

ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH

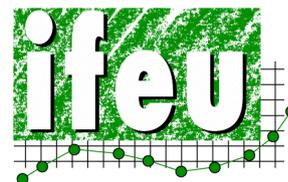


Ergebnisbericht

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

im Rahmen des FuE-Programms
**"Förderung von Forschung und Entwicklung im
Bereich der Elektromobilität"**
Förderkennzeichen 16EM0040

Heidelberg, Oktober 2011



**ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH**



UMBReLA

Umweltbilanzen Elektromobilität

Ergebnisbericht

**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

Inhaltsübersicht

Inhaltsübersicht.....	1
Das Wichtigste in Kürze.....	1
1 Einleitung.....	3
2 Herausforderungen der Verkehrsentwicklung	4
2.1 Quo vadis Mobilität?	4
2.2 Herausforderungen des Energieverbrauchs?	5
2.3 Herausforderungen des Klimaschutzes?	7
2.4 Herausforderungen der Luftreinhaltung?	8
3 Perspektive Elektromobilität	9
3.1 Was ist Elektromobilität?	9
3.2 Welche Vorteile bietet Elektromobilität?	10
3.3 Quo vadis Elektromobilität?	11
4 Hintergrund der Umweltbilanzen Elektromobilität.....	12
4.1 Berücksichtigte Lebenswegabschnitte	12
4.2 Berücksichtigte Umweltwirkungen.....	12
4.3 Realisierung und Datengrundlage.....	13
4.4 Betrachtete Fahrzeuge und Szenarien.....	14
5 Umweltbilanz Elektromobilität.....	16
5.1 Betrachtung der heutigen Situation	16
5.2 Betrachtung der Entwicklungsperspektiven von Elektrofahrzeugen	24
6 Systembetrachtung Wasserstoff.....	28
6.1 Umweltbilanz Wasserstoff	28
6.2 Strategische Bewertung von Wasserstoff	34
6.3 Perspektive: Angebot und Nachfrage nach Wasserstoff.....	43
7 Ausblick Elektromobilität.....	47
Quellenverzeichnis	51

Das Wichtigste in Kürze

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.

Im nachfolgenden Text „Ergebnisbericht“ sind die wichtigsten Schlussfolgerungen aus den Umweltbilanzen dargestellt. Die Datengrundlage der Modellierung sowie vertiefte Analysen sind in einem „wissenschaftlichen Grundlagenbericht“ dokumentiert. Zusätzlich sind Informationen zur Umweltbewertung von Elektromobilität und zentrale Ergebnisse des Projek-

tes auf der UMBReLA-Website 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 batterieelektrische 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.

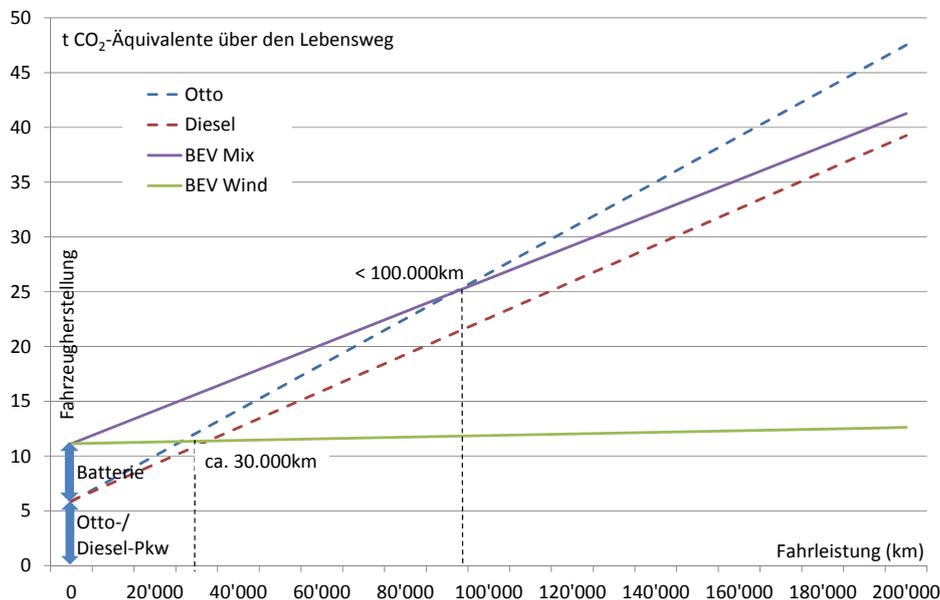
Die Bilanz hängt allerdings sehr von den CO₂-Emissionen des genutzten Stroms ab: Die Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Energien (z.B. Windstrom) führt zu deutlichen Klimavorteilen gegenüber konventionellen Pkw. Die Batterieaufwendungen werden dann ab einer Fahrleistung von 30.000 km ausgeglichen.

