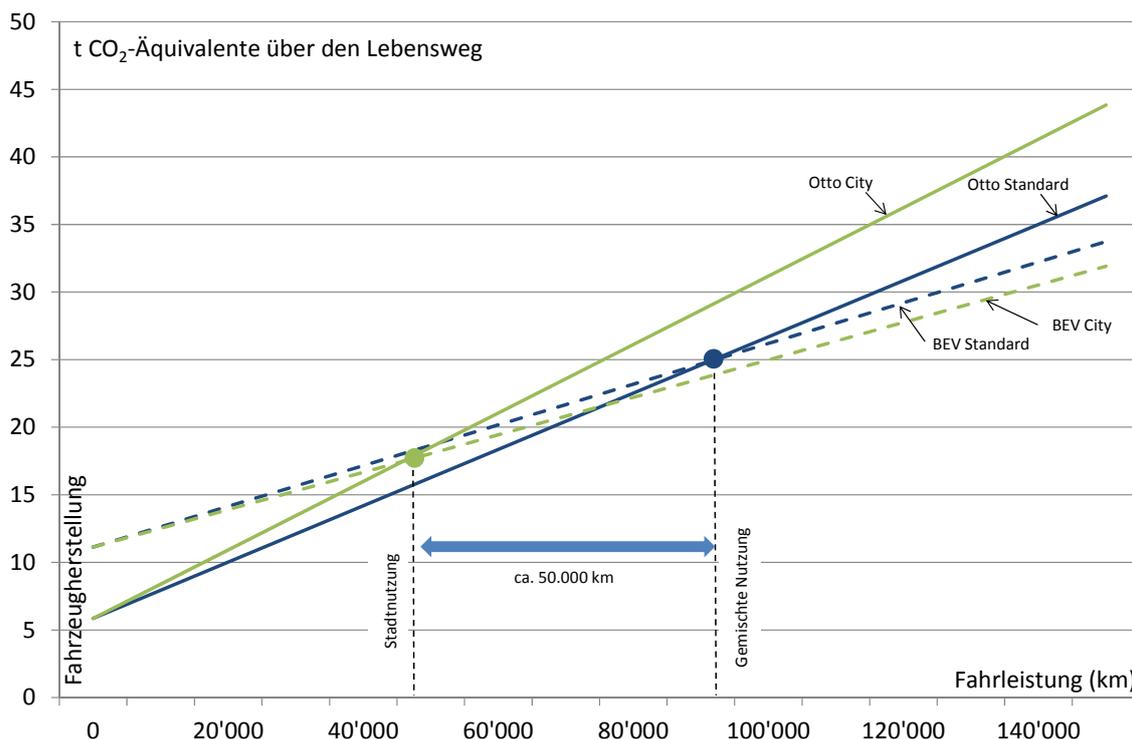


Abbildung 54: Klimabilanz mittlerer Pkw nach Fahrleistung für durchschnittliche und städtische Nutzung (2010)

7.1.4.2 Range-Extender-Pkw

Wegen der hohen Batteriekosten werden batterieelektrische Pkw auf absehbare Zeit weit geringere Reichweiten als konventionelle Pkw haben und sind damit nur für bestimmte Nutzungen geeignet. Zur Vergrößerung der Reichweite besteht die Möglichkeit einen Verbrennungsmotor als ‚Reichweitenverlängerer‘ (sprich Range Extender) im Fahrzeug zu integrieren. Range-Extender-Pkw (RE-Pkw) sind auf die überwiegende Nutzung des elektrischen Antriebs mit Strom aus dem Netz ausgelegt. Der Verbrennungsmotor dient zur Stromerzeugung über einen Generator, wenn die Batteriekapazität erschöpft ist, oder kann das Fahrzeug bei einigen Konzepten auch direkt antreiben.

Ein solches Konzept wurde im Rahmen des Förderschwerpunktes im Daimler Projekt REX entwickelt. Dort wird aufgrund des Gewichts und der Kosten ein Otto-Motor als Range-Extender eingesetzt. Ein Feldversuch mit dem Fahrzeug fand nicht statt, so dass keine Praxisdaten zur Nutzung vorlagen. Aus dem Projekt konnten jedoch zahlreiche konzept-spezifische Hinweise und Daten zur Ableitung der verschiedenen Betriebsmodi verwendet werden. Diese werden in diesem Kapitel dazu verwendet, Umweltbilanzen von einem mittleren RE-Pkw zu erstellen, die mit den Pkw-Bilanzen der batterieelektrischen Fahrzeuge im vorangegangenen Abschnitt weitgehend vergleichbar sind. Es handelt sich dabei aber nicht um eine Abbildung des im Projekt REX entwickelten Fahrzeugs. Die Umweltbilanzen dienen zur Identifizierung der Stärken und Schwächen des Range-Extender-Konzeptes.

Für die Umweltbilanz ist dabei besonders relevant, wie hoch der verbrennungsmotorisch und rein elektrisch erbrachte Fahrleistungsanteil in verschiedenen Straßenkategorien ist. Diese Anteile sind stark abhängig vom Nutzungsmuster welches hier durch zwei vereinfachende Fallbeispiele beschrieben wird. Es handelt sich dabei um großstädtische Nutzer die mit ihrem Fahrzeug

- a) eine Lebensfahrleistung von 150.000 km mit hohem Stadtanteil und
 b) eine Lebensfahrleistung von 200.000 km mit relevanten Fernverkehrsanteil

zurücklegen. Um eine möglichst hohe elektrische Reichweite zu erreichen, wird jede Fahrt zunächst elektrisch gefahren bis die nutzbare Batteriekapazität erschöpft ist, erst dann wird verbrennungsmotorisch weitergefahren. Folgende Fahrten werden berücksichtigt:

- Der tägliche Arbeitsweg beträgt hin und zurück 40 Stadt-km und wird rein elektrisch zurückgelegt.
- Tagesausflüge werden mit 100 km angesetzt, von denen knapp die Hälfte elektrisch zurückgelegt werden kann (siehe Abbildung 55).
- Fernfahrten werden mit 250 km zwischen zwei Städten angenommen, hierbei dominiert der verbrennungsmotorische Betrieb.
- Bei Urlaubsfahrten wird eine einfache Strecke von 500 km größtenteils auf der Autobahn angesetzt (siehe Abbildung 55).

Die Lebensfahrleistung wird durch die jährliche Anzahl dieser Fahrten variiert (siehe Tabelle 34), wobei sich die angegebene Jahresfahrleistung über eine Lebensdauer von etwa 12,5 Jahren zu der angenommenen Lebensfahrleistung kumuliert.

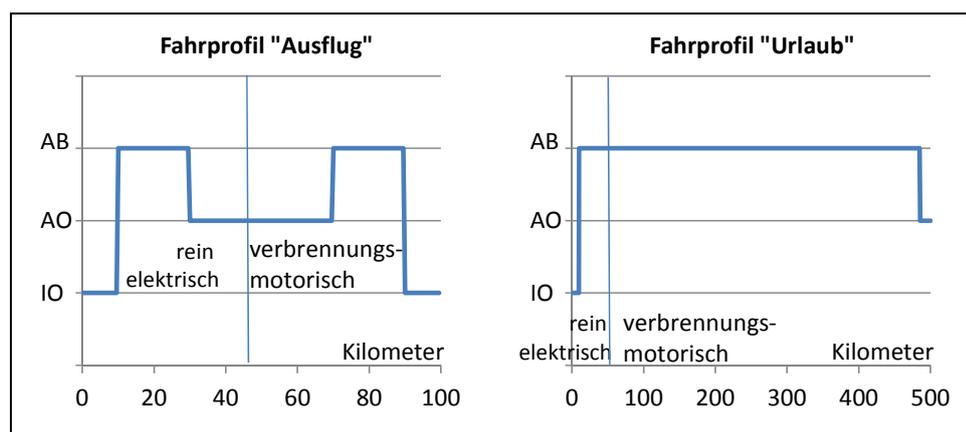


Abbildung 55: Nutzungsmuster 'Ausflug' und 'Urlaub' bei RE-Pkw

Tabelle 34: Fallbeispiele Elektro-Pkw mit Range Extender

	Strecke	Aktivitäten pro Jahr (Standard)	Jahresfahrleistung (Standard)	Aktivitäten pro Jahr (Intensiv)	Jahresfahrleistung (RE-Intensiv)
Arbeitsweg	40 km	220	8.800 km	220	8.800 km
Tagesausflug	100 km	15	1.500 km	20	2.000 km
Wochenendtrip	250 km	3	750 km	9	2.250 km
Sommerurlaub	1000 km	1	1.000 km	3	3.000 km
Summe			12.050 km		16.050 km

IFEU 2011

Für die Fallbeispiele ergibt sich für die „Standard-Nutzung“ eine rein elektrische Fahrleistung von etwa 70 %, größtenteils im Innerortsbereich. Für die Intensiv-Nutzung mit der höheren Fahrleistung von 200.000 km liegt der Anteil des rein elektrischen Betriebs bei nur 54 %, da mehr Fernstrecken zurückgelegt werden (siehe Abbildung 56).

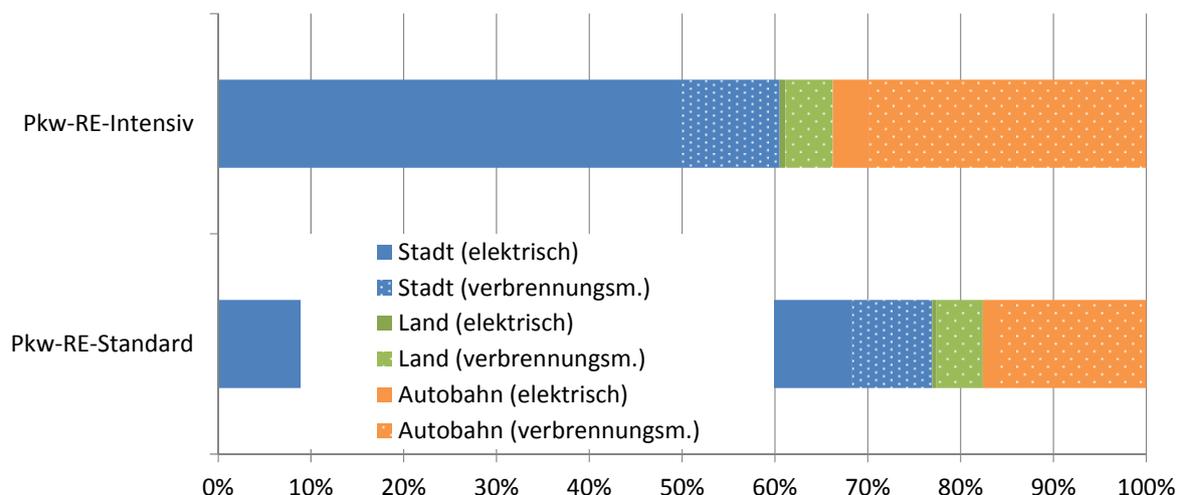


Abbildung 56: Fahrleistungsanteile der Fallbeispiele (RE-Pkw) nach Straßenkategorie und Antriebsart

Die Klimabilanzen (Abbildung 57) zeigen Vorteile gegenüber dem Otto-Pkw von 20 % und sind mit denen der Diesel-Pkw vergleichbar. Auch gegenüber BEV zeigt sich eine vergleichbare Klimabilanz. Zwar liegen die Treibhausgasemissionen, die aus der Fahrzeugherstellung des RE-Pkw resultieren, etwa 18 % niedriger, dieser Vorteil wird durch den teilweise verbrennungsmotorischen Betrieb in der Nutzungsphase jedoch ausgeglichen.

Im Vergleich ist die Klimabilanz in beiden Fallbeispielen ähnlich. Grund dafür sind zwei gegenläufige Effekte: Durch die hohe Fahrleistung bei intensiver Nutzung können die zusätzlichen Aufwendungen zur Fahrzeugherstellung besser über die Nutzung abgeschrieben werden. Die hohe Fahrleistung bedingt in dem untersuchten Fallbeispiel jedoch einen höheren verbrennungsmotorischen Betriebsanteil, der eine schlechtere Klimabilanz aufweist als der elektrische Betrieb

Zusätzlich haben RE-Pkw die Möglichkeit erneuerbaren Strom zu tanken. Dadurch verbessert sich die Klimabilanz noch einmal deutlich und liegt um 51 % günstiger als bei Otto- und 40 % günstiger als bei Diesel-Pkw. Bei intensiver Nutzung ist der Vorteil aufgrund des höheren verbrennungsmotorischen Anteils etwas geringer: 46 % gegenüber Otto und 33 % gegenüber Diesel.

RE-Pkw haben demnach eine Klimabilanz die heute bei Nutzung des durchschnittlichen deutschen Strommix mit der von BEV vergleichbar ist und ermöglichen gleichzeitig eine größere Reichweite und damit ein erweitertes Nutzungsspektrum. Die Klimabilanz von RE-Pkw ist mit der von Diesel-Pkw vergleichbar, kann aber durch Nutzung erneuerbaren Stroms weiter verbessert werden und liegt dann deutlich unter der von konventionellen Pkw.

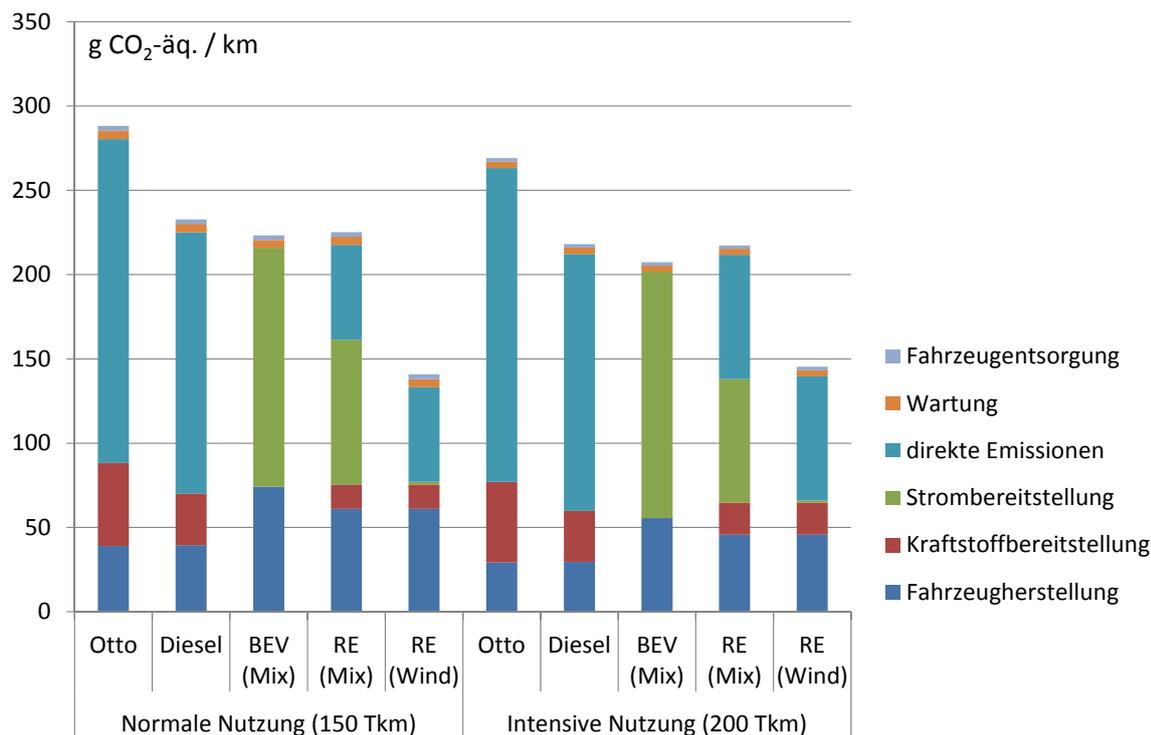


Abbildung 57: Treibhausgasemissionen eines mittleren RE-Pkw im Vergleich zu Otto-, Diesel- und BEV-Pkw (2010)

7.1.4.3 Batterieelektrischer Lieferverkehr

Anwendungen im Wirtschaftsverkehr wurden im Förderschwerpunkt durch die Projekte EMIL und EMKEP entwickelt und im Rahmen von EMKEP auch mit 46 Fahrzeugen im Großraum Berlin in der Praxis getestet. Fokus waren „vorrangig Kurier- und Paketdienste sowie innerstädtische Service- und Dienstleistungen“ ([Daimler 2011a]). Dementsprechend liegen die gefahrenen Geschwindigkeiten (siehe Abbildung 58) Großteiles unter 50 km/h¹². Leichte Nutzfahrzeuge werden daher hier als rein städtische Lieferfahrzeuge betrachtet. Eine solche Nutzung wurde bereits in Abschnitt 7.1.4.1 als besonders vorteilhaft identifiziert. In leichten Nutzfahrzeugen werden heute jedoch überwiegend Dieselmotoren eingesetzt, die im Vergleich mit Otto-Motoren einen besseren Wirkungsgrad haben, auch im Innerortsbereich.

Die tägliche Fahrleistung solcher Fahrzeuge schwankt stark, nach Nutzerangaben ([Daimler 2011a]) zwischen 20 und 80 km. Dies bestätigen die Daten aus dem Feldversuch in Abbildung 59, auch wenn die im Flottenversuch zurückgelegten Strecken nicht zwingend repräsentativ sind: Nur von wenigen Fahrzeugen wurden im betrachteten Zeitfenster (Juni 2011) über 600 km zurückgelegt. Es werden daher drei Fallbeispiel mit Lebenslaufleistung von 100.000 (Leichte Nutzung), 150.000 (Standard) und 200.000 km (Intensiv) betrachtet. Bei einem Fahrzeugleben von 12,5 Jahren und 250 Einsatztagen pro Jahr entsprechen diese Lebenslaufleistungen einer täglichen Fahrleistung von 32, 48 und 64 km.