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 Fahr-

leistungen bewältigen. Die Umweltbilanz dieser Fahrzeuge hängt stark vom Anteil des elektrischen Betriebs ab. Bei einer überwiegend elektrischen Nutzung wer-

den 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 Fortschritte 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 erneuerbaren 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 batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen übertragen werden.

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

- Wie entwickeln sich Lebensdauer und Energiedichte von Batterien?
- 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?

1 Einleitung

Mobilität ist Voraussetzung für viele wirtschaftliche und private Aktivitäten und damit zentraler Bestandteil unseres Lebens. Der Mobilitätsbedarf in Deutschland wird heute überwiegend durch den Straßenverkehr gedeckt. Hier ermöglichen moderne Fahrzeuge und ein gut ausgebauten Straßennetz individuelle Mobilität in hohem Ausmaß. Dem stehen allerdings zugleich negative Aspekte gegenüber, insbesondere Umweltprobleme. Allen voran ist der Verkehr für gut 20 % der CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich ([UBA 2010a]).

Eine Verbesserung der Umweltbilanz des Verkehrs in Deutschland ist also geboten. Ansätze bei konventionellen Verbrennungs-Pkw sind u. a. weitere Verschärfungen der Abgasgrenzwerte und die Einführung von CO₂-Grenzwerten. Diese Ansätze können jedoch nur begrenzt zur Lösung der Umweltprobleme des Verkehrs beitragen. 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.

Die Ergebnisse der vergleichenden Ökobilanzen des IFEU-Instituts im Rahmen der ‚Erprobung von Elektrofahrzeugen auf der Insel Rügen‘ in den 1990er Jahren zeigten in einigen Umweltbereichen Nachteile für Elektrofahrzeuge. Es gab vor allem technische Schwierigkeiten bei den Batterien ([Eden et al. 1997]). Mittlerweile hat es, insbesondere angeregt durch Technikbereiche wie Handys oder Laptops, Entwicklungssprünge bei den Batterien gegeben. Zusätzlich ist der Anteil erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung größer geworden. Da-

mit haben sich die Rahmenbedingungen stark geändert: Zeit also für neue, umfassende Umweltbilanzen von Elektromobilität.

In den letzten zwei Jahren wurden Elektrofahrzeuge in zahlreichen – u.a. vom Bundesumweltministerium (BMU) geförderten Forschungsprojekten – weiterentwickelt und erprobt. Begleitend zu diesen Feldversuchen und Projekten wurde vom IFEU das Projekt UMBReLA durchgeführt: eine Analyse der Umweltwirkungen von batterieelektrischen Fahrzeugen und eine Systembetrachtung von Brennstoffzellenfahrzeugen.

Dabei werden die Elektrofahrzeuge konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor gegenübergestellt. Der hier angewandte ökobilanzielle Ansatz berücksichtigt dabei alle relevanten Phasen des Lebensweges der Fahrzeuge: Von der Fahrzeug- und Batterieherstellung und Nutzung über die Energiebereitstellung bis zur Fahrzeugentsorgung bzw. einem Materialrecycling. Der Bundesregierung werden damit Handlungsoptionen aufgezeigt und sie wird unterstützt, zukünftige Elektromobilität aus Umweltsicht optimal zu gestalten.