¹² Im Flottenversuch wurde die Höchstgeschwindigkeit auf 80 km/h begrenzt.

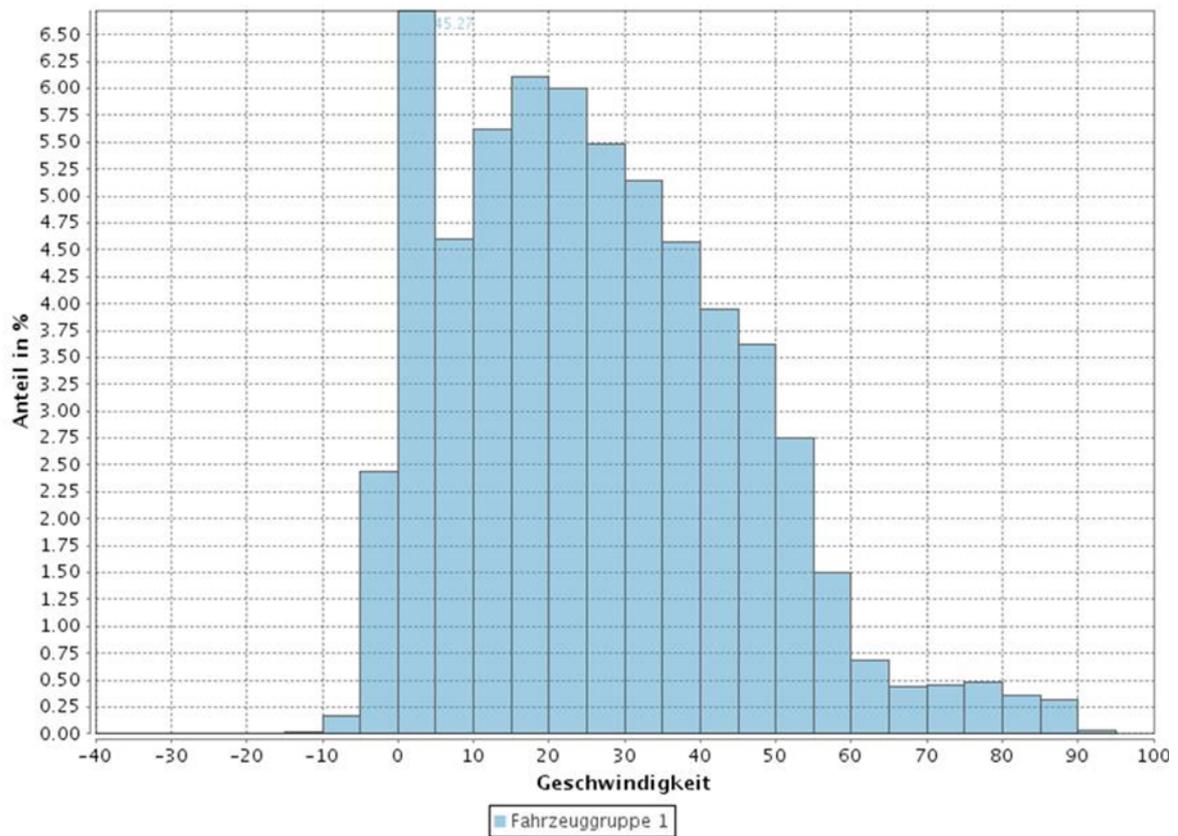


Abbildung 58: Geschwindigkeitsverteilung Fahrzeuge EMKEP (Juni 2011) ([Daimler 2011a])

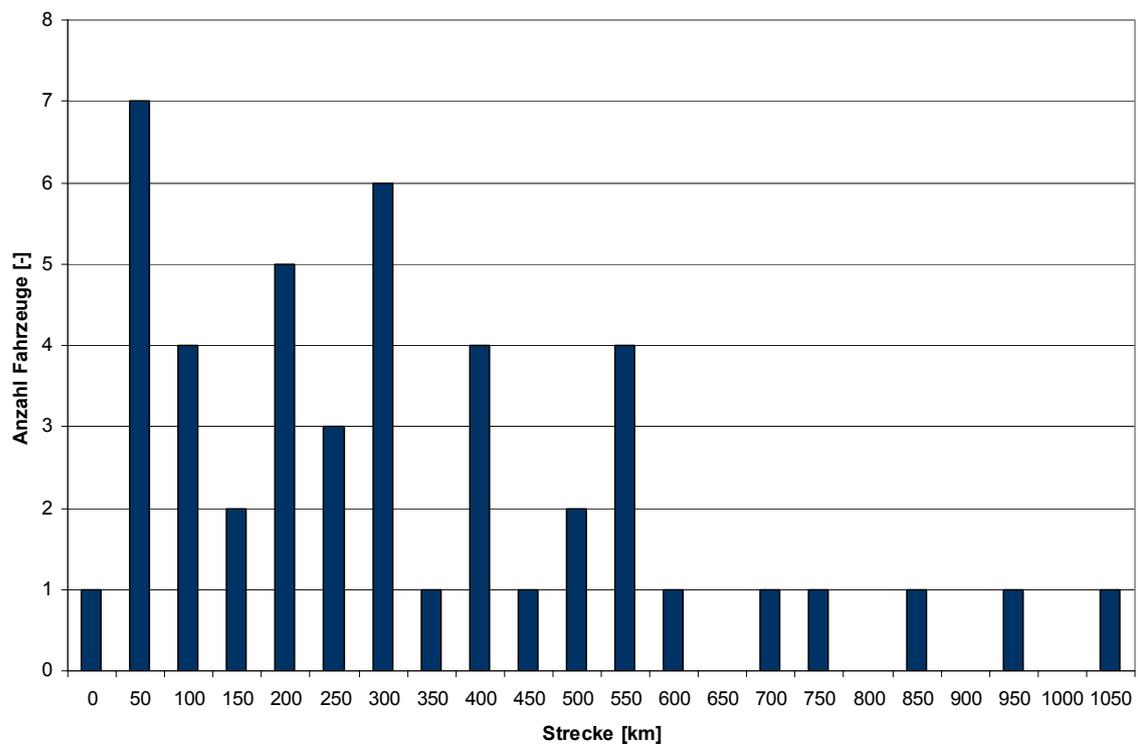


Abbildung 59: Zurückgelegte Fahrstrecken Fahrzeuge EMKEP (Juni 2011) (Daimler 2011a)

Im städtischen Lieferverkehr ist die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen schon bei leichter Nutzung (100.000 km) vorteilhaft gegenüber dem Dieselfahrzeug. Der Vorteil liegt mit 4 % jedoch noch unter der Signifikanzschwelle. Die Fahrzeugherstellung trägt in diesem Fall

40 % zur Klimabilanz bei. Bei einer Lebensfahrleistung von 150.000 km ergibt sich durch die bessere Abschreibung der der Batterieherstellung bereits ein signifikanter Vorteil von 11 %, der bei intensiver Nutzung (200.000 km) auf 13 % wächst. Der Beitrag der Fahrzeug- und Batterieherstellung zur Klimabilanz über den Lebensweg sinkt dadurch auf etwa ein Viertel (Abbildung 60).

Der Lieferverkehr stellt für Elektrofahrzeuge durch den Effizienzvorteil im Stadtverkehr, eine besonders günstige Anwendung dar. Dies gilt vor allem bei hohen Fahrleistungen, die durch ganztägige und in der Regel zentral geplante Nutzung (z.B. Touren disponierung) begünstigt werden. Da es sich im Wirtschaftsverkehr häufig um Fahrzeugflotten handelt, können die Elektrofahrzeuge bevorzugt für Stadtfahrten mit ihrer Reichweite entsprechender Fahrstrecke eingesetzt werden.

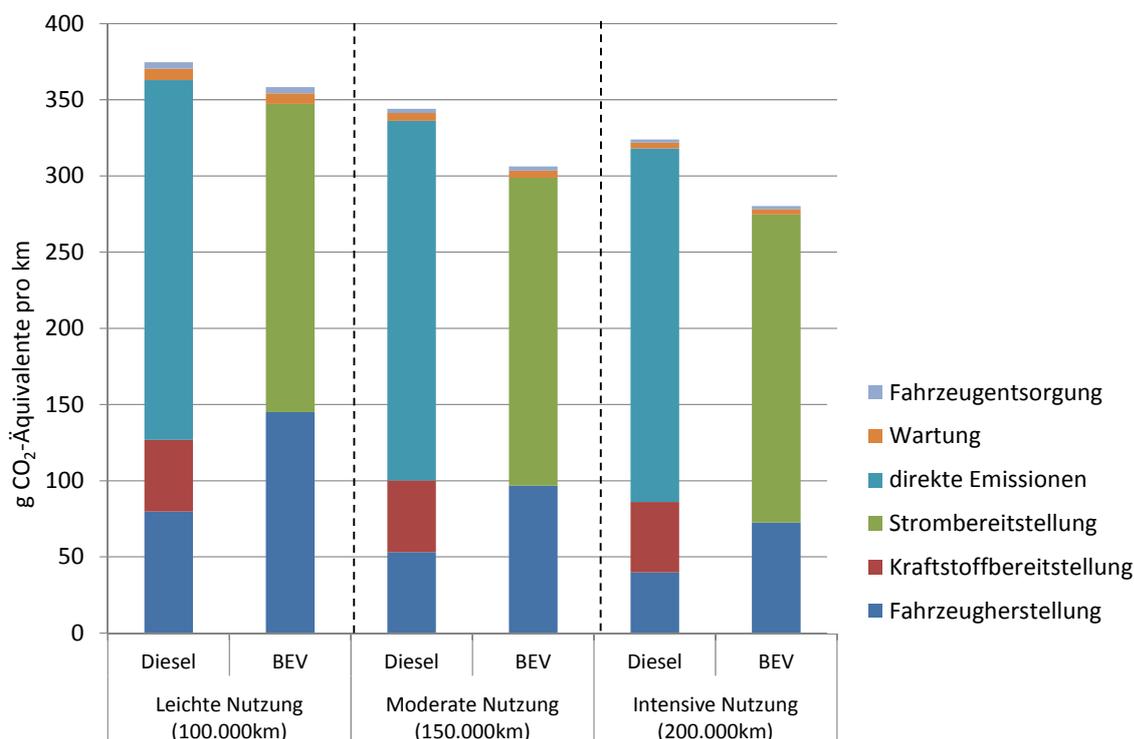


Abbildung 60: Klimabilanz leichter Nutzfahrzeuge (Stadt) für verschiedene Fahrleistungen (2010)

7.2 Betrachtung der Entwicklungsperspektiven

7.2.1 Wie werden sich die Antriebskonzepte zukünftig entwickeln?

Um die Luftreinhaltungs- sowie klima- und energiepolitischen Ziele der Bundesregierung und der Europäischen Union zu erreichen sind deutliche Reduktionen der Emissionen und des Energieverbrauchs des Verkehrs notwendig.

Ab 2015 wird mit der Euro-Stufe-6 eine weitere Verringerung der NO_x-Emissionen von Diesel-Pkw erfolgen. Bezüglich des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen konventioneller Pkw sehen die 2009 beschlossenen EU-Grenzwerte ([EU 2009a]) vor, dass zwischen 2012 und 2015 schrittweise ein Grenzwert von 120 g CO₂/km eingeführt wird („Phase-in“). Aufgrund des „integrierten Ansatzes“ müssen fahrzeugseitig 130 Gramm erreicht werden. Für 2020 wird bereits eine weitere Verschärfung des Grenzwertes auf 95 g CO₂/km diskutiert. Zudem soll der Anteil der Biokraftstoffe, nicht zuletzt durch die Ziele der Erneuerbare Energien Richtlinie der EU, deutlich erhöht werden. Bis 2030 ist

unter diesen Rahmenbedingungen mit einer deutlichen Verbesserung der Umweltbilanz von konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu rechnen. Aber auch bei den Elektrofahrzeugen gibt es gute Entwicklungsperspektiven.

Für die zukünftige Entwicklung werden drei Szenarien betrachtet, die eine konservative, moderate und innovative Entwicklung abbilden:

- Bei der **Herstellung der Fahrzeuge** wurden zunehmendes Leichtbau der Fahrzeuge und deutliche Verbesserungen bei der Batterie unterstellt.
- Der **Energieverbrauch der Fahrzeuge** verbessert sich deutlich. Die Verbrauchsdaten von Elektrofahrzeugen beruhen dabei auf der in Kapitel 5.3 dargestellten Modellierung. Die Verbrauchsdaten von konventionellen Pkw beruhen im innovativen Szenario auf TREMOD-Modellierungen, die eine (Teil-)Hybridisierung und Leichtbau bei konventionellen Fahrzeugen berücksichtigen. Der Kraftstoffverbrauch im konservativen und moderaten Szenario wird demgegenüber auf Basis des höheren Fahrzeuggewichts korrigiert.
- Bei der **Energiebereitstellung** wurden ein Ausbau erneuerbarer Energien im deutschen Strommix sowie eine Erhöhung des Biokraftstoffanteils angenommen. Dieser Strommix wird auch für die Fahrzeugfertigung angenommen.

Das Beispiel eines mittleren Pkw (Abbildung 61) zeigt bereits im konservativen Szenario eine deutliche Verbesserung der Klimabilanz um 25 % gegenüber dem Otto-Pkw und um 16 % gegenüber dem Diesel-Pkw. Dies liegt vor allem an den auch im durchschnittlichen deutschen Strommix deutlich gestiegenen Anteilen erneuerbarer Energien. Demgegenüber bleibt der Biokraftstoffanteil deutlich zurück und ist zusätzlich mit relevanten Produktionsaufwendungen verbunden. Der Anteil der Fahrzeugherstellung an den Treibhausgasemissionen über den Lebensweg steigt auf fast 40 %.

Im moderaten und innovativen Szenario sinken zusätzlich die Herstellungsaufwendungen von Elektrofahrzeuge, insbesondere der Batterie deutlich, gleichzeitig verbessert sich die Effizienz des Antriebsstrangs. Damit reduziert sich die Klimabilanz des mittleren Elektro-Pkw im innovativen Szenario gegenüber dem Otto-Pkw um 34 % und gegenüber dem Diesel-Pkw um 28 %.

Durch die Reduktion des Energieverbrauchs von Elektrofahrzeugen erhöht sich die Reichweite der Fahrzeuge aufgrund der gleich angenommenen Batteriekapazität je nach Szenario um 10 bis 30 %. Der Vergleich der Szenarien für 2030 mit dem Stand in 2010 bezieht sich damit nicht exakt auf die gleiche funktionelle Einheit, sondern stellt einen konservativen Vergleich dar, der auch wachsenden Kundenanforderungen an die Reichweite gerecht wird.

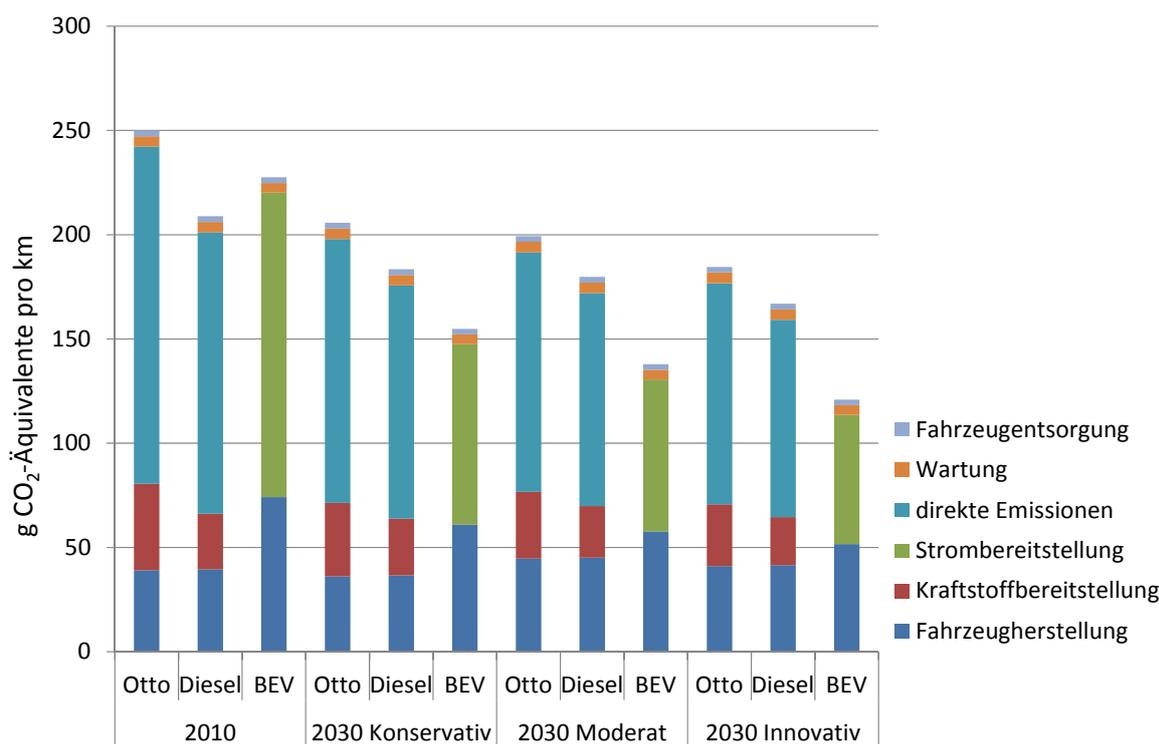


Abbildung 61: Treibhausgasemissionen eines mittleren Otto-, Diesel- und BEV-Pkw in Szenarien (2030)
 Durch die Verbesserungen an der Batterie sinken die Umweltwirkungen in anderen Wirkungskategorien in den Szenarien für 2030 besonders deutlich (Abbildung 62):

- Bei der Versauerung sind Elektrofahrzeuge dann etwa mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbar oder sogar besser.
- Bei der Eutrophierung wird der Nachteil des Diesel-Pkw durch die Einführung der Emissionsstufe Euro-6 ausgeglichen.
- Beim Sommersmogpotenzial liegt der Otto-Pkw aufgrund seiner direkten Auspuffemissionen auch in den Szenarien am höchsten. BEV können ihre Bilanz deutlich verbessern und liegen im innovativen Szenario nur noch geringfügig höher als Otto- und Diesel-Pkw.
- Bei den Feinstaubemissionen können BEV ebenfalls ihre Bilanz deutlich verbessern und liegen im innovativen Szenario nur noch geringfügig höher als für Otto- und Diesel-Pkw.

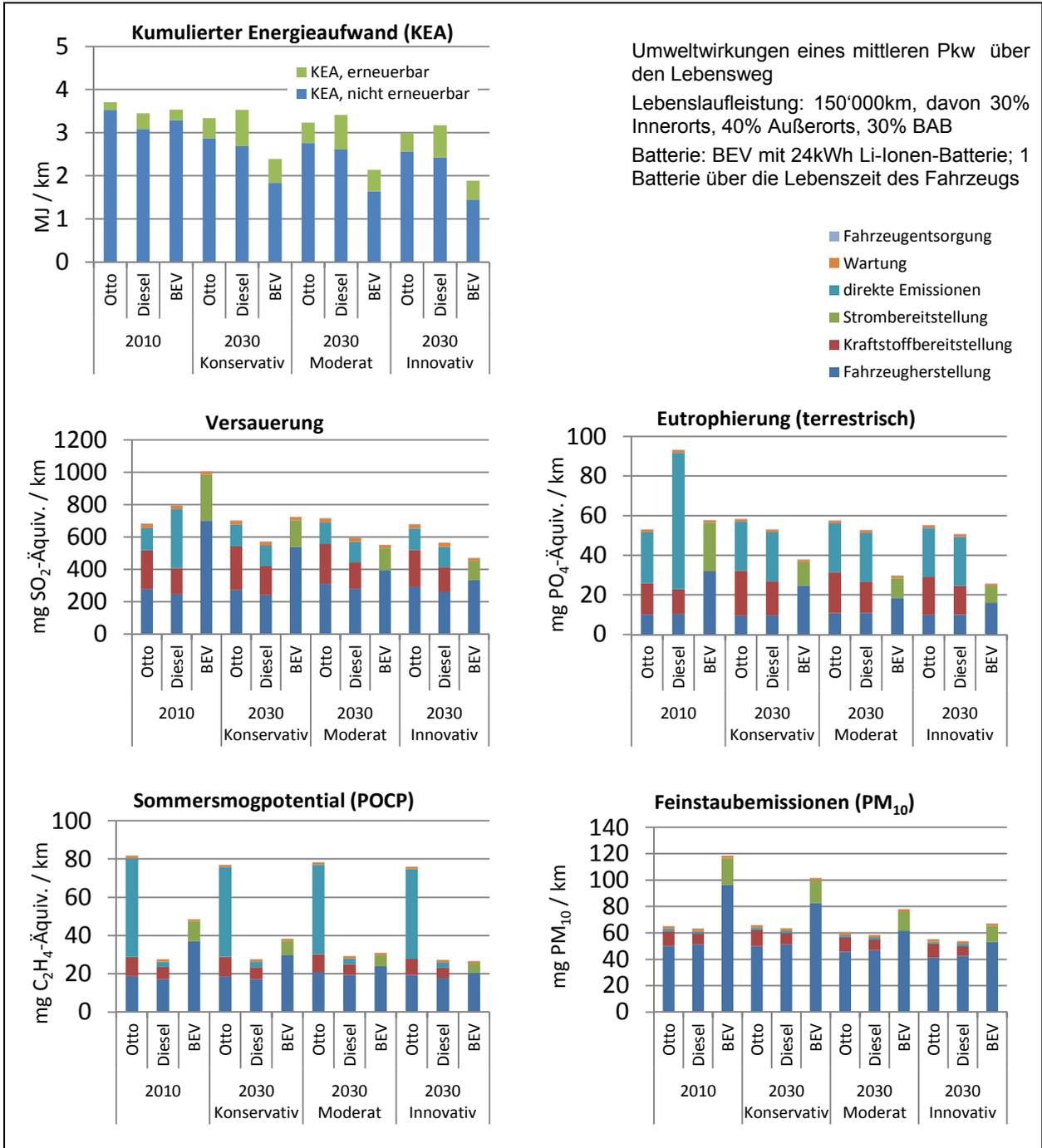


Abbildung 62: Umweltwirkungen eines mittleren Pkw in Szenarien (2030)

7.2.2 Welche Auswirkungen hat die zukünftige Entwicklung des Energiesektors?

Die Treibhausgasbilanz von Elektrofahrzeugen wird bei Betrachtung des für 2030 ermittelten durchschnittlichen Strommix durch den Ausbau erneuerbarer Energien deutlich verbessert. Eine solche Betrachtung vernachlässigt jedoch das Ladeverhalten der Fahrzeugnutzer sowie energiewirtschaftliche Antworten zur Einbindung der fluktuierenden erneuerbaren Energien, z.B. Demand-Side-Management (DSM). Der tatsächliche Betankungsstrommix, der den Fahrzeugen bilanziell angerechnet werden sollte, kann davon abweichen. Diesbezüglich wurden in Kapitel 6.1.2 verschiedene Szenarien zum Betankungsstrommix als Marginalbetrachtung abgeleitet:

- **Tanken nach dem letzten Weg:** Hier werden die Fahrzeuge unmittelbar und ohne weitere Steuerung nach ihrem letzten Weg, also beispielsweise abends nach der Heimkehr, aufgeladen werden (Szenario „Letzter Weg“).
- **Demand Side Management (DSM):** Durch Lastmanagementanreize, die sich an den Börsenpreisen orientieren werden Ladevorgänge vergleichmäßig und verlagert in Zeiten, in denen z.B. das Windenergieangebot besonders hoch und die Stromnachfrage gering ist (Szenario „DSM“).
- **DSM+Erneuerbare Energien:** Zusätzlich zum Lastmanagement wird so viel erneuerbare Energiekapazität zugebaut, wie für die jährliche Erzeugung an Fahrstrom erforderlich ist (Szenario „DSM+EE“).

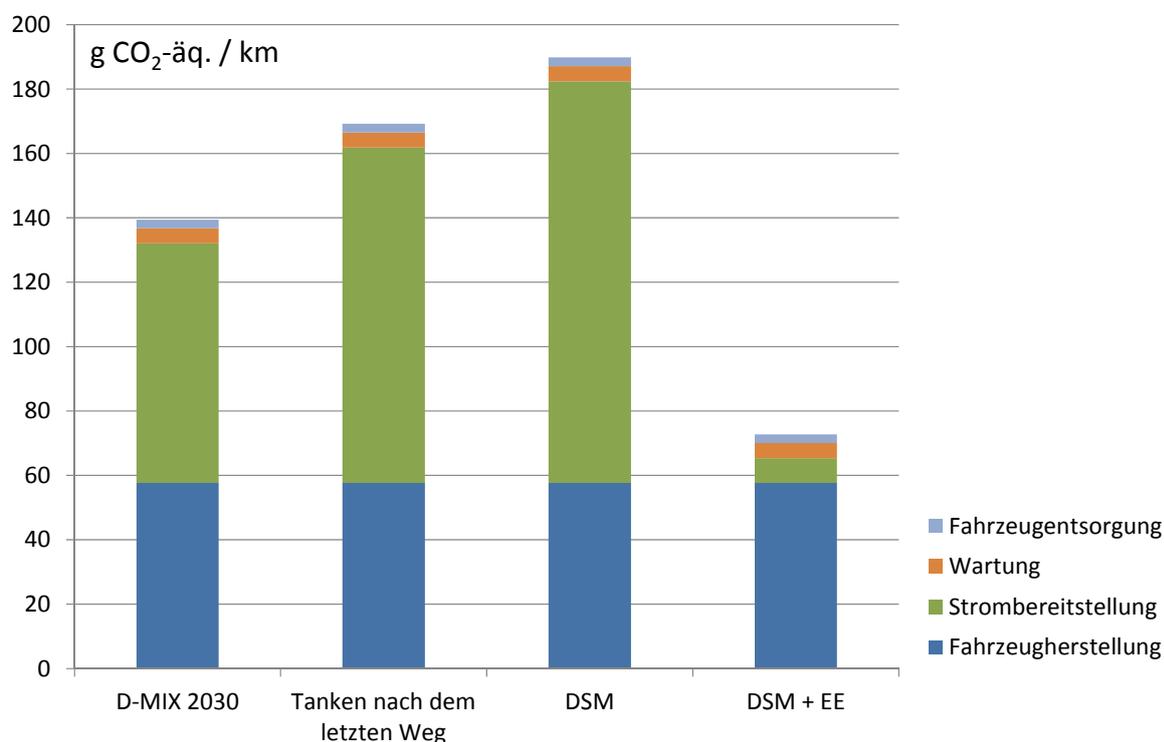


Abbildung 63: Klimabilanz eines mittleren Elektro-Pkw für verschiedene Betankungsstrommixe (2030)

Die Auswirkungen dieser Szenarien zum Betankungsstrommix auf die Treibhausgasbilanz über den Lebensweg werden am Beispiel des mittleren Elektro-Pkw nach moderatem Szenario dargestellt (Abbildung 63). Die Treibhausgasemissionen erhöhen sich durch das ungesteuerte Laden nach dem letzten Weg um gut 20 %, da hier ältere fossile Kraftwerke zusätzlich zum Einsatz kommen müssen.

Gesteuertes Laden (DSM) ohne eine Kopplung an erneuerbare Energie führt sogar zu einer Erhöhung um etwa 35 %. Dies liegt daran, dass durch die Verstetigung des Ladevorgangs vor allem Kraftwerke mit geringen variablen Kosten genutzt werden - in diesem Fall Steinkohlekraftwerke. Durch diese relevante Verschiebung der Stromerzeugung von Gas GuD-Kraftwerken hin zu Steinkohlekraftwerken, ist die Klimawirkung pro getankter Kilowattstunde im DSM-Szenario noch einmal höher als bei der ungesteuerten Betankung nach dem letzten Weg.

Erst durch den Zubau von zusätzlichen Anlagen zur Produktion von erneuerbarem Strom in Höhe des geladenen Fahrstroms in Verbindung mit gesteuertem Laden (DSM+EE) kommt es zu einer deutlichen Reduktion der mit der Strombereitstellung verbundenen Klimawirkung. Das Ziel einer nahezu klimaneutralen Betankung wird dann fast erreicht.

Weitere Vorteile gesteuerten Ladens ergeben sich aus energiewirtschaftlicher Perspektive. So erhöht sich durch das ungesteuerte Laden der 12 Millionen angenommenen Fahrzeuge die Spitzenlast um 6,2 GW ([Pehnt et al. 2011]). Gesteuertes Laden kann diesen Anstieg um 5 GW senken und etwa 30 % des Stroms nutzen, der in Phasen eines Überangebotes (z.B. bei starkem Wind) abgeregelt werden müsste. Dies entspricht nach [Pehnt et al 2011] rund 600 GWh der gesamten Strommenge von 1700 GWh: *„Etwa 3,5 % des gesamten Fahrstrombedarfs können durch solchen „Überschusswindstrom“ gedeckt werden“.*

7.2.3 Wo stehen Elektrofahrzeuge im Vergleich mit Brennstoffzellenfahrzeugen?

Parallel zur dynamischen Entwicklung der Batterie gestützten Elektromobilität werden elektrische Antriebe auf Wasserstoffbasis in Forschung, Entwicklung und Pilotserie untersucht. Hier erfolgt daher ein ökologischer Systemvergleich von Elektromobilität mit Lithium-Ionen-Batterie und Wasserstoffmobilität mit Brennstoffzelle.

Die perspektivische Klimawirkung von Brennstoffzellen-Pkw in 2030 zeigt ein sehr unterschiedliches Bild. Zwar ist die Klimawirkung der Fahrzeugherstellung vergleichbar mit batterieelektrischen Fahrzeugen, die Treibhausgasbilanz der Wasserstoffbereitstellung ist in vielen Fällen jedoch ungünstiger als die für 2030 ermittelte durchschnittliche Strombereitstellung. Für die fossilen Energieträger Erdgas und Kohle fällt die Gesamtbilanz über den Lebensweg ungünstiger aus. Bei der Kohlevergasung ist der Unterschied aufgrund der bilanzierte CO₂-Abscheidung (CCS) jedoch gering. Die Nutzung von Wasserstoff aus Elektrolyse unter Nutzung des gleichen, für 2030 ermittelte durchschnittliche Strommixes, zeigt sogar die schlechteste Klimabilanz – im Falle der dezentralen Analyse sind die Klimawirkungen des Brennstoffzellen-Pkw pro Kilometer dann nahezu doppelt so hoch wie beim BEV unter Nutzung des durchschnittlichen Strommix. Dies ist auf den zwischengeschalteten Umwandschritt Strom → Wasserstoff → Strom mit den entsprechenden Wirkungsgradverlusten zurückzuführen.

Auf der anderen Seite ermöglichen erneuerbare Energiequellen wie Biomasse und Windstrom eine deutlich günstigere Bilanz, auch im Vergleich mit BEV unter Nutzung des durchschnittlichen Strommix. Die Klimabilanz für die Mobilität mit Wasserstoff aus zentraler Elektrolyse unter Nutzung von Windstrom ist dann auch nur geringfügig (11 %) schlechter als für die direkte Nutzung von Windstrom in batterieelektrischen Fahrzeugen.

Diese Betrachtungsweise ignoriert allerdings die Frage, wie viel Nutzen mit einem gegebenen Input an erneuerbaren Energieträgern erzielt werden kann. Auch hier führt der Wirkungsgrad der Umwandlungskette zu einem niedrigeren erzielbaren Nutzen. Siehe hierzu

Kapitel 6 „Strategische Bewertung der Antriebskonzepte“ im Ergebnisbericht dieses Projektes.

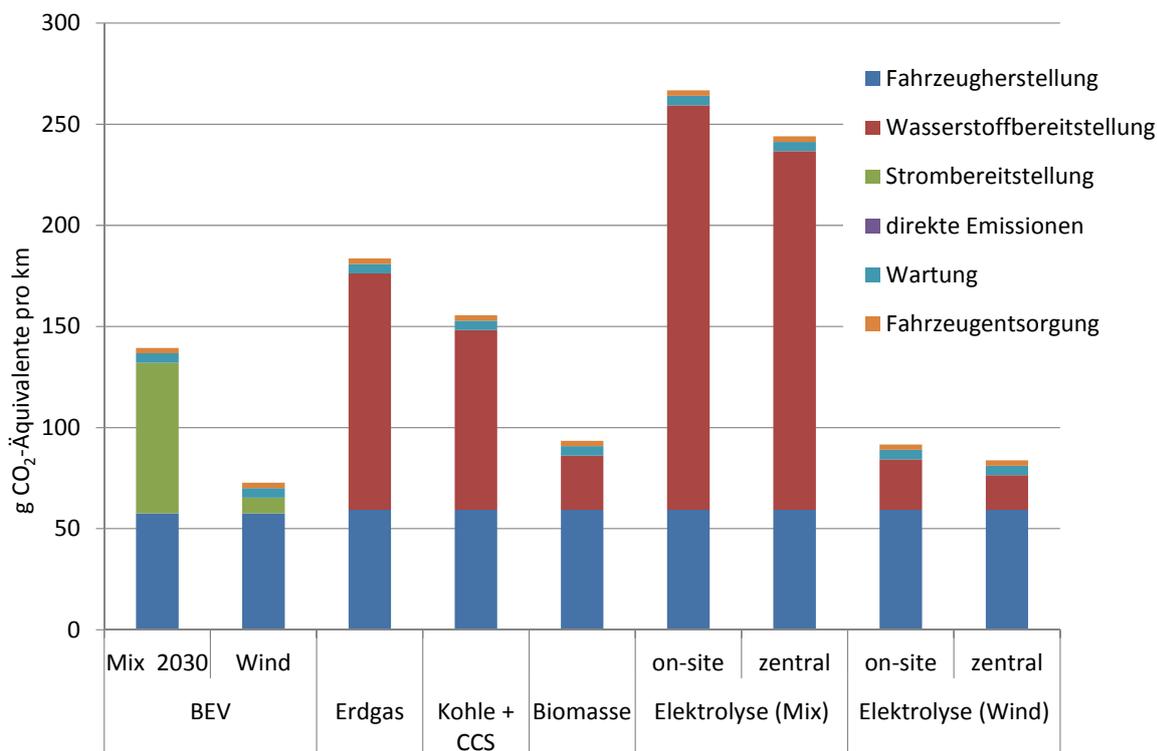


Abbildung 64: Klimabilanz eines Brennstoffzellen-Pkw in 2030

In den weiteren Wirkungskategorien (Abbildung 65) ergibt sich folgendes Bild:

- Auch beim kumulierten Energieaufwand zeigt sich die nachteilige Energiebilanz des Brennstoffzellen-Pkw beispielsweise im höheren Bedarf an erneuerbaren Energieträgern beim Vergleich BEV Wind und Brennstoffzelle Wind.
- Insgesamt wird die Lebenswegbilanz in den meisten Kategorien sowohl für das BEV als auch für das Brennstoffzellenfahrzeuge durch die Fahrzeugherstellung dominiert. Dies liegt vor allem an der – bei beiden Fahrzeugen (nahezu) emissionsfreien Nutzungsphase.
- Höhere Versauerungsemissionen und höhere Auswirkungen beim Sommersmog gegenüber BEV sind auf die Brennstoffzellenherstellung (insbesondere Platinmetalle) zurückzuführen. Die Versauerungsemissionen sind wesentlich abhängig von der Recyclingquote des Katalysatormaterials (siehe Kapitel 4.4.2)
- Die Eutrophierung stammt im Wesentlichen von den Stickoxid-Emissionen des Kraftwerksparks im Fall der elektrisch basierten Antriebssysteme (BEV Mix, Elektrolyse Mix).