Der vorliegende Ergebnisbericht fokussiert auf die wichtigsten Schlussfolgerungen aus den umfangreichen Umweltbilanzen. Ziel ist es grundlegende Tendenzen und Abhängigkeiten aufzuzeigen. Der ergänzende Grundlagenbericht dokumentiert die Datengrundlagen und Umweltbilanzen für einzelne Lebenswegabschnitte im Detail. Weitere Informationen sowie ein Online-Tool – mit dem sich vergleichende Umweltbilanzen aus Nutzerperspektive erzeugen lassen – finden sich auf der projektbegleitenden Homepage unter www.emobil-umwelt.de.

2 Herausforderungen der Verkehrsentwicklung

Der Verkehr in Deutschland wächst weiterhin. Damit sind zahlreiche Umweltbelastungen verbunden, denen die Politik begegnen muss. Elektromobilität muss

somit auch vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen beurteilt werden, insbesondere dem Klimaschutz, der Luftreinhaltung und dem Lärmschutz.

2.1 Quo vadis Mobilität?

In den letzten zwei Jahrzehnten ist die Verkehrsleistung in Deutschland nahezu kontinuierlich angestiegen - im Güterverkehr deutlich stärker als im Personenverkehr. Gründe dafür sind die weiterschreitende Arbeitsteilung der Produktionsprozesse, die EU-Öffnung und die Globalisierung der Märkte.

Änderungen in der Produktionsstruktur („Just in Time“) und der Rückgang von bahn-affinen Massengütern (z.B. Kohle) führten dazu, dass der Anstieg des Güterverkehrs im Wesentlichen vom Lkw-Verkehr getragen wurde, während Bahn- und Binnenschifftransport nur wenig anstiegen. So hat sich die Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr zwischen 1990 und 2010 etwa verdoppelt (Abb. 1). Auch der kurzfristige Rückgang des Güterverkehrs in 2009 - ausgelöst durch die weltweite Finanzkrise 2008 - war nur von kurzer Dauer. Ein Ende dieses verkehrlichen Wachstums ist also noch nicht in Sicht.

Dabei dominiert der Straßenverkehr sowohl den Güter- als auch den Personenverkehr. Zwar gab es in den letzten Jahren auch einen besonders starken Anstieg des Flugverkehrs, der Beitrag ist im Vergleich zum Straßenverkehr jedoch immer noch gering. Der Straßenverkehr ist damit heute, neben der wichtigen Rol-

le, die er im Wirtschafts-, Arbeits- und Freizeitleben des Landes spielt, auch verantwortlich für

- den Verbrauch fossiler Energieträger,
- den Ausstoß von Treibhausgasen und
- Schadstoffemissionen,
- Lärmbelastungen,
- Flächeninanspruchnahme sowie
- Flächenzerschneidung.

Aktuelle Studien gehen von einem weiteren Wachstum des Güter- und Personenverkehrs aus. Demnach werden die Transportleistungen im Güterverkehr zwischen 2004 und 2025 in Deutschland um etwa 80 % steigen, die Fahrleistungen im Pkw-Verkehr um 14 % ([ITP 2007]).

Elektromobilität gilt nun als neuer Hoffnungsträger. So viel ist indes bereits klar: Einen Beitrag kann Elektromobilität vor allem zur Lösung von emissionsbedingten Problemen – seien es zum Klimaschutz, Luftreinhaltung oder zum Lärmschutz – leisten. Stausituationen, Flächenverbrauch und Flächenzerschneidung werden auch Elektrofahrzeuge nicht verringern, so lange sie nicht mit grundlegend neuen Mobilitätskonzepten verbunden sind.