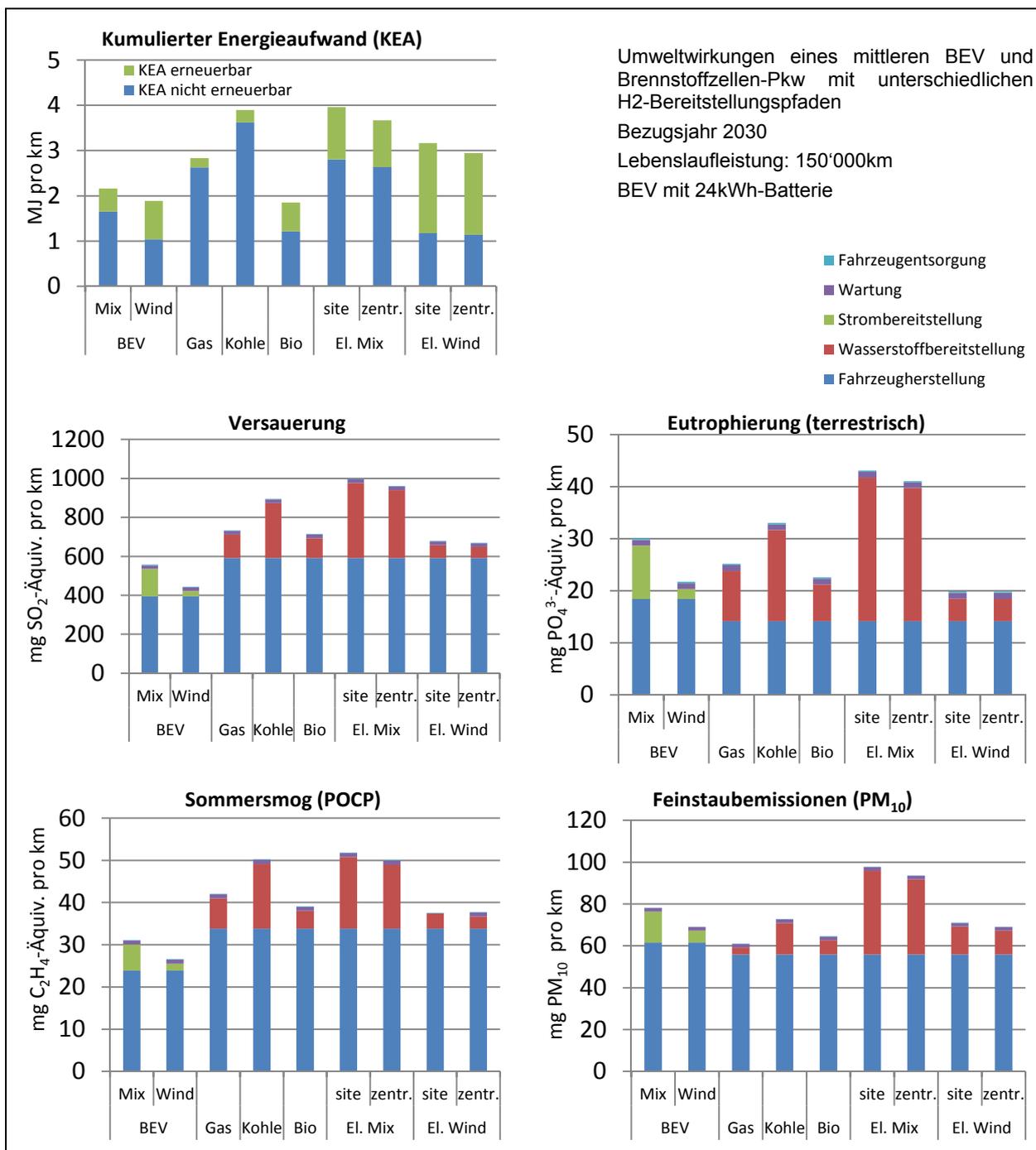


Abbildung 65: Umweltwirkungen von Brennstoffzellen-Pkw über den Lebensweg (2030)

8 Ergänzende Aspekte der Elektromobilität

Die aus dem Konjunkturpaket II vom BMU geförderten Projekten haben weitere interessante Aspekte der Elektromobilität untersucht. Das kabellose Laden war Fokus von vier Forschungsprojekten¹³, in einem weiteren Projekt wurden batterieelektrische Schwerlastfahrzeuge für den Transport von Containern im Hamburger Hafen entwickelt und getestet. Beide Aspekte werden in diesem Abschnitt näher untersucht.

8.1 Kabelloses Laden

Der Ladevorgang aktueller Elektromobilitätsprojekte wird in der Regel mit einem Stromkabel und Stecker durchgeführt. Während anfänglich der herkömmliche Schutz-Kontakt-, kurz Schuko-Stecker eingesetzt wurde, setzt sich nun immer mehr der in Deutschland nach VDE standardisierter Ladestecker (VDE-AR-E 2623-2-2) durch. Dieser ist mit sieben Kontakten ausgestattet, die maximale Ladeleistung beträgt 43 kW. Mittlerweile ist dieser VDE Normstecker auf dem Weg sich im europäischen Raum als Standard durchzusetzen.

Das Laden per Kabel und Stecker bringt jedoch auch Probleme mit sich: *„Herumhängende Kabel können zu Stolperfallen werden, Ladesäulen im öffentlichen Raum bieten ein leichtes Ziel für Vandalismus und Sabotage.“* ([VDI 2011]) Kabelloses, also berührungsloses induktives Laden erhöht hier die Sicherheit und natürlich auch den Bedienkomfort. Das Risiko einer leeren Batterie, wenn das Einstecken einmal vergessen wird, wird minimiert. Außerdem wird die Batterie tendenziell auch über eine längere Zeit mit dem Netz verbunden und kann entsprechend schonender geladen werden. Perspektivisch können Elektrofahrzeuge so auch besser einen relevanten Beitrag zur Integration fluktuierender erneuerbarer Energien leisten.

Im Mini E Projekt hat sich gezeigt, dass die Nutzer nur aufgrund der vergleichsweise hohen Reichweite nur durchschnittlich 2,8 Ladevorgänge pro Woche durchführen, *„... wodurch die Verfügbarkeit für intelligente Ladeanwendungen sinkt“* ([BMW 2010b]). Kontaktloses Laden kann hier die Verbindungszeit mit dem Stromnetz deutlich erhöhen. Ziel ist es, einen einfachen, zuverlässigen und barrierefreien Ladevorgang zu schaffen, der die Kundenakzeptanz und die Marktfähigkeit von Elektro- und Plug-In-Hybridfahrzeugen verbessern soll. Aus diesen Gründen wird das kabellose Laden im Rahmen des Förderprogrammes von vier Projekten (Conductix, IndiOn, W-Charge, JustPark) untersucht.

Daten aus diesen Projekten bilden die Grundlage für eine umweltbilanzielle Einordnung des kontaktlosen Ladens. Dabei werden Herstellungsaufwendungen für die Infrastruktur (im Fahrzeug und am Parkplatz) sowie ein höherer Energieverbrauch durch das höhere Fahrzeuggewicht und den niedrigeren Ladewirkungsgrad betrachtet.

¹³ W-Charge, Conductix, Just Park und IndiOn

8.1.1 Infrastruktur für kabelloses Laden

Berücksichtigt wird die für das induktive Laden benötigte Infrastruktur am Fahrzeugstellplatz (Primäreinheit) sowie im Fahrzeug (Sekundäreinheit). Aus den Angaben der Forschungsprojekte wurde dafür der Materialeinsatz abgeleitet. Dabei werden vorrangig die Angaben von ([Daimler 2011c]) berücksichtigt (Tabelle 35). Das Gesamtgewicht der Primäreinheit beträgt heute (2010) demnach 25 kg, der Sekundäreinheit 20 kg. Mittelfristig wird für eine Serienfertigung (2030) jedoch eine Halbierung des Materialeinsatzes angestrebt ([Daimler 2011c]). Beide Spulen bestehen weitgehend aus Ferriten, Kupfer und Alublech. Es werden die Aufwendungen zur Herstellung der Materialien berücksichtigt. Zum Energieeinsatz bei der Fertigung und der Vor-Ort-Installation liegen keine Daten vor. Er wird daher vernachlässigt.

Es ergeben sich für die Materialien der Infrastruktur des kontaktlosen Ladens nach [Ecoinvent 2008] Umweltwirkungen im Bereich von 1 – 2 % der Herstellung eines Pkw BEV (mittel), wie in Tabelle 36 ersichtlich. Die verwendeten Materialien stellen damit in den untersuchten Wirkungskategorien keine besonders kritische ökologische Belastung dar. Perspektivisch verringert sich der Aufwand durch die angestrebte Halbierung ([Daimler 2011c]) des Materialeinsatzes deutlich.

Tabelle 35: Materialeinsatz für kabelloses Laden

Material	Primär- und Sekundäreinheit
Alublech	10 %
Kupfer	20 %
Ferrite	65 %
Vergussmasse	5 %
Quelle: [Daimler 2011c]	IFEU 2011

Tabelle 36: Umweltwirkung der Infrastruktur für kontaktloses Laden

Wirkungskategorie	Umweltwirkung 2010 (2030)	% von Herstellung Pkw BEV (mittel) 2010
Klimawirkung	128 kg CO ₂ -eq.	1,1 %
Kumulierter Energieaufwand	2121 MJ	1,2 %
Versauerung	1,6 SO ₂ -eq.	1,5 %
Eutrophierung (terrestrisch)	0,07 PO ₄ -eq.	1,4 %
Sommersmog	0,09 C ₂ H ₄ -eq.	1,5 %
Feinstaubbelastung	1,5 PM ₁₀ -eq.	1,7 %
		IFEU 2011

8.1.2 Kabelloses Laden in der Nutzungsphase

Kabelloses Laden ist mit einem niedrigeren Ladewirkungsgrad verbunden und führt durch zusätzliches Fahrzeuggewicht zu einem höheren Energieverbrauch in der Nutzungsphase. Der zusätzliche Energieverbrauch durch das höhere Fahrzeuggewicht ist dabei gering. Über den Lebensweg erhöhen sich die Treibhausgasemissionen des angenommenen mittleren Pkw durch 20 kg Zusatzgewicht um 215 kg CO₂-Äquivalente, also um deutlich weniger als 1 % der Klimawirkung über den Lebensweg.

Tabelle 37: Mehrverbrauch durch Zusatzgewicht aufgrund kabellosen Ladens

	2010*		2030 (moderat)**	
	kWh/km	MJ/Lebensweg	kWh/km	MJ/Lebensweg
Innerorts	0,21	1115 MJ	0,08	433 MJ
Außerorts	0,17	925 MJ	0,07	383 MJ
Autobahn	0,14	741 MJ	0,06	299 MJ

* 20kg Zusatzgewicht; ** 10k g Zusatzgewicht
Quelle: Eigene Berechnungen IFEU 2011

Von größerer Bedeutung ist dagegen der Ladewirkungsgrad, der beim induktiven Laden deutlich unter dem von konduktiven Laden liegt. Während für konduktives Laden Verluste in der Batterie (Batterieladefizienz) und durch den DC/DC-Wandler auftreten, entstehen bei induktivem Laden zusätzlich Übertragungsverluste (siehe [Schraven et al., 2010]). Diese hängen stark vom Abstand zwischen Primär- und Sekundäreinheit ab: Der Übertragungswirkungsgrad liegt heute etwa zwischen 80 % und 85 %, perspektivisch werden 90 % und mehr für möglich gehalten (siehe [Schraven et al., 2010], [Daimler 2011c], [Ifak 2011]). Setzt man für die Batterieladefizienz von 90 % (siehe Abschnitt 5.3.2) an, ergibt sich für das kontaktlose Laden heute ein Gesamtwirkungsgrad im Bereich von 75 %. Perspektivisch könnten etwa 83 % erreicht werden (siehe Tabelle 38).

Tabelle 38: Wirkungsgrad für konduktives und induktives Laden

	2010		2030 (moderat)	
	Konduktiv	Induktiv	Konduktiv	Induktiv
Batterieladefizienz (inklusive DC-DC-Wandler)	90%	90%	91,8%	91,8%
Übertragungseffizienz	-	80%-85%	-	90%
Gesamteffizienz	90%	~75%	91,8%	83%
Zusätzliche THG (Gesamt)		4,8t		1,7t

IFEU 2011

8.1.3 Umweltbilanz kabellosen Laden

Insgesamt werden beim induktiven laden eines mittlerer batterieelektrischen Pkw über seine gesamte Lebenszeit bei einem angenommenen Gesamtladewirkungsgrad von 75 % fast 7.500 kWh mehr Strom verbraucht als beim Laden per Kabel. Das entspricht bei heute durchschnittlichem deutschen Strommix 5 Tonnen zusätzlicher Treibhausgasemissionen. Perspektivisch verringert sich dieser Mehrverbrauch bis 2030 auf gut 6.500 kWh und durch den Ausbau erneuerbarer Energie auf 1,7 t Treibhausgasen. Um diese Emissionen zu kompensieren müssten:

- Heute 1,3 Batterien bzw. perspektivisch 0,8 Batterien durch schonenderes Laden weniger eingesetzt werden. Da nur 1,5 Batterien (2010) bzw. 1 Batterie (2030) über die Lebensdauer des Fahrzeuges verwendet werden, ist dies nicht möglich.
- 7.500 kWh überschüssigen Windstroms, der durch die zusätzliche Zeit der Pkw am Stromnetz integriert werden. Dies entspricht etwa 34.000 km oder 23 % der angenommenen Gesamtfahrleistung von 150.000 km die durch überschüssigen Windstrom erbracht werden. Da 2009 nur etwa 0,2 % des erzeugten Windstroms abgeregelt wurden ([Ecofys 2011]) ist auch dies kaum möglich

Während zusätzliche Umweltwirkungen durch Infrastruktur und das höhere Gewicht gering sind, ist Übertragungswirkungsgrad beim kontaktlosen Laden die entscheidende Einflussgröße. Hier gibt es noch große Unsicherheiten. Daher ist in Abbildung 67 zusätzlich eine Sensitivitätsbetrachtung dargestellt. So liegt die zusätzliche Klimawirkung heute bei einem angenommen Ladewirkungsgrad von 85 % bei nur noch 1,7 Tonnen CO₂-Äquivalenten.

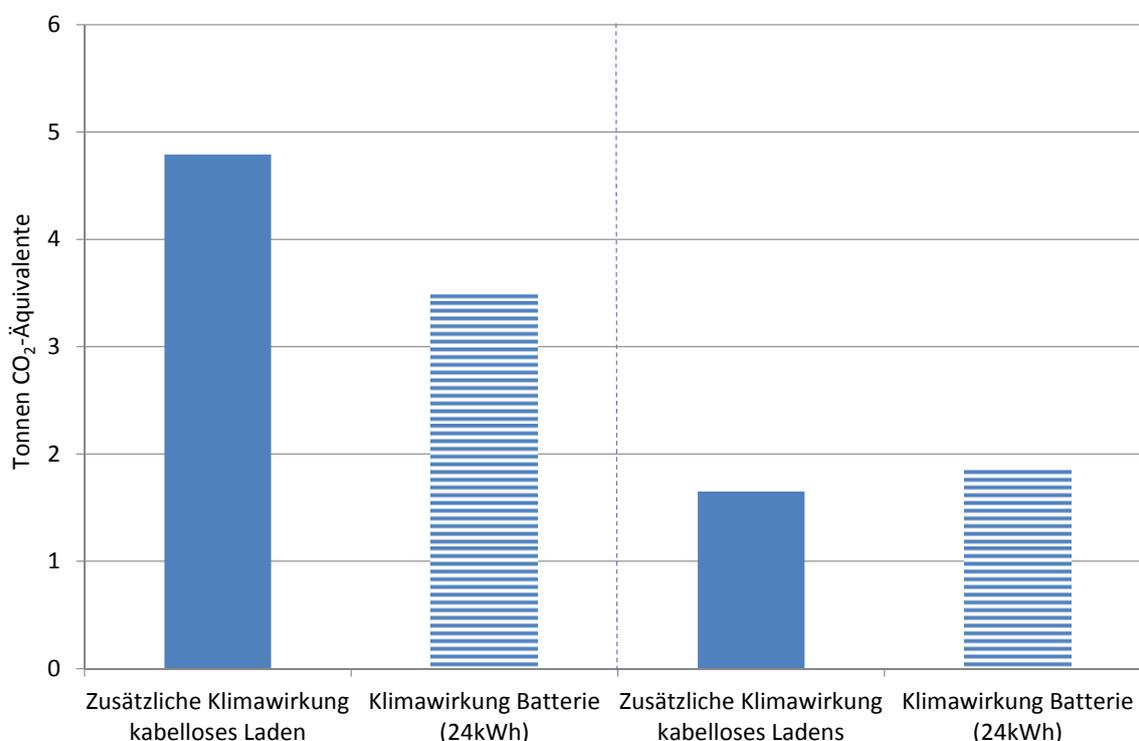


Abbildung 66: Zusätzliche Treibhausgasemissionen induktives Laden im Vergleich zur Batterieherstellung

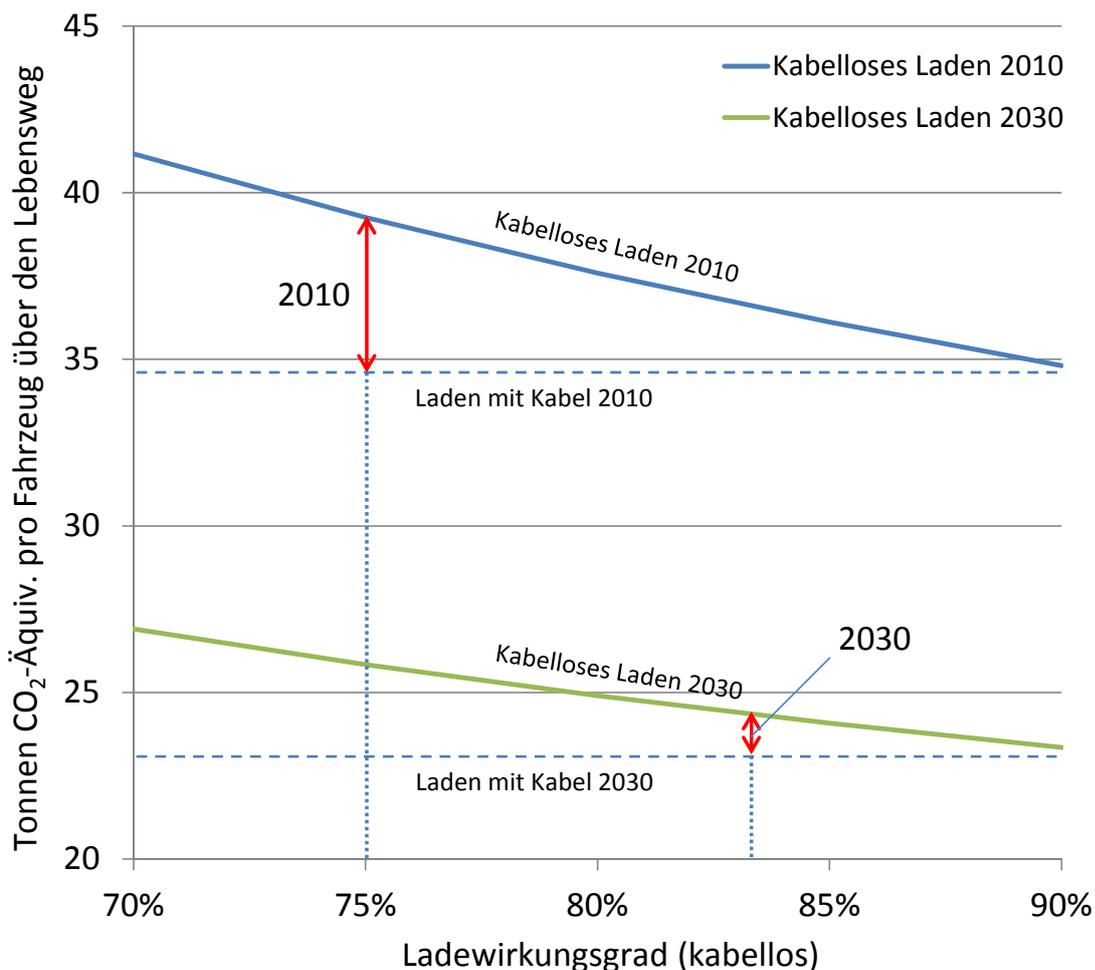


Abbildung 67: Klimabilanz eines mittleren Pkw über den Lebensweg mit und ohne kontaktloses Laden nach Ladewirkungsgrad (durchschnittlicher Strommix Deutschland)

Insgesamt zeigt sich, dass der geringere Wirkungsgrad bei kabellosem Laden zu einer relevanten Erhöhung des Stromverbrauchs führt. Dieser Nachteil kann – basierend auf den oben gemachten Abschätzungen – nicht durch eine Verbesserung der Batterielebensdauer ausgeglichen werden. Eine weitergehende Analyse muss deshalb in Betracht ziehen, ob die Vorteile des kontaktlosen Ladens, wie die Erhöhung von Sicherheit und Komfort, zu einer schnelleren oder umfassenderen Einführung von Elektromobilität führen und damit insgesamt zu einem positiven Umwelteffekt führen.

Zusätzlich diese Nachteile mit höherem Stromverbrauch und damit Kosten verbunden sind. Die zusätzlichen Kosten in der Nutzungsphase liegen heute bei einem angenommenen Strompreis von 20 ct/ kWh etwa 1.500 € über das gesamte Fahrzeugleben. Zusätzlich Kosten entstünden durch die Infrastruktur und deren Montage: *„Insbesondere bei einer Ladung am eigenen Stellplatz, dem wahrscheinlich ersten Einsatzfall zur Ladung von Elektrofahrzeugen, ist gegenüber der Kabelladung mit zusätzlichen Kosten von mindestens 6.000 € pro System aus Ladestation und Fahrzeugerweiterung zu rechnen. Die Mehrkosten entstehen vorwiegend durch heute sehr teure leistungselektronische Bauelemente und Materialien zur Magnetfeldführung, die sowohl fahrzeugseitig als auch an der Ladestation benötigt werden“* ([Schraven et al. 2010]).

Die Kosten könnten perspektivisch durch günstigere Tarife in Verbindung mit gesteuertem Laden und Rückspeisungserlöse teilkompensiert werden. Zusätzlich erhöht sich der Bedienkomfort deutlich.

8.2 Schwerlastfahrzeuge zum Containertransport

Der globale Handel wird heute zum großen Teil über die Seehäfen abgewickelt, die durch stärkere Automatisierung und Technisierung lokal ein relevanter Energieverbraucher und Emittent von Klimagasen und Schadstoffen sind. Damit stellen sich ähnliche Fragen wie im Bereich des Straßenverkehrs: Wie können CO₂- und Schadstoffemissionen signifikant gesenkt und gleichzeitig die Abhängigkeit von den endlichen fossilen Ressourcen reduziert werden?

Als Lösungsansatz wurden im Rahmen des Projektes „Batteriebetriebene Schwerlastfahrzeuge im Containerterminal Altenwerder“ getestet. Der Fahrzeugbetrieb solcher „Automatic Guided Vehicles“ (AGV) ist, verglichen mit verbrennungsmotorischen Antriebssystemen, hocheffizient und erzeugt keine lokalen Emissionen. Zusätzlich wird die Energieträgerbasis deutlich verbreitert und es werden auch erneuerbare Energien nutzbar gemacht. Da die Ladedauer der Batterien ein Vielfaches des Tankvorgangs beträgt, werden entladene Batterien in einer Batteriewechselstation innerhalb weniger Minuten gegen geladene Batterien getauscht; so wird eine hohe Verfügbarkeit der Schwerlastfahrzeuge gewährleistet.

Um die Umwelteffekte zu quantifizieren, wurde von IFEU im Rahmen einer ökologischen Begleitforschung ein ökobilanzieller Vergleich des bisherigen diesel-elektrischen (E-AGV) mit dem neuen batterie-elektrischen Antriebssystem (B-AGV) durchgeführt. Dabei wurde der gesamte Lebensweg der AGV-Systeme betrachtet: Von der Herstellung der Fahrzeuge, Batterien und Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur über die Fahrzeugnutzung und Bereitstellung der dazu benötigten Energie bis zur Fahrzeugentsorgung bzw. dem Recycling von Materialien. Der Fokus der Betrachtung lag auf den differierenden Komponenten der Fahrzeuge (insbesondere der Batterie) und der Nutzungsphase. Die weiteren Komponenten wurden nur überschlägig über den Materialeinsatz bilanziert.

Aus den Ergebnissen der ökologischen Begleitforschung lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ableiten:

1. Die **Klimawirkung** der B-AGV hängt wesentlich vom verwendeten Strommix ab, liegt aber in allen Szenarien deutlich unter der Klimawirkung des E-AGV-Systems. Bereits bei Nutzung des heute durchschnittlichen deutschen Stroms werden die Treibhausgasemissionen pro Container-Umschlag um etwa 25 % gesenkt (inklusive der Fahrzeugherstellung). Durch den im Projekt verwendeten Ökostrom wurde die Klimawirkung sogar um über 55 % gesenkt. Bei Nutzung von Strom aus zusätzlichen Anlagen zur Erzeugung regenerativen Stroms (z.B. Windkraft) kann darüber hinaus eine Minderung der Klimawirkung um etwa 85 % erreicht werden.
2. Auch die **Energieeffizienz** des B-AGV-Systems ist deutlich höher, der kumulierte Energieaufwand pro Container-Umschlag liegt etwa 15 % unter dem der E-AGV. Die geringen THG-Emissionen beim B-AGV-Betrieb mit erneuerbarer Energien dürfen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch hier große Energiemengen verbraucht werden, die damit an anderer Stelle nicht zur Verfügung stehen.
3. Die **lokalen Schadstoffemissionen** werden vollständig vermieden. Bei der Versauerung ergibt sich zudem in allen betrachteten Szenarien auch über den Lebensweg eine deutliche Reduktion durch das B-AGV-System gegenüber dem E-AGV-System zwischen 65 % und 85 %. Die Feinstaubemissionen werden dagegen in der Betrachtung über den Lebensweg stark durch die Fahrzeug- und Batte-

rieherstellung bestimmt und liegen damit für beide Systeme in einer ähnlichen Größenordnung.

4. Der überwiegende Teil der Emissionen wird durch den deutlich **verringerten Leerlaufverbrauch** der B-AGV erreicht. Insbesondere bei Anwendungen mit hohem Leerlaufanteil führt eine Elektrifizierung also zu überdurchschnittlichen Umweltvorteilen.
5. Die Rückgewinnung von Bremsenergie im Betrieb senkt den Energieverbrauch um etwa 8 %. Der Einsatz von **Supercaps** würde nur eine geringe zusätzliche Energieersparnis bewirken.
6. Durch Ausrichtung der Ladestrategie an der Windenergieprognose (**gesteuertes Laden**) können die Ladezeiten der Wechselbatterien in Zeiten höherer Windstromerzeugung verschoben werden, ohne die Produktivität der AGV im Hafenbetrieb zu beeinträchtigen. Für eine reine B-AGV-Flotte lässt sich so der Windenergieanteil im Ladestrom um mehrere Prozent steigern, abhängig von der Anzahl der Wechselbatterien im System. Damit leistet der Hafen einen Beitrag zu besseren Integration fluktuierender erneuerbarer Energien.

In den AGV werden im Gegensatz zu den Anwendungen im Automobilbereich Bleibatterien eingesetzt. Diese stellen eine seit langer Zeit etablierte Technologie dar und sind zudem günstig in der Anschaffung. Auf der anderen Seite ist das technische Optimierungspotential jedoch weitgehend ausgeschöpft. So beträgt die theoretische Obergrenze der Energiedichte auf Zellebene bei Bleibatterien etwa 160 Wh/kg, während sie für Li-Ionen-Batterien mehr als doppelt so hoch liegt [Garche et al. 2008]. Auch in puncto Zyklfestigkeit und Ladewirkungsgrad sind moderne Li-Ionen-Batterien den Bleibatterien überlegen.

Daher wurde von IFEU zusätzlich eine theoretische Betrachtung von AGV mit Lithium-Ionen Batterien durchgeführt: Gegenüber den Bleibatterien zeigen sich dabei in allen Szenarien deutlich Verbesserungen der Klimabilanzen in Höhe von etwa 20 %. Das liegt in erster Linie an den durchweg höheren Wirkungsgraden von Li-Ionen-Batterien. Das Entwicklungspotenzial der untersuchten AGVs ist hinsichtlich ihrer Umweltbilanz also noch nicht ausgeschöpft.

Die Elektrifizierung von AGV stellt sich damit auch im Vergleich mit der Elektrifizierung von Pkw günstig dar: So ergeben sich hier bereits bei Nutzung des durchschnittlichen deutschen Strommix deutlichen Vorteile gegenüber dem konventionellen Referenzfahrzeug. Die vergleichsweise günstige Bilanz des B-AGV (25 % Minderung bei Nutzung durchschnittlichen deutschen Strommix) wird zum großen Teil durch die Vermeidung des Energieverbrauchs im Leerlauf erreicht: Dieser verursacht beim diesel-elektrischen AGV 41 % des gesamten Energieverbrauchs und macht beim Batterie-AGV mit 5 % nur noch einen Bruchteil dessen aus.

Insgesamt zeigen sich aus Umweltsicht deutliche Vorteile für das batterieelektrische AGV-System: Lokale Emissionsfreiheit und über den Lebensweg in allen Szenarien deutliche Vorteile bei der Klimawirkung und Versauerung sowie keine relevanten Nachteile bei den Feinstaubemissionen. Zukünftig wird sich die Bilanz der B-AGV durch den Ausbau erneuerbarer Energie sogar tendenziell verbessern. Gegenüber dem Straßenverkehr ist der absolute Umweltbeitrag jedoch durch die geringe Zahl an Fahrzeugen stark begrenzt.

9 Fazit und Ausblick

Vorteilhafte Klimabilanz für erneuerbare Elektromobilität

Die vorgestellten Umweltbilanzen zeigen: Heute sind die Klimaemissionen von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), die mit durchschnittlichem deutschen Strom betrieben werden, auf dem Niveau von konventionellen Fahrzeugen mit Otto- und Diesel-Motor. Die deutliche Erhöhung der Klimawirkung durch die Herstellung der Batterien – bei einer Batteriegröße von 24 kWh etwa eine Verdoppelung der Herstellungsemissionen des sonstigen Fahrzeuges – kann durch die bessere Effizienz des Systems Elektroauto bei Fahrleistungen um 150.000 km in etwa kompensiert werden.

Deutliche Vorteile ergeben sich durch die Nutzung von Strom aus zusätzlicher erneuerbarer Energie, z.B. aus zusätzlich für Elektrofahrzeuge erstellten Windkraftanlagen. Dann liegt die km-bezogene Klimawirkung von Elektro-Pkw, bei Berücksichtigung aller energetischen Aufwendungen zur Herstellung der Energieträger, der Batterien und der Fahrzeuge, bei nur 30 % bis 40 % derjenigen von konventionellen, mit fossilem Kraftstoff betriebenen Fahrzeugen. Da der erneuerbare Strom in Batterie-Elektrofahrzeugen deutlich effizienter eingesetzt werden kann als in der Prozesskette der elektrolytischen Herstellung von Wasserstoff und dessen Nutzung in Brennstoffzellen-Pkw, ist hier der Gesamtwirkungsgrad deutlich schlechter als bei der Stromspeicherung ausschließlich über die Batterie.

Die Nutzung von erneuerbarem Strom in batterieelektrischen Fahrzeugen hat in etwa den gleichen Einspareffekt wie dessen Nutzung in stationären Anwendungen. In einem Elektro-Pkw ersetzt die Kilowattstunde Strom bei einem Verbrauch von 22 kWh/ 100 km etwa 4,5 Fahrkilometer mit einem konventionellen Pkw. Dies entspricht, wenn man die Vorkettenemissionen berücksichtigt, über 900 g CO₂-Äquivalente bei einem Otto-Pkw und etwa 730 g CO₂-Äquivalente bei einem Diesel-Pkw. Die Substitutionswirkung entspricht damit der Ersetzung des Stroms aus Steinkohlekraftwerken durch Windkraft. Hier würde eine Minderung der Treibhausgasemissionen um etwa 800 g CO₂-Äquivalenten pro kWh resultieren.

Zusätzliche erneuerbare Energien für Elektrofahrzeuge

Die aus Umweltsicht somit sehr vorteilhafte Koppelung von Elektromobilität an den Ausbau von zusätzlichen erneuerbaren Energien kann auf verschiedene Arten erfolgen. Attraktiv wäre eine Kopplung von Elektromobilität mit erneuerbaren Energien (siehe hierzu z.B. [Pehnt 2010]), die z.B. auch Bedingung für eine Förderung oder Steuerbefreiung sein könnte. Ein Ansatzpunkt ist der Ökostrommarkt: Hier könnte ein neues Gütesiegel mit hohen Anforderungen an die Zusätzlichkeit der Anlagen (Anteil Neuanlagen) eingeführt werden.

Im Verkehrsbereich sind wegen der Mineralölsteuer die effektiven Energiekosten deutlich höher als im stationären Bereich. Der Verkehrssektor könnte daher auch eine höhere Zahlungsbereitschaft für regenerativen Strom als der stationäre Sektor aufweisen.

Vorteile für Elektromobilität nehmen zukünftig zu

Die Klimabilanz der konventionellen Pkw wird sich durch Effizienzverbesserungen, Leichtbau, Fahrassistenten, Biokraftstoffe etc. in den nächsten Jahren weiter verbessern. Durch einen realisierten Ausbau erneuerbarer Energie wird sich die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen jedoch auch bei Nutzung des durchschnittlichen bundesdeutschen Strommixes noch stärker verbessern als bei konventionellen Verbrennungsmotoren.

Bei anderen Umweltwirkungen wird die Bilanz des Elektrofahrzeugs durch die Fahrzeugherstellung dominiert. Diese verursacht bei der Versauerung, dem Sommersmog und den Feinstaubemissionen 70-80 % der Umweltwirkung über den Lebensweg. Effekte der Versauerung und des Sommersmogs gehen vor allem auf die Batterieherstellung zurück.

Batterien weiterentwickeln

Aufgrund der Bedeutung der Batterieherstellung gilt es, die Leistungsfähigkeit (Lebensdauer, Energiedichte) und die Herstellungsprozesse (Energieeinsatz) aus Umweltsicht zu optimieren. Alleine eine Erhöhung der Dauerhaltbarkeit auf das gesamte Fahrzeugleben spart über den Lebensweg gut 1,5 Tonnen Treibhausgasemissionen.

Mit solchen Verbesserungen verringern sich die Umweltwirkungen sowohl der Herstellung wie auch des gesamten Fahrbetriebs. Mit dem zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien für den Fahrbetrieb bleibt der Anteil der Fahrzeugherstellung in den Bilanzen über den Lebensweg in den betrachteten Szenarien jedoch gleich oder steigt sogar an.