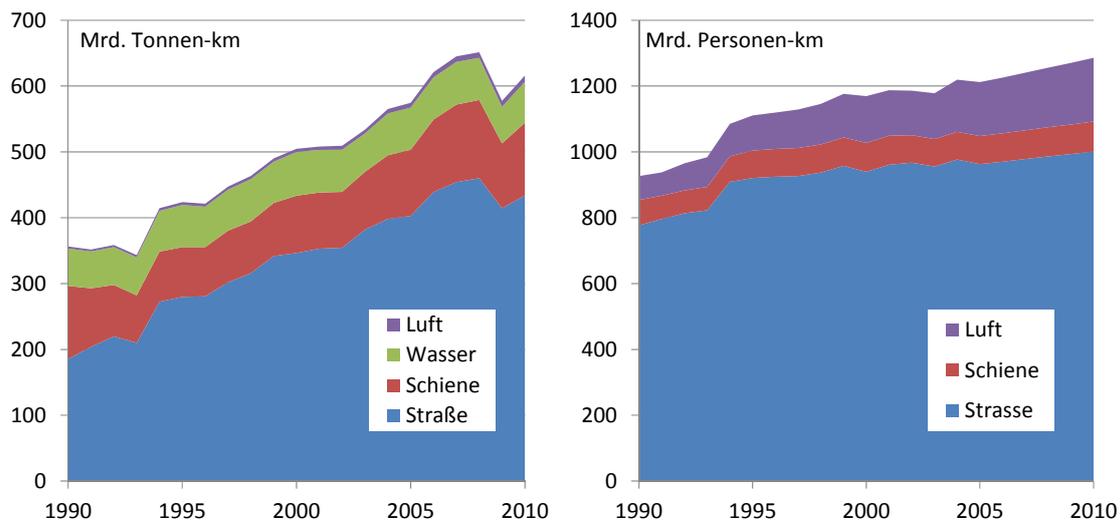


Abb. 1: Entwicklung der Güter- und Personenverkehrsleistung in Deutschland ([IFEU 2009])

2.2 Herausforderungen des Energieverbrauchs?

Der gesamte Verkehr hatte 2009 einen Anteil von etwa 29 % am Endenergieverbrauch in Deutschland ([AGEB 2011]) (Abb. 2). Dabei ist der Straßenverkehr für über 80 % dieses Verbrauchs verantwortlich, Flugzeuge tanken etwa 15 % des in Deutschland verkauften Kraftstoffes. Beide Verkehrsträger basieren derzeit fast vollständig auf fossilen Kraftstoffen.

Der Schienenverkehr ist derzeit der einzige relevante Stromverbraucher im Verkehr – kommt jedoch auf nur 2 % des Endenergieverbrauchs, wovon auch nur $\frac{1}{3}$ elektrische Energie sind.

Zwischen 1960 und 2009 hat sich der Endenergiebedarf des Verkehrs etwa verdreifacht – der Energiebedarf des Straßenverkehrs verfünffacht ([IFEU 2009]). Dabei ist der Verbrauch in den letzten Jahren leicht gesunken. Während in den 80er-Jahren noch $\frac{3}{4}$ des Diesels im Straßenverkehr vom Güterverkehr verbraucht wurden, sind es heute – bedingt durch die starke Zunahme der Diesel-Pkw – nur noch etwa 50 %. Der Energieverbrauch des Flugverkehrs hat sich seit 2000 etwa verdoppelt.

Die weltweite Energienachfrage im Verkehr nimmt nach aktuellen Prognosen weiter zu, das weltweite Fördermaximum von Rohöl könnte jedoch in den nächsten Jahren erreicht sein. Dadurch wird auch die Förderung aus zunehmend schwierigeren Quellen wie unkonventionellen Ölvorkommen oder Tiefseebohrungen angereizt.

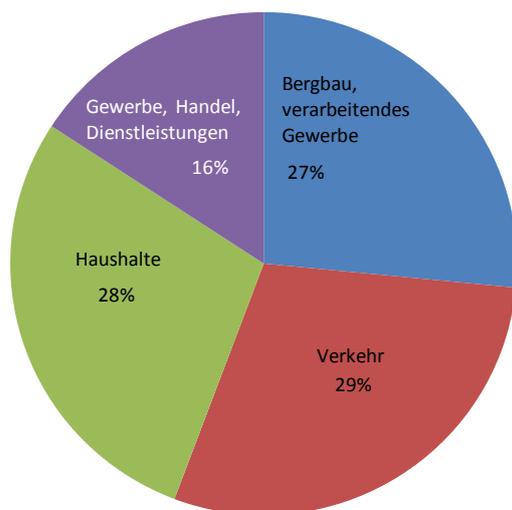


Abb. 2: Energieverbrauch in Deutschland 2009 ([AGEB 2011])