Zudem sind die heute noch hohen Kosten und die begrenzte Reichweite ein zentrales Hemmnis für die breite Markteinführung von Elektrofahrzeugen. Beide gehen auch auf die Batterie zurück und sind miteinander gekoppelt (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). So liegen die Batteriekosten heute noch bei etwa 600 € pro kWh, 250 € pro kWh gelten als Kostenziel ([Trommer et al. 2010]). Die batteriebedingten Zusatzkosten gegenüber konventionellen Fahrzeugen könnten damit für eine 24 kWh Batterie von heute über 14.000 € auf zukünftig 6.000 € sinken.

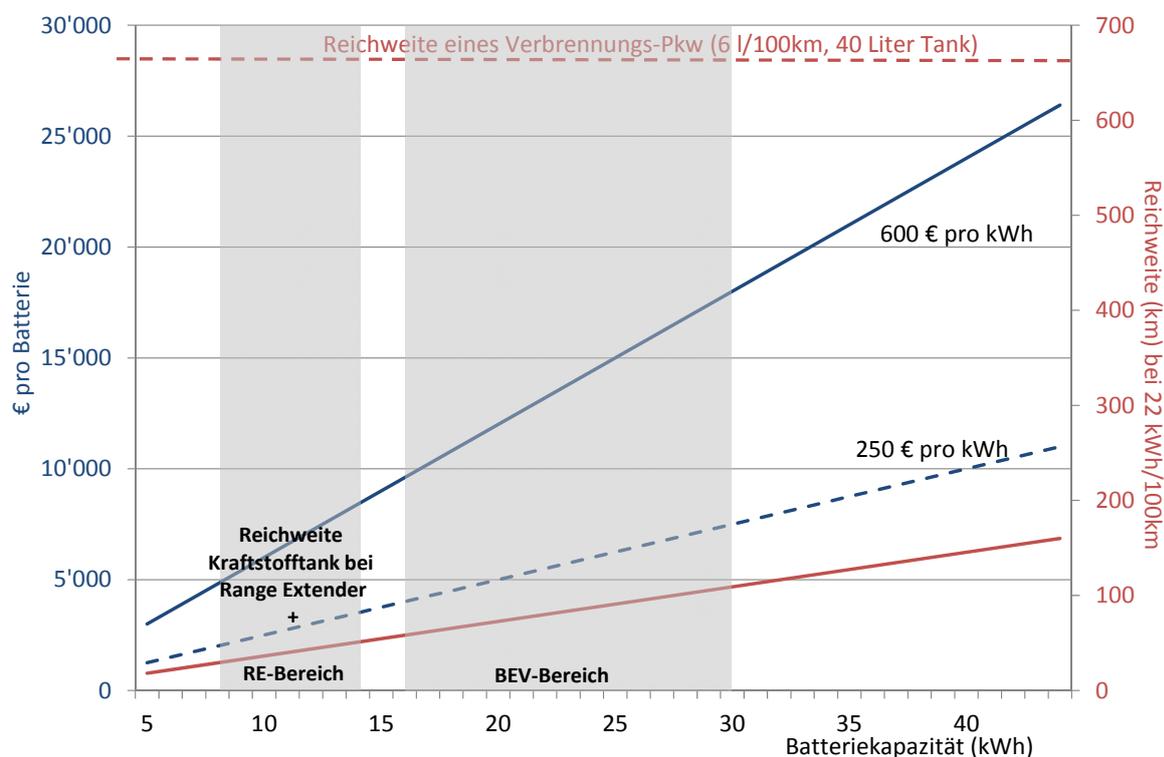


Abbildung 68: Batteriekosten und Fahrzeugreichweite nach Batteriekapazität

Wirtschaftsverkehr als Leuchtturm

Grundsätzlich weist das Elektrofahrzeug – wie oben bereits erwähnt – heute niedrigere Betriebskosten als das konventionelle Fahrzeug auf. Wegen der hohen Anschaffungskosten ist für deren Ausgleich auch bei zukünftig deutlich niedrigeren Batteriekosten eine hohe Fahrleistung erforderlich.

So wird „... ein positiver Kapitalwert nur bei bestimmten Nutzergruppen erreicht, die eine Jahresfahrleistung von 12.500 bis 20.000 km bei regelmäßiger Fahrzeugnutzung von etwa 90 km pro Tag erfüllen“ ([Mattes et al. 2011]). Solche Fahrleistungen können vor allem im Wirtschaftsverkehr erbracht werden. Daher wurden solche Konzepte im Förderschwerpunkt durch die Projekte EMIL und EMKEP entwickelt. In diesem Projekt wurden z.B. 46 Fahrzeuge im Großraum Berlin in der Praxis getestet.

Der Wirtschaftsverkehr geht bei intensiver Nutzung (200.000 km Lebenslaufleistung) mit einer vergleichsweise günstigen Klimabilanz einher: Dann liegen die Treibhausgasemissionen eines städtischen Lieferwagens bei Nutzung des heute durchschnittlichen deutschen Strommixes bereits um etwa 13 % unter denen des dieselbetriebenen Lieferwagens. Weiterer Vorteil des Wirtschaftsverkehrs ist die Möglichkeit, in einer gemischten Fahrzeugflotte mit zentraler Tourenplanung Fahrstrecken auf die Fahrzeugreichweiten anpassen zu können. Da diese Fahrzeuge im öffentlichen Raum häufig präsent sind, ermöglichen sie eine hohe Aufmerksamkeit und werden als Leuchttürme der Elektromobilität wahrgenommen.

Mischkonzepte als Brücke

Werden größere Reichweiten benötigt, steigen bei reinen Elektrofahrzeugen die Batteriekosten sowie das Gewicht des Fahrzeugs und damit auch der spezifische Energieverbrauch. Aus heutiger Sicht sollte zunächst der Kostenbegrenzung der Vorrang gegeben werden. Zukünftig sind jedoch auch Reichweiten vorstellbar, die auch deutlich über 100 km hinausgehen. Diese bleiben dann aber immer noch deutlich hinter konventionellen sowie Brennstoffzellen-Fahrzeugen zurück.

Pkw mit Range-Extender oder Plug-In Hybrid-Pkw stellen eine wichtige Brückentechnologie dar. Marktpotenzialanalysen (z.B. [Trommer et al. 2010]) sehen in der Markteintrittsphase zunächst einen deutlich größeren Anteil an Plug-In Hybriden, der erst ab 2020 von einem relevanten Anteil an rein batterieelektrischen Fahrzeugen ergänzt wird. Diese werden insbesondere als Kleinwagen im städtischen Pendler- und Kurzstreckenverkehr an Bedeutung gewinnen. Zusätzliche Batteriekosten und Reichweitenüberlegungen werden als Gründe für diese vermutete Entwicklung gesehen.

Aus Umweltsicht zeigen schon Fahrzeuge mit Range Extender oder Plug-In Hybride große Potenziale zur Minderung der Treibhausgasemissionen. Sie führen – insbesondere bei Einsatz von zusätzlichem erneuerbarem Strom und einem hohen Anteil rein elektrischen Betriebs – schon heute zu einer Verbesserung der Treibhausgasbilanz. Durch eine optimale Abstimmung des elektrischen und verbrennungsmotorischen Betriebs, wie es z.B. im REX-Projekt angestrebt wird, können noch weitere Potenziale erschlossen werden.

Diese Mischkonzepte stehen in direkter Konkurrenz zum Brennstoffzellenfahrzeug. Durch die ausreichenden Reichweiten der Mischkonzepte könnte es seltener nötig sein, reine Brennstoffzellenfahrzeuge im Individualverkehr einzusetzen. Perspektiven ergeben sich für Brennstoffzellenfahrzeuge jedoch durch Nutzung von Wasserstoff, der aus Überschussstrom produziert wird. Langfristig muss die Frage nach den optimalen Einsatzgebieten der verschiedenen Konzepte noch gelöst werden. Hierfür ist eine adaptive Strategie

gie notwendig, die die nächsten Jahre noch keine Festlegung auf ein Konzept notwendig macht.

Offenen Fragen nachgehen!

Die Nutzung von Elektromobilität wird zweifelsohne sehr schnell zunehmen –die genauen Entwicklungslinien sind aber noch nicht abzusehen. Die UMBReLA-Analysen und Auswertungen bieten eine umfassende Umweltbewertung von Elektromobilität über den gesamten Lebensweg. Darüber hinaus sind diese Erkenntnisse für eine große Breite an Fahrzeugen, Nutzungen und Szenarien verfügbar. Die Ergebnisse des ökobilanziellen Vergleichs verschiedener Antriebsstränge können zukünftig mit entsprechenden Anpassungen auf alle Arten von batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeugen übertragen werden.

Die Umweltbewertung lässt dabei aber auch wichtige Umweltfragen und heutige Erkenntnislücken erkennen, denen in Zukunft nachgegangen werden sollte, z.B.:

- Wie werden sich Lebensdauer und Energiedichte von Batterien entwickeln?
- Welche Materialien werden in Batterien und Fahrzeugen eingesetzt, wie ist ihre Verfügbarkeit und welche Möglichkeiten des Recycling gibt es?
- Welche Fahrzeugkonzepte werden zukünftig wo und wie eingesetzt und wie ist die Wechselwirkung mit dem Energiesektor?
- Wie stellen sich die Umweltbilanzen der Elektromobilität unter anderen Rahmenbedingungen (z.B. in Schwellenländern) dar?
- Welchen Beitrag kann Elektromobilität zu neuen, zukünftigen Mobilitätsstrukturen leisten?

10 Literaturverzeichnis

- [ADAC 2011] Elektroautos: Bestandsaufnahme/Kenndaten. ADAC e.V. Fahrzeugtechnik. Online Dokument (Zugriff am 4.10.2011): http://www.adac.de/mm/pdf/ElektroautosBestandsaufnahmeKenndaten_46583.pdf.
- [AGEB 2011a] Energy Balance for the Federal Republic of Germany 2009. AG Energiebilanzen e.V. Berlin 2011.
- [AGEB 2011b] Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2010 nach Energieträgern. AG Energiebilanzen e.V. Berlin 2011b.
- [Alcan 2004] Buxmann, K.: Email vom 27.4.2004.
- [Ball et al. 2009] Ball, M., W. Weindorf und U. Bünger: Hydrogen production. In: Ball, M. und Wiet-schel, M. (Hrsg.): The Hydrogen Economy. Opportunities and Challenges. New York 2009.
- [Bauer 2010] Bauer, C.: Ökobilanz von Lithium-Ionen Batterien. Analyse der Herstellung von Energiespeichern für den Einsatz in Batteriefahrzeugen. Eine Studie im Auftrag der Volkswagen AG. Paul Scherrer Institut, Technology Assessment. Villigen (CH) 2010.
- [Beermann et al. 2010] Beermann, M., G. Jungmeier, A. Wenzel, J. Spitzer, L. Canella, A. Engel, M. Schmuck und S. Koller: Quo vadis Elektroauto? Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich. TU Graz, Johanneum Research. Graz 2010.
- [Beidl 2010] Beidl, C.: Wege zum 50g CO₂-Fahrzeug. ÖVK Vortrag am 28.1. 2010 in Steyr.
- [BMW 2010a] Abschlussbericht ‚Klimaentlastung durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Zusammenwirken mit emissionsfreien Elektrofahrzeugen - MINI E 1.0 ‘. BMW AG. München 2010.
- [BMW 2010b] Ergebnisse MINI E Berlin powered by Vattenfall 1.0. Präsentation zum Projekt Mini E 1.0 per Email. BMW AG. München 2010.
- [Böcker 2007] Böcker, J.: Antriebe für umweltfreundliche Fahrzeuge. Skript zur Vorlesung an der Universität Paderborn. Paderborn 2007.
- [Brunner 2011] Brunner, T.: BMW efficient dynamics hydrogen – prospects and challenges. Präsentation im Rahmen des 11. f-cell-Forums für Produzenten und Anwender am 26./27.9.2011 in Stuttgart.
- [Bundesregierung 2009] Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin 2009.
- [Bundesregierung 2010] Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin 2010.
- [CARB 2007] Kalhammer, F. R., B. M. Kopf, D. H. Swan, V. P. Roan und M. P. Walsh: Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology. Report of the ARB Independent Expert Panel 2007.
- [Carpetsis 2000] Capetis, C.: Globale Umweltvorteile bei Nutzung von Elektroantrieben mit Brennstoffzellen und/oder Batterien im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotor. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und Institut für Technische Thermodynamik. Stuttgart 2000.

- [Concawe 2006] Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Tank-to-Wheels Report (Version 2b). Concawe, European Council for Automotive R&D (EUCAR) und European Commission Directorate General, Joint Research Center (JRC). Ispra 2007.
- [Concawe 2007] Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Well-to-Wheels Report. Concawe, European Council for Automotive R&D (EUCAR) und European Commission Directorate General, Joint Research Center (JRC). Ispra 2007.
- [Craig & Mann 1996] Craig, K. R und M. K. Mann: Cost and Performance Analysis of Biomass-Based Integrated Gasification Combined-Cycle (BIGCC) Power Systems. National Renewable Energy Laboratory. Colorado 1996.
- [Daimler 2008] Umwelt-Zertifikat A-Klasse. Daimler AG. Stuttgart 2008.
- [Daimler 2009] Umwelt-Zertifikat für die E-Klasse. Daimler AG. Stuttgart 2009.
- [Daimler 2011a] Schindler, T.: Daten zum Projekt EMKEP per Email. Daimler AG. Stuttgart 2011.
- [Daimler 2011b] Nizzola, C.: Daten zum Projekt REX per Email. Daimler AG. Stuttgart 2011.
- [Daimler 2011c] Baier, K.: Daten zum Projekt Conductic per Email. Daimler AG. Stuttgart 2011.
- [Dallinger 2010] Dallinger, D.: Variable tariffs for demand response with grid-connected electric vehicles and their contribution to integrate intermittent renewable generation. Paper zur '2nd European conference smartGrids & e-mobility'. Otti 2010.
- [DOE 2003] Gasification Plant Cost and Performance Optimization. Bechtel Corporation Global Energy Inc. und Nexant Inc. im Auftrag des U.S. Department of Energy (DOE), National Energy Technology Laboratory (NETL). Washington D.C. 2003.
- [Ecofys 2011] Bömer, J., Burges, K. und C. Nabe: Abschätzung der Bedeutung des Einspeisemanagements nach EEG 2009. Auswirkungen auf die Windenergieerzeugung im Jahr 2009. Ecofys. Kurzstudie im Auftrag des Bundesverband Windenergie e.V. (BWE). Köln 2011.
- [Ecoinvent 2008] Ecoinvent Database Version 2.2. Ecoinvent Centre. Zürich 2008.
- [Eden et al. 1997] Eden, T.-U., C. Heber, U. Höpfner und C. Voy: Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 99/9. Wiesbaden 1997.
- [Eichlseder & Klell 2010] Eichlseder, H. und M. Klell: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Wiesbaden 2010.
- [EMPA 2001] Nachführung der Emissionsgrundlagen Strassenverkehr – Ergänzung der Messdaten auf das Bezugsjahr 2000. Teilbericht: Einfluss elektrischer Verbraucher auf die Emissionen. Im Auftrag des BUWAL. Dübendorf 2001.
- [Engel 2007] Engel, T.: Plug-in Hybrids – Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Pkw-Verkehr bei verstärkter Nutzung von elektrischen Antrieben im Zusammenhang mit Plug-in Hybrid Fahrzeugen (Interne Vorabversion). Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) e.V.. Berlin 2007.
- [EU 2003] 2003/30/EC
- [EU 2009a] Verordnung Nr. 443/2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Europäische Union. Brüssel 2009.

- [EU 2009b] Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Europäische Union. Brüssel 2009.
- [Fabis 2006] Fabis, R. M.: Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen. Dissertation an Fakultät IV Elektrotechnik und Informatik der TU Berlin. Berlin 2006.
- [Fiaschi & Lombardi 2002] Fiaschi, D. und L. Lombardi: IGCC Plant with Integrated CO₂ - H₂S Removal: Performance Analysis, Life Cycle Assessment and Exergetic Life Cycle Assessment. In: International Journal of Applied Thermodynamics, Vol.5 (2002). Blacksburg, VA 2002.
- [Finkenwirth 1999] Finkenwirth, O.: Ganzheitliche Bilanzierung innovativer Verfahren der Wasserstoffbereitstellung. Studienarbeit. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER). Stuttgart 1999.
- [Franzen 2011] Franzen, J.: Potential of a metal hydride based hydrogen storage system. Präsentation im Rahmen des 11. f-cell-Forums für Produzenten und Anwender am 26./27.9.2011 in Stuttgart.
- [Friedrich 2010] Friedrich, K. A.: Das Potenzial neuer Li-Batteriesysteme (Li-S, Li-Luft): Eine kritische Bewertung. Präsentation im Rahmen des Workshops "Elektrochemische Energiespeicher und Elektromobilität" des Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) am 19./20.1.2010 in Ulm.
- [FZ Jülich 1994] Programmgruppe Technologieforschung. Bericht zum Teilprojekt 3. „Primärenergie“ des Forschungsvorhabens „Instrumente für Klimagas- Reduktionsstrategien (IKARUS)“ (FKZ BMFT ET 9188A).
- [Garcke et al. 2008] Garcke, J., M. Wohlfahrt-Mehrens und W. Tillmetz: Forschung und Entwicklung für die nächste Generation von Lithium-Batterien. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW). Präsentation auf dem BMU-Workshop „Elektromobilität und Plug-In Hybride: Stand der Batterieentwicklung und Potenziale“ am 30.6.2008 in Berlin.
- [GermanHy 2009] Studie zur Frage „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?“. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Berlin 2009.
- [Götze 2005] Götze, T.: Das Parallelstranggetriebe – ein modifiziertes Doppelkupplungsgetriebe mit 25 schaltbaren Freiläufen und E-Maschine(n) als Mild-Hybrid. In: Forschungsbericht der Fachhochschule Brandenburg 2003 – 2004. Brandenburg 2005.
- [Grube et al. 2010] Grube, T., B. Höhle, C. Stiller und W. Weindorf: Systems Analysis and Well-to-Wheel Studies. In: Stolten, D. (Hrsg.): Hydrogen and Fuel Cells. Fundamentals, Technologies and Applications. Weinheim. 2010.
- [Guttenberg 2004] Guttenberg, P.: Der Autarke Hybrid am Prüfstand – Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse. Dissertation, Technische Universität München.
- [Hausberger 2010] Hausberger, S.: Daten per Email am 13.9.2010. Technische Universität Graz. Graz 2010.
- [Hedden & Jess 1994] Hedden, K. und Jess, A.: Bereich Raffinerien und Ölveredelung. Bericht zum Teilprojekt 4 „Umwandlungssektor“ des Forschungsvorhabens „Instrumente für Klimagas- Reduktionsstrategien (IKARUS)“ (FKZ BMFT ET 9188A).
- [Henkel 2006] Henkel, J.: Life Cycle Assessment of Carbon Dioxide Capture and Storage. Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU). Berlin 2006.

- [Henkel & Pehnt 2009] Henkel, M. und M. Pehnt: Life Cycle Assessment of Carbon Dioxide Capture and Storage from Lignite Power Plants. In: International Journal of Greenhouse Gas Control. 3 (2009). Amsterdam 2009.
- [Hobein & Krüger 2010] Hobein, B. und R. Krüger: Physical Hydrogen Storage Technologies – a Current Overview. In: Stolten, D. (Hrsg.): Hydrogen and Fuel Cells. Fundamentals, Technologies and Applications. Weinheim 2010.
- [Hua et al. 2010] Hua, T. Q., R.K. Ahluwalia, J.-K. Peng, M. Kromer, S. Lasher, K. McKenney, K. Law und J. Sinha: Technical assessment of compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications. In: International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36. Amsterdam 2010.
- [HyWays 2008] Member States' Report. Vision on the Introduction of Hydrogen in the European Energy System. Brüssel 2008.
- [IEA 2005] Gielen, D. und G. Simbolotti: Prospects for hydrogen and fuel cells. International Energy Agency (IEA). Paris 2005.
- [IEA 2010] World Energy Outlook 2010. International Energy Agency. Paris 2010.
- [ifak 2011] Hoppe, A.: Daten zum Projekt JustPark per Email. Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg 2011.
- [IFEU 2009] Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 - 2030; Erstellung der Software TREMOD - Transport Emission Model im Auftrag des UBA (FZK 204 45 139); ab 1993 mit verschiedenen Aktualisierungen und Erweiterungen; dazu Kooperationsabkommen mit VDA Frankfurt; MWV Hamburg; Deutsche Bahn AG, Deutsche Lufthansa, TUI; mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) u. a.
- [IFEU 2010] Helms, H. und J. Hanusch: Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen - Grundlegenden Daten und Ergebnisse. Internes Arbeitspapier von Arbeiten im Rahmen der ökologischen Begleitforschung zum „VW Flottenversuch Elektromobilität“. Heidelberg 2010.
- [IFEU 2011] Sybille, K. und H. Fehrenbach: Erweiterung der Treibhausgas-Bilanzen ausgewählter Biokraftstoffpfade. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) im Auftrag der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) und dem Umweltbundesamt (UBA). Vorläufige unveröffentlichte Ergebnisse.
- [IIASA 2005] Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe (CAFE) Programme. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) im Auftrag der DG Environment. Laxenburg 2005.
- [ika 2003] Wallentowitz, H., K.-H. von Zengen, T. Parr, R. Wohlecker und D. Wynards: Leichtbaupotenzial eines aluminiumintensiven Fahrzeugs. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ). 3/2003 Jahrgang 105. Wiesbaden 2003.
- [INFRAS 2010] Handbook emission factors for road transport (HBEFA) Version 3.1. Infrac. Bern 2010.
- [IPCC 2007] Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf 2007.
- [ITP 2007] Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025. Intraplan Consult. München/Freiburg 2007.
- [KBA 2011a] Statistik ‚Neuzulassungen und Besitzumschreibungen von Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen - Jahr 2010‘. Kraftfahrtbundesamt. Flensburg 2011.

- [KBA 2011b] Fachartikel: Fahrzeugalter. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg 2011.
- [KBA 2011c] Statistik ‚Bestand an Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen – 1. Januar 2011‘. Kraftfahrtbundesamt. Flensburg 2011.
- [Klöpffer & Grahl 2009] Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim 2009.
- [Köhler 2011] Köhler, U.: Die Lithium-Ionen-Batterie. Ein modernes Energiespeichersystem für die Elektromobilität. Aktuelle Lösungen und Herausforderungen. Johnson Controls-Saft. Präsentation auf der MobiliTec Hannover 2011.
- [LBST 2003] Altmann, M., H. Landinger, W. Weindorf, R. Wurster und M. Zerta: H2-Roadmap. AP1 „Prinzipielle Anforderungen an die Infrastruktur“. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST) GmbH im Auftrag des Deutschen Wasserstoff Verbandes (DWV). Berlin 2003.
- [Leohold 2008] Leohold, J.: Präsentation auf der Nationalen Strategiekonferenz Elektromobilität am 25./26.11.2008 in Berlin.
- [Link et al. 2010] Link, J., M. Büttner, D. Dallinger und J. Richter: Optimisation algorithms for the charge dispatch of plug-in vehicles based on variable tariffs. Working paper sustainability and innovation No. S3/2010. Fraunhofer ISE und ISI. Karlsruhe 2010.
- [Maier & Vetter 2009] Maier, J. und R. Vetter: Erträge und Zusammensetzung von Kurzumtriebs-Gehölzen (Weide, Pappel, Blauglockenbaum). Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung. Müllheim 2009.
- [Mazza & Hammerschlag 2005] Mazza, P. und R. Hammerschlag: Wind-to-Wheel Energy Assessment. Institute for Lifecycle Environmental Assessment (ILEA). Seattle 2005.
- [McLennan 2011] McLennan, W.: Europe moves to ban imports of tar sands oil from Canada. Online-Artikel: http://www.theecologist.org/News/news_analysis/829665/europe_moves_to_ban_imports_of_tar_sands_oil_from_canada.html
- [MIT 2000] Weiss, M. A., J. B. Heywood, E. M. Drake, A. Schafer und F. F. AuYeung: On the road in 2020. A life-cycle analysis of new automobile technologies. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Energy Laboratory. Cambridge, Massachusetts 2000.
- [MWV 2001] Mineralöl-Zahlen 2001. Mineralölwirtschaftsverband e.V. Hamburg 2002.
- [Notter 2010] Notter, D. A., M. Gauch, R. Widmer, P. Wäger, A. Stamp, R. Zah und H.-J. Althaus: Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles (Supporting Information). In: Environmental Science & Technology. Vol. 44 (2010). Washington D.C. 2010.
- [NRW 2009] Wasserstoff – Schlüssel zu weltweit nachhaltiger Energiewirtschaft. Beispiele aus NRW von der Produktion zur Anwendung. EnergieRegion.NRW. Düsseldorf. 2009.
- [Öko Institut 2009] Renewbility - Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030 - Teil 1: Methodik und Datenbasis. Öko-Institut e.V. Berlin 2009.
- [Pehnt 2002] Pehnt, M.: Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik. VDI-Forschungsbericht Energietechnik Nr. 476. Düsseldorf 2002.
- [Pehnt et al. 2011] Pehnt, M., H. Helms, U. Lambrecht, D. Dallinger, M. Wietschel, H. Heinrichs, R. Kohrs, J. Link, S. Trommer, T. Pollok und P. Behrens: Elektroautos in einer von erneuerbaren Energien geprägten Energiewirtschaft. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft. Vol. 35 (2011). Wiesbaden 2011.

- [Peterson et al. 2010] Peterson, S. B., J. Apta und J. F. Whitacrea: Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization. In: Journal of Power Sources Vol. 195. Amsterdam 2010.
- [Raskin & Shah 2006] Raskin, A. und S. Shah: The emergence of hybrid vehicles. Alliance Bernstein. New York 2006.
- [Roscher et al. 2011] Roscher, M. A., J. Assfalg und O. S. Bohlen: Detection of Utilizable Capacity Deterioration in Battery Systems. In: IEEE Transactions on vehicular technology. Vol. 60. Waterloo, Canada 2011.
- [Rosen 2008] Rosen, J.: The future role of renewable energy sources in European electricity supply - a model-based analysis for the EU-15. Dissertation. Karlsruhe 2008.
- [Ruf 2011] Vaillant, M.: Daten zum Projekt EMOTION per Email. RUF Automobile GmbH. Pfaffenhausen 2011.
- [Samaras 2008] Samaras, C. und K. Meisterling: Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. In: Environmental Science & Technology. Vol. 42 (2008). Washington D.C. 2008.
- [Schimpf 2010] Schimpf, H.: Ökobilanzierung neuer fossiler Kraftstoffpfade aus Ölsand- und Kohlevorkommen. Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU). Tübingen 2010.
- [Schraven et al. 2010] Schraven, S., F. Kley und M. Wietschel: Induktives Laden von Elektromobilen - Eine techno-ökonomische Bewertung. Working paper sustainability and innovation No. S8/2010. Fraunhofer ISI. Karlsruhe 2010.
- [Sensfuss 2008] Sensfuss, F.: Assessment of the impact of renewable electricity generation on the German electricity sector. An agent-based simulation approach. VDI Fortschritt-Berichte Band 16, Nr 188. Düsseldorf 2008.
- [Stolten & Krieg 2010] Stolten, D. und D. Krieg: Alkaline Elektrolysis – Introduction and Overview. In: Stolten, D. (Hrsg.): Hydrogen and Fuel Cells. Fundamentals, Technologies and Applications. Weinheim 2010.
- [Stolten et al. 2002] Stolten, D., P. Biedermann, L. de Haart, B. Höhle und R. Peters: Brennstoffzellen. In: Rebhan, E. (Hrsg.): Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie. Berlin Heidelberg 2002.
- [Stubinitzky 2009] Stubinitzky, A.: Ökoeffizienzanalyse technischer Pfade für die regenerative Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff. VDI Fortschritt-Berichte Reihe 6, Nr. 588. Düsseldorf 2009.
- [Trommer et al. 2010] S. Trommer, A. Kihm, P. Hebes und M. Mehlin: Policy driven demand for sales of plug-in hybrid electric vehicles and battery-electric vehicles in Germany. Paper zur 'European Transport Conference'. Glasgow 2010.
- [TU Chemnitz 2010] Schlussbericht zum Forschungsvorhaben ‚Klimaentlastung durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Zusammenwirken mit emissionsfreien Elektrofahrzeugen - MINI E 1.0; Teilprojekt: MINIEVatt Berlin - Freude am umweltgerechten Fahren‘. Chemnitz 2010.
- [TUG 2009] Hausberger, S., M. Rexeis, M. Zallinger und R. Luz: Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3. Graz 2009.
- [UBA 1999] Emissionsbilanz Pkw über den gesamten Lebensweg. Universität Stuttgart, Institut für Energie und Umweltforschung (IFEU) und PE International. Stuttgart 1999.

- [UBA 2004] Fehrenbach, H., J. Giegrich und D. Neuhoff: Auswirkungen der neuen Kraft- und Brennstoffqualitäten auf die Abwasser- und Abgasreinigungstechniken der Mineralö Raffinerien. Institut für Energie und Umweltforschung (IFEU). Berlin 2004.
- [UBA 2006] Ramesoh, S., M. Fishedick, K. Arnold, F. Merten, J. Nitsch, S. Schmid, P. Viebahn, M. Pehnt, W. Knörr, S. Gärtner und G. Reinhardt: Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Kraftstoff für den mobilen Bereich. Wuppertal Institut, DLR Stuttgart und IFEU Heidelberg im Auftrag des Umweltbundesamtes (FKZ 203 45 118). Dessau 2006.
- [UBA 2010] Emissionsberichterstattung der Bundesrepublik Deutschland 2010. Umweltbundesamt. Dessau 2010.
- [VCD 2011] VCD Auto-Umweltliste: 385 Autos im Umweltcheck. Verkehrsclub Deutschland e.V. Berlin 2011.
- [VDI 1997] VDI Richtlinie 4600: Kumulierter Energieaufwand. Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Düsseldorf 1997.
- [VDI 2011] Zukunftsweisende Förderung von Forschung und Entwicklung für Elektromobilität. Internetseite des VDI-VDE-IT zu den Förderprogrammen des BMU im Bereich Elektromobilität: <http://www.pt-elektromobilitaet.de/>.
- [VW 2008] Der Golf. Umweltprädi kat - Hintergrundbericht. Volkswagen AG. Wolfsburg 2008.
- [VW 2010a] Boßdorf-Zimmer, B.: Daten per Email. Volkswagen AG. Wolfsburg 2010.
- [VW 2010b] Der neue Transporter. Umweltprädi kat - Hintergrundbericht. Volkswagen AG. Wolfsburg 2010.
- [VW 2011] Siebeneich, A.: Daten zum Projekt EMIL per Email. Volkswagen AG. Wolfsburg 2011.
- [Wallentowitz 2006] Wallentowitz, H. und K. Reif (Hrsg.): Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Wiesbaden 2006.
- [Wietschel & Bünger 2010] Wietschel, M. und U. Bünger: Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger. Fraunhofer ISI und Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST) GmbH. Studie im Auftrag der RWE AG. Karlsruhe 2010.
- [WWF 2008] Kendall, G.: Plugged in – the end of the oil age. World Wide Fund for Nature (WWF). Brüssel 2008.
- [Zallinger & Hausberger 2009] Zallinger, M. und S. Hausberger: Measurement of CO₂- and fuel consumption from cars in the NEDC and in real-world-driving cycles. Technische Universität Graz im Auftrag des Österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW). Graz 2009.
- [Zhan & Wang 2009] Zhang, Y. und C.-Y. Wang: Cycle-Life Characterization of Automotive Lithium-Ion Batteries with LiNiO₂ Cathode. In: Journal of The Electrochemical Society, Vol. 156 (7). Pennington, New Jersey 2009.
- [ZSW 2007] Garche, J.: Präsentation auf dem BMU-Workshop ‚Elektromobilität – Antriebs-technologie‘ am 19.10.2007. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW). Berlin 2007.

11 Anlagen

11.1 Online-Tool

Begleitend zur ökologischen Begleitforschung im Rahmen des UMBReLA-Projekts wurde eine Internetseite¹⁴ aufgebaut, die in kompakter und übersichtlicher Form wesentliche Ergebnisse des Projekts darstellt. Um dem Besucher die für ihn relevanten Ergebnisse anschaulich darzustellen, enthält die Website auch ein interaktives Online-Tool. Dieses soll dem Besucher einen Vergleich ermöglichen, welche Umweltwirkungen sein Nutzungsprofil bei den verschiedenen Antriebstechnologien verursachen würde. Es ist wie folgt aufgebaut:

1. Eingabe des persönliche Fahrprofils durch den Nutzer
 - a. Jahresfahrleistung
 - b. maximale Länge einer Strecke (Reichweite)
 - c. Aufteilung der Fahrten auf die verschiedenen Straßenkategorien
2. Charakterisierung des Referenzfahrzeugs durch den Nutzer
 - a. Fahrzeuggröße
 - b. Fahrzeugtyp (Otto, Diesel)
 - c. Emissionsstufe
 - d. Kraftstoffverbrauch
3. Vergleichende Darstellung der Umweltbilanz beim angegebenen Nutzungsprofil für
 - a. das Referenzfahrzeug
 - b. einen Neuwagen des gleichen Typs
 - c. ein batterieelektrisches Fahrzeug (bei einer Reichweite von < 150 km)
 - d. ein Range-Extender-Fahrzeug (bei einer Reichweite von > 150 km)

Die Ergebnisse werden in den gleichen Kategorien dargestellt, die auch in diesem Bericht betrachtet werden (Klimawirkung, Kumulierter Energieaufwand, Versauerungspotential, Feinstaub, Sommersmog, Terrestrische Eutrophierung). Um dem Nutzer eine Einordnung der dargestellten Umweltwirkungen zu ermöglichen, sind entsprechende erklärende Texte eingefügt. Da die Ergebnisse nach den Stationen des Fahrzeuglebenswegs (Herstellung, Nutzung etc.) differenziert werden, lässt sich schnell sehen, welche dieser Stationen für die verschiedenen Antriebskonzepte besonders relevant sind.