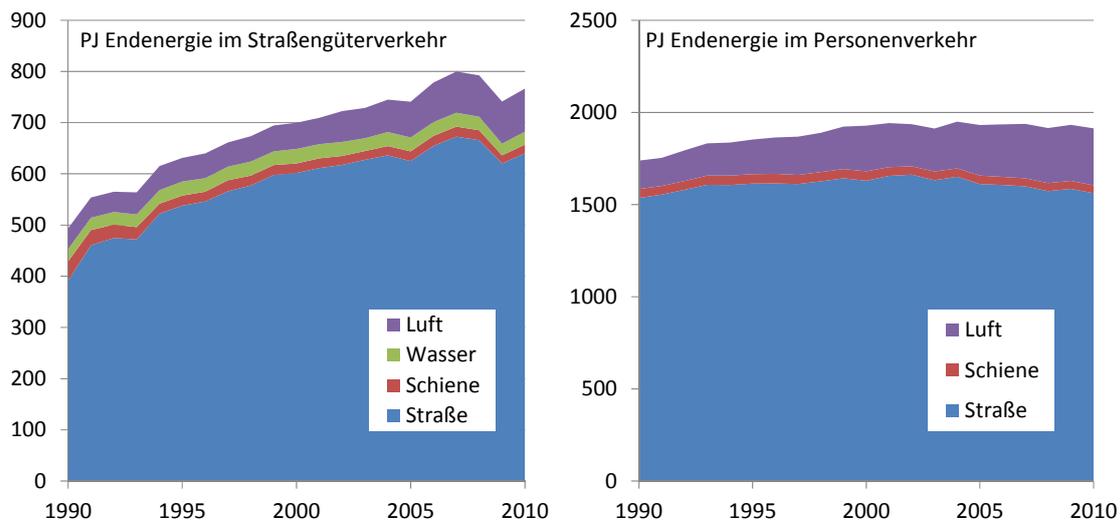


Abb. 3: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr in Deutschland ([IFEU 2009])

Die Reduktion 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]).

Neben der Reduktion des Energieverbrauchs ist - aufgrund der starken Abhängigkeit des Verkehrs von fossilen Energieträgern - auch die Diversifizierung des Energieträgermixes ein Ziel der Bundesregierung, das seit einigen Jahren durch Steuerprivilegien und Quotenregelungen gefördert wird:

- **Fossile Alternativen** zu Benzin und Diesel sind LPG (Flüssiggas) und CNG (Erdgas). Steuervorteile sollen einen Anreiz für die Einführung von LPG und CNG betriebenen Fahrzeugen setzen. Der Anteil von LPG und CNG-Fahrzeugen nahm zwar die letzten Jahre stark zu, mit unter 500.000

Pkw liegt ihr Anteil im Jahr aber immer noch nur bei etwa 1 % des Gesamtbestandes.

- **Erneuerbare Alternativen** im Straßenverkehr sind bisher vor allem Biokraftstoffe (maßgeblich Biodiesel und Bioethanol). Ihr Anteil nahm durch eine Steuerbefreiung bis 2007 kontinuierlich auf über 7 % zu. Danach ist ein Rückgang durch die teilweise Besteuerung im Rahmen der Biokraftstoffquotenregelung zu verzeichnen.

Mittlerweile legt die Erneuerbare-Energien-Richtlinie ([EU 2009a]) für das Jahr 2020 ein Ziel von 10 % erneuerbare Energien im Verkehrsbereich (Straße und Schiene) fest. Dazu zählt neben den Biokraftstoffen auch Strom aus erneuerbaren Quellen, der sogar 2,5-fach angerechnet wird. Die Richtlinie gibt damit bereits einen deutlichen Anreiz über Biokraftstoffe hinaus Richtung Elektromobilität.

2.3 Herausforderungen des Klimaschutzes?

Zum Treibhauseffekt, dem wichtigsten globalen Umweltproblem, trägt der Straßenverkehr vor allem mit der Verbrennung fossiler Kraftstoffe bei. Die direkten CO₂-Emissionen des Verkehrs machten im Jahr 2008 gut 20 % der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland aus ([UBA 2010a]). Weitere CO₂-Reduktionen im Verkehrsbereich sind daher unumgänglich, wenn die Klimaschutzziele der Bundesregierung erfüllt werden sollen.