Das Tool stützt sich auf die in diesem Bericht beschriebenen Datengrundlagen, einige Aspekte mussten jedoch im Sinne der Bedienbarkeit vereinfacht werden:

- Es wird ausschließlich die aktuelle Situation dargestellt, keine Zukunftsszenarien
- Es werden keine Brennstoffzellenfahrzeuge dargestellt
- Spezielle Ladetechnologien (wie das kabellose Laden) werden nicht berücksichtigt

¹⁴ <http://www.emobil-umwelt.de>

11.2 Tabellen

Tabelle 39: Überblick besuchte und ausgewertete Elektromobilitätsprojekte

Projektname	Besucht am	Projektschwerpunkt
Pkw-Feldversuche:		
BMW ActiveE	6.5.2010	Fahrzeugkonzept zugeschnitten auf Elektromobilität
Mini E 1.0		Alltagstauglichkeit und Kundenakzeptanz von Elektromobilität
EMOTION	19.5.2010	Entwicklung E-Fahrzeug der Oberklasse
REX	26.8.2010 & 18.7.2011	Entwicklung Fahrzeugkonzept mit Range Extender
LDE-M	11.10.2010	Erhöhung der Leistungsdichte und Effizienz von E-Maschinen
Kontaktloses Laden:		
W-Charge	kein Besuch	
Conductix	26.8.2010	Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen
Just Park	kein Besuch	
Wirtschaftsverkehr:		
B-AGV	29.9.2010 & 15.6.2011	Batteriebetrieben Schwerlastfahrzeuge
EMKEP	26.8.2010	Elektrifizierung eines Kleintransporters
Emil	kein Besuch	Entwicklung eines Radnabenmotor basierten Hybridsystems
Batterierecycling:		
LithoRec	17.5.2010	Recycling von Lithium-Ionen-Batterien
LiBRi	21.6.2010	

IFEU 2011

Tabelle 40: Bauteil- und Werkstoffgewichte für den Fahrzeugrumpf des mittleren Pkw

Bauteil	Gewicht	Materialien
Karosserie	280kg	Flachstahl (Szenarien Aluminium) u.a.
Fahrwerk	160kg	Flachstahl u.a.
Türen	100kg	Flachstahl u.a.
Glasscheiben	43kg	Verbundsicherheitsglas u.a.
Stoßfänger	20kg	Polypropylen
Reifen	79kg	Flachstahl, Gummi (EPDM)
Innenraum/Sonstiges	240kg	Flachstahl, Alublech, Polyester, Prozesspoly-mere u.a.
Batterie (Bordnetz)	15kg	Blei, Polypropylen, Schwefelsäure

IFEU 2011

Tabelle 41: Durchschnittliche Tank-to-Wheel-Wirkungsgrade von Euro-5-Pkw

Verkehrssituation	Otto (Euro-5)	Diesel (Euro-5)
RUR/Distr/80/Freeflow	23,0%	26,4%
RUR/Distr/80/Heavy	21,7%	24,2%
RUR/Distr-sin./80/Heavy	21,1%	24,1%
RUR/Local/80/Freeflow	23,1%	26,3%
RUR/Local/80/Heavy	24,6%	27,9%
RUR/Local-sin./80/Heavy	20,9%	25,1%
RUR/MW/100/Freeflow	26,9%	28,6%
RUR/MW/100/Satur.	23,4%	27,1%
RUR/MW/100/St+Go	16,1%	19,3%
RUR/MW/120/Freeflow	27,5%	32,8%
RUR/MW/120/Satur.	23,4%	27,1%
RUR/MW/130/Freeflow	28,2%	33,5%
RUR/MW/130/Satur.	23,4%	27,1%
RUR/MW/80/Freeflow	21,6%	26,5%
RUR/MW/80/Satur.	23,4%	27,7%
RUR/Trunk/100/Freeflow	25,9%	28,5%
RUR/Trunk/100/Heavy	25,5%	29,2%
RUR/Trunk/110/Freeflow	27,1%	31,7%
RUR/Trunk/80/Heavy	22,8%	26,0%
URB/Access/50/Heavy	20,4%	23,3%
URB/Access/50/Satur.	15,8%	18,5%
URB/Distr/50/Freeflow	19,0%	22,3%
URB/Distr/50/Heavy	20,4%	23,3%
URB/Distr/50/Satur.	20,1%	23,8%
URB/Distr/50/St+Go	12,0%	14,0%
URB/Distr/70/Freeflow	22,5%	25,8%
URB/Distr/70/Heavy	21,2%	24,5%
URB/Distr/70/Satur.	18,1%	21,0%
HBEFA Innerortsstraßen	19,7%	24,1%
HBEFA Außerortsstraßen	24,4%	28,5%
HBEFA Autobahn	27,3%	33,0%
Quelle: [Hausberger 2010]		IFEU 2011

Tabelle 42: Energieverbrauch Elektrofahrzeuge 2010

		Antrieb	Nebenverbraucher
Klein	IO	15,0	2,6
	AO	17,0	1,1
	AB	21,1	0,8
	NEFZ	13,3	2,7
Mittel	IO	18,2	3,2
	AO	20,7	1,4
	AB	25,8	1,1
	NEFZ	16,2	3,4
Groß	IO	21,4	3,8
	AO	22,2	1,7
	AB	25,4	1,3
	NEFZ	19,9	4,1
LNF	IO	29,5	3,8
	AO	34,0	1,7
	AB	43,2	1,3
	NEFZ	26,5	4,1
Quelle: eLCAR		IFEU 2011	

Tabelle 43: Energieverbrauch Elektrofahrzeuge 2030 (Konservatives Szenario)

		Antrieb	Nebenverbraucher
Klein	IO	13,7	2,3
	AO	15,8	1,0
	AB	19,6	0,7
	NEFZ	12,1	2,4
Mittel	IO	16,6	2,9
	AO	19,2	1,2
	AB	24,0	0,9
	NEFZ	14,1	3,0
Groß	IO	20,5	3,4
	AO	23,6	1,5
	AB	29,1	1,1
	NEFZ	18,1	3,7
LNF	IO	26,9	3,4
	AO	31,7	1,5
	AB	40,2	1,1
	NEFZ	24,3	3,7
Quelle: eLCAR		IFEU 2011	

Tabelle 44: Energieverbrauch Elektrofahrzeuge 2030 (Moderates Szenario)

		Antrieb	Nebenverbraucher
Klein	IO	11,7	2,0
	AO	14,0	0,9
	AB	17,6	0,7
	NEFZ	10,5	2,1
Mittel	IO	14,2	2,5
	AO	17,1	1,1
	AB	21,7	0,8
	NEFZ	12,8	2,7
Groß	IO	17,6	3,0
	AO	21,1	1,3
	AB	26,3	1,0
	NEFZ	15,8	3,2
LNF	IO	23,4	3,0
	AO	28,6	1,3
	AB	36,7	1,0
	NEFZ	21,3	3,6
Quelle: eLCAR		IFEU 2011	

Tabelle 45: Energieverbrauch Elektrofahrzeuge 2030 (Innovatives Szenario)

		Antrieb	Nebenverbraucher
Klein	IO	9,8	1,7
	AO	11,6	0,8
	AB	15,2	0,6
	NEFZ	9,1	1,9
Mittel	IO	10,8	2,2
	AO	14,2	1,0
	AB	18,6	0,7
	NEFZ	10,1	2,3
Groß	IO	13,4	2,6
	AO	17,4	1,1
	AB	22,6	0,9
	NEFZ	12,4	2,8
LNF	IO	18,2	2,6
	AO	24,0	1,1
	AB	31,9	0,9
	NEFZ	18,9	2,8
Quelle: eLCAR		IFEU 2011	

11.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Überblick über den Lebensweg	6
Abbildung 2: Schematischer Überblick der Datengrundlagen und besuchten Projekte	11
Abbildung 3: Übersicht der bilanzierten Bauteilgruppen	12
Abbildung 4: Werkstoffanteile VW Golf und VW-Transporter nach [VW 2008] und [VW 2010b]	15
Abbildung 5: Treibhausgasemission der Herstellung konventioneller Pkw (2010)	18
Abbildung 6: Vergleich der Treibhausgasbilanz mit Herstellerbilanzen ([VW 2008], [VW 2010b], [Daimler 2008], [Daimler 2009])	18
Abbildung 7: Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung für verschiedene Fahrzeugtypen	19
Abbildung 8: Szenarien der Treibhausgasemissionen mittlerer Otto-Pkw	20
Abbildung 9: Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung (Pkw-Otto, mittel) in Szenarien für 2030	21
Abbildung 10: Anteile verschiedener Prozesse an der Batterieherstellung (2010)	24
Abbildung 11: Umweltbilanzen für die Batterieherstellung	25
Abbildung 12: Quellenvergleich für die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung	26
Abbildung 13: Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung nach Energiedichte	27
Abbildung 14: Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung nach Fahrleistung und Batterieanzahl	27
Abbildung 15: Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung nach Speicherkapazität	28
Abbildung 16: Treibhausgasemissionen der Herstellung von Elektrofahrzeugen 2010	30
Abbildung 17: Treibhausgasemissionen der Herstellung eines mittleren Elektro-Pkw	31
Abbildung 18: Umweltbilanzen der Herstellung eines Elektro-Pkw der Kompaktklasse	32
Abbildung 19: Treibhausgasemissionen der Herstellung eines mittleren Brennstoffzellen-Pkw	35
Abbildung 20: Umweltbilanzen der Herstellung eines mittleren Brennstoffzellen-Pkw	36
Abbildung 21: Fahrprofile NEFZ und CADC	38
Abbildung 22: Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs von Pkw Neuzulassungen nach TREMOD	41
Abbildung 23: Stickoxid- und Partikel-Grenzwerte verschiedener Fahrzeuggenerationen	42
Abbildung 24: Emissionsfaktoren (Innerorts) ausgewählter Schadstoffe nach HBEFA	42
Abbildung 25: Energiefluss verschiedener Antriebsstränge (Schematisch)	46
Abbildung 26: Energiemwandlung bei der Rekuperation	49
Abbildung 27: Kraftstoffverbrauch von Otto-Pkw 2010	51
Abbildung 28: Kraftstoffverbrauch von Diesel-Pkw 2010	51
Abbildung 29: Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen (Bezugsjahr 2010) (* Herstellerangaben)	52
Abbildung 30: Energieverbrauch mittlerer Elektro-Pkw in verschiedenen Szenarien (Bezugsjahr 2030)	53
Abbildung 31: Energieverbrauch von Range-Extender-Pkw im elektrischen Betrieb	54
Abbildung 32: Schema hybridischer Betriebsweisen	55
Abbildung 33: Verbrauchsmodellierung für einen mittleren Otto-RE-Pkw 2010	57

Abbildung 34: Energieverbrauch eines mittleren Elektro-Pkw in verschiedenen Fahrmustern.....	58
Abbildung 35: Energieverbrauch eines Elektro-Pkw mit Nebenverbrauchern.....	59
Abbildung 36: Verbrauch Mini E abhängig von der Außentemperatur (Quelle: [BMW 2010b])	59
Abbildung 37: Überblick Well-to-Wheel-Emissionen	60
Abbildung 38: Module des IFEU-Strommaster.....	61
Abbildung 39: Umweltwirkungen der Strombereitstellung durch verschiedene Kraftwerke (2010).....	63
Abbildung 40: Treibhausgasemissionen verschiedener Strombereitstellungsszenarien 2010 und 2030	66
Abbildung 41: Untersuchte Bereitstellungspfade für Wasserstoff	68
Abbildung 42: Treibhausgasemissionen der Wasserstoffbereitstellung 2030 (verschiedene Pfade).....	74
Abbildung 43: Umweltwirkungen der Wasserstoffbereitstellung (Transport mit Pipeline).....	75
Abbildung 44: Treibhausgasemissionen der Bereitstellung von Kraftstoffen (Deutschland 2010).....	78
Abbildung 45: Umweltwirkung der Kraftstoffbereitstellung im Jahr 2010	79
Abbildung 46: Treibhausgasemissionen Bereitstellung Kraftstoffe – 2010 und Szenarien 2030	81
Abbildung 47: Treibhausgasemissionen eines mittleren Pkw (2010) mit 150.000 km Lebenslaufleistung nach Antriebskonzept.....	83
Abbildung 48: Umweltwirkungen eines Kompaktklassen- Pkw (2010) mit 150.000km Lebenslaufleistung nach Antriebskonzept.....	85
Abbildung 49: Einwohnerdurchschnittswerte für den Lebensweg eines mittleren Pkw (2010) mit 150.000 km Lebenslaufleistung.....	86
Abbildung 50: Treibhausgasemissionen eines mittleren Pkw (2010) mit 150.000km Lebenslaufleistung nach Kraftwerkstypen und Kraftstoffe	88
Abbildung 51: Treibhausgasemissionen über den Lebensweg nach Fahrleistung für verschiedene Kraftwerkstypen.....	88
Abbildung 52: Umweltwirkungen eines mittleren Pkw (2010) mit 150.000km Lebenslaufleistung nach Kraftwerkstypen und Kraftstoffen	90
Abbildung 53: Klimabilanz von Pkw für verschiedene Nutzungsmuster (2010)	92
Abbildung 54: Klimabilanz mittlerer Pkw nach Fahrleistung für durchschnittliche und städtische Nutzung (2010).....	93
Abbildung 55: Nutzungsmuster 'Ausflug' und 'Urlaub' bei RE-Pkw.....	94
Abbildung 56: Fahrleistungsanteile der Fallbeispiele (RE-Pkw) nach Straßenkategorie und Antriebsart.....	95
Abbildung 57: Treibhausgasemissionen eines mittleren RE-Pkw im Vergleich zu Otto-, Diesel- und BEV-Pkw (2010)	96
Abbildung 58: Geschwindigkeitsverteilung Fahrzeuge EMKEP (Juni 2011) ([Daimler 2011a])	97
Abbildung 59: Zurückgelegte Fahrstrecken Fahrzeuge EMKEP (Juni 2011) (Daimler 2011a)).....	97
Abbildung 60: Klimabilanz leichter Nutzfahrzeuge (Stadt) für verschiedene Fahrleistungen (2010).....	98
Abbildung 61: Treibhausgasemissionen eines mittleren Otto-, Diesel- und BEV-Pkw in Szenarien (2030)	100
Abbildung 62: Umweltwirkungen eines mittleren Pkw in Szenarien (2030)	101
Abbildung 63: Klimabilanz eines mittleren Elektro-Pkw für verschiedene Betankungsstrommische (2030).....	102
Abbildung 64: Klimabilanz eines Brennstoffzellen-Pkw in 2030.....	104
Abbildung 65: Umweltwirkungen von Brennstoffzellen-Pkw über den Lebensweg (2030)	105

Abbildung 66: Zusätzliche Treibhausgasemissionen induktives Laden im Vergleich zur Batterieherstellung	109
Abbildung 67: Klimabilanz eines mittleren Pkw über den Lebensweg mit und ohne kontaktloses Laden nach Ladewirkungsrad (durchschnittlicher Strommix Deutschland)	110
Abbildung 68: Batteriekosten und Fahrzeugreichweite nach Batteriekapazität	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die betrachteten Wirkungsindikatoren	10
Tabelle 2: Betrachtete Fahrzeugtypen	12
Tabelle 3: Skalierung des Materialeinsatz verschiedener Fahrzeugklassen 2010	14
Tabelle 4: Leergewicht von Beispielfahrzeugen (teilweise mit Fahrgewicht)	14
Tabelle 5 Abweichungen der Materialanteile nach Fahrzeugtyp	15
Tabelle 6: Anteil Sekundärmaterialien	16
Tabelle 7 Einsatz von Platin und Palladium	16
Tabelle 8: Szenarioausprägungen für die Herstellung des Rumpffahrzeugs	17
Tabelle 9: Herstellergarantien und Literaturangaben zur Batteriehaltbarkeit	23
Tabelle 10: Szenarioausprägungen Batterieherstellung	23
Tabelle 11: Batteriekapazität und Fahrzeuggewicht aktueller Elektrofahrzeuge	29
Tabelle 12: Batteriekapazität und Fahrzeuggewicht der UMBReLA-Beispielfahrzeuge	29
Tabelle 13: Charakterisierung eines zukünftigen Brennstoffzellenfahrzeugs	34
Tabelle 14: Kraftstoffverbrauch verschiedener Fahrzeugtypen nach TREMOD (l/100km)	40
Tabelle 15: Verbrauchsangaben für Elektro-Pkw in wissenschaftlichen Studien	44
Tabelle 16: Verbrauchsdaten aktueller Elektrofahrzeuge (NEFZ)	44
Tabelle 17: Verbrauchsangaben für Brennstoffzellen-Pkw	45
Tabelle 18: Annahmen zur Datenmatrix Fahrzeugparameter	47
Tabelle 19: Wirkungsgrade für elektrischen Antrieb	48
Tabelle 20: IFEU-Annahmen zum Gesamtwirkungsgrad Elektrotraktion	48
Tabelle 21: Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher	50
Tabelle 22: Abschätzung der hybridischen Betriebsmodi von RE-Pkw	55
Tabelle 23: Unterschiede im Kraftstoffverbrauch zwischen direktem und seriellem Antrieb	56
Tabelle 24: Stromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern (2010)	62
Tabelle 25: Mittlerer Wirkungsgrad verschiedener Kratwerke	62
Tabelle 26: Szenarien für den Betankungsstrom in 2030	66
Tabelle 27: Betriebsparameter von Erdgasdampfreformern - Literaturwerte	69
Tabelle 28: Betriebsparameter zentraler Elektrolyseure in wissenschaftlichen Studien	70
Tabelle 29: Betriebsparameter von on-site Elektrolyseuren (Sagim, Piel)	70
Tabelle 30: Pipelinetransport von Wasserstoff	72
Tabelle 31: Kraftstoffigenschaften	77

Tabelle 32: Durchschnittlicher energetischer Kraftstoffmix in Deutschland 2010 und Szenarien für 2030	80
Tabelle 33: Betrachtete batterieelektrische Fahrzeuge und Nutzungsmuster.....	91
Tabelle 34: Fallbeispiele Elektro-Pkw mit Range Extender.....	94
Tabelle 35: Materialeinsatz für kabelloses Laden	107
Tabelle 36: Umweltwirkung der Infrastruktur für kontaktloses Laden.....	107
Tabelle 37: Mehrverbrauch durch Zusatzgewicht aufgrund kabellosen Ladens	108
Tabelle 38: Wirkungsgrad für induktives und induktives Laden	108
Tabelle 39: Überblick besuchte und ausgewertete Elektromobilitätsprojekte	125
Tabelle 40: Bauteil- und Werkstoffgewichte für den Fahrzeugumpf des mittleren Pkw	125
Tabelle 41: Durchschnittliche Tank-to-Wheel-Wirkungsgrade von Euro-5-Pkw.....	126
Tabelle 42: Energieverbrauch Elektrofahrzeuge 2010	127
Tabelle 43: Energieverbrauch Elektrofahrzeuge 2030 (Konservatives Szenario).....	127
Tabelle 44: Energieverbrauch Elektrofahrzeuge 2030 (Moderates Szenario)	128
Tabelle 45: Energieverbrauch Elektrofahrzeuge 2030 (Innovatives Szenario)	128

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH,
Wilckensstr. 3, D-69120 Heidelberg; Tel. 06221-4767-0; Fax -4767-19;
E-Mail: verkehr@ifeu.de; Internet: www.ifeu.de