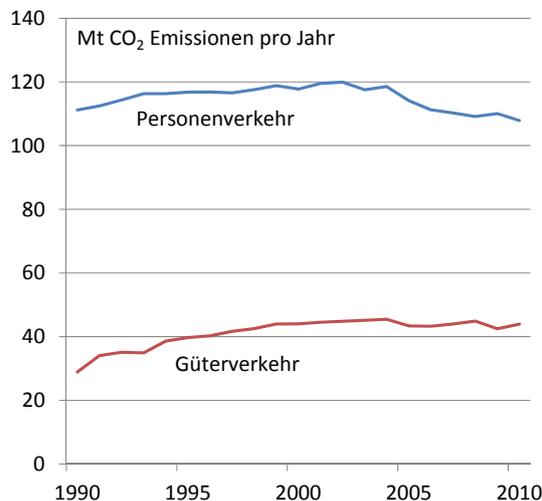


Abb. 4: CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland (IFEU 2009)

Analog dem Energieverbrauch werden die direkten CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland zu gut zwei Dritteln vom Personenverkehr verursacht. Entgegen dem Trend einer leicht ansteigenden Verkehrsleistung sind die CO₂-Emissionen des Personenverkehrs auf der Straße in Deutschland seit etwa dem Jahr 2000 leicht rückläufig. Dies

liegt an sparsameren Neufahrzeugen und anderen Einflüssen wie höheren Kraftstoffpreisen, Konjunkturschwankungen und Tanktourismus. Auch Biokraftstoffe tragen zu diesem Rückgang bei.

Die Effizienzsteigerung bei Pkw soll in den nächsten Jahren durch die CO₂-Gesetzgebung der EU weiter vorangetrieben werden. So dürfen ab 2015 die Pkw-Neuzulassungen in der EU im Durchschnitt 130 g CO₂ pro km ausstoßen. Eine weitere Verschärfung dieses Grenzwertes in 2020 wird diskutiert und wird für eine Absenkung der CO₂-Emissionen der Pkw dringend benötigt.

Die absoluten CO₂-Emissionen des Güterverkehrs in Deutschland liegen zwar deutlich unter denen des Personenverkehrs, sind aber in den letzten zwei Jahrzehnten deutlich angestiegen - wenn auch etwas weniger stark als die Verkehrsleistung. Effizientere Lkw konnten also bereits einen Teil der steigenden Verkehrsleistung kompensieren. Maßnahmen zur weiteren Reduktion des CO₂-Ausstoßes von Lkw wie die Einführung von CO₂-Grenzwerten werden diskutiert.

So ergibt sich Handlungsbedarf sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr: Bei den Pkw trotz einer leichten Trendwende auf Grund des absoluten Emissionsniveaus; bei den Lkw trotz des niedrigeren Emissionsniveaus auf Grund des Trends steigender Emissionen.

2.4 Herausforderungen der Luftreinhaltung?

Die Luftschadstoffe aus dem Kfz-Verkehr sind das bekannteste und am längsten diskutierte Umweltproblem des Verkehrsbereichs. Hohe Belastungen der Innenstädte mit Kohlenmonoxid gaben den Anlass, dass seit den 1970er Jahren sukzessive Begrenzungen der Abgasemissionen aus Kraftfahrzeugen eingeführt wurden.

Mit der Einführung des Katalysators bei Otto-Pkw gingen wichtige Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland teilweise sehr stark zurück (Abb. 5). Dazu trugen auch die verschärften Anforderungen an die Kraftstoffe bei: Bleifreies Benzin, weniger Benzol und kaum noch Schwefel.

Dementsprechend ist die Luftqualität in den deutschen Städten bereits deutlich besser geworden. So werden die aktuellen Grenzwerte für Kohlenmonoxid, Blei, Schwefeldioxid und Benzol deutlich unterschritten.

Dennoch führt die bestehende Luftverschmutzung zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen wie Herz- und Lungenproblemen, einem erhöhten Risiko für Atemwegserkrankungen (z.B. Asthma) und einer Verstärkung allergischer Reaktionen ([Wichmann 2003]).

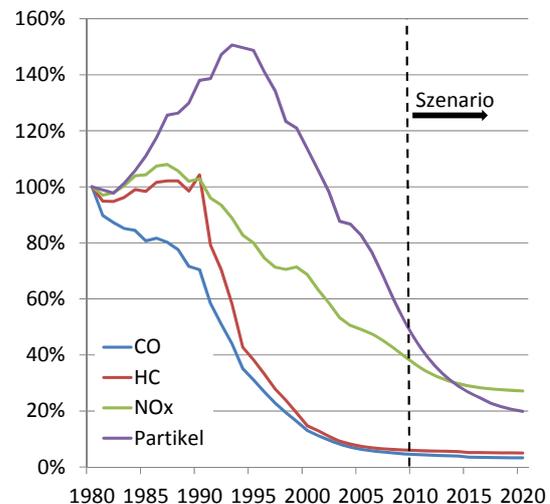


Abb. 5: Schadstoffemissionen Straßenverkehr in Deutschland ([IFEU 2009])

So wurde die Belastung mit Feinstaub in den letzten Jahren zwar geringer, entspricht jedoch an etlichen deutschen Straßen noch nicht den seit 2005 gültigen EU-Immissionsgrenzwerten. Hier ist der Straßenverkehr ein wichtiger Verursacher, aber weitere Emittenten und meteorologische Einflüsse erschweren eine schnelle Minderung.

Ähnlich komplex ist die Situation beim Stickstoffdioxid. Auch hier gingen Emissionen und Immissionen der Stickoxide zurück. Dennoch wird der seit dem Jahr 2010 für Stickstoffdioxid gültige Grenzwert heute an verkehrsreichen Straßen zum Teil so stark überschritten, dass ein zeitnahes Einhalten kaum zu erwarten ist. Die bereits beschlossenen Euro-6-Grenzwerte für Pkw und Lkw werden das Emissionsniveau jedoch noch einmal deutlich senken.

3 Perspektive Elektromobilität

Elektromobilität gilt heute als Hoffnungsträger einer umweltfreundlichen Mobilität. Dabei ergeben sich zunächst folgende Schlüsselfragen:

- Was ist überhaupt Elektromobilität?
- Welche Vorteile hat Elektromobilität?
- Was für Fahrzeugkonzepte wird es geben?

3.1 Was ist Elektromobilität?

Allgemein kann Elektromobilität als durch einen Elektromotor angetriebene Mobilität verstanden werden. Damit wären auch große Teile des Schienenverkehrs sowie die Straßen-, S- und U-Bahnen ein schon länger etablierter Teil der Elektromobilität. Die Bahnen sind mit einem jährlichen Stromverbrauch von etwa 12 TWh ([IFEU 2009]) heute der wichtigste Elektromobilitätssektor in Deutschland.

Der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung und dieser Bericht fokussieren jedoch auf den Straßenverkehr. Viele Fahrzeughersteller verfolgen heute eine zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges, ohne auf den konventionellen Antrieb zu verzichten („Hybridisierung“). In der einfachsten Form des so genannten „Micro-

Hybrids“ wird der Verbrennungsmotor bei Fahrzeugstillstand abgeschaltet bzw. wieder gestartet („Start-Stopp-Funktion“). Da Mikrohybride keinen Elektromotor zum Vortrieb besitzen, sind sie streng betrachtet keine wirklichen Hybridfahrzeuge. Das System begünstigt aber eine Kraftstoffeinsparung.

Der „Mild-Hybrid“ unterstützt den Anfahrvorgang des Fahrzeugs mit einem Elektromotor und speichert Bremsenergie in die Batterie zurück. Der „Voll-Hybrid“ hat darüber hinaus eine größere Batterie und einen stärkeren Elektromotor und kann kurze Strecken auch rein elektrisch zurücklegen. Elektro- und Verbrennungsmotor sind optimal aufeinander abgestimmt, so dass die Nachteile des Verbrennungsmotors im Teillastbetrieb kompensiert werden.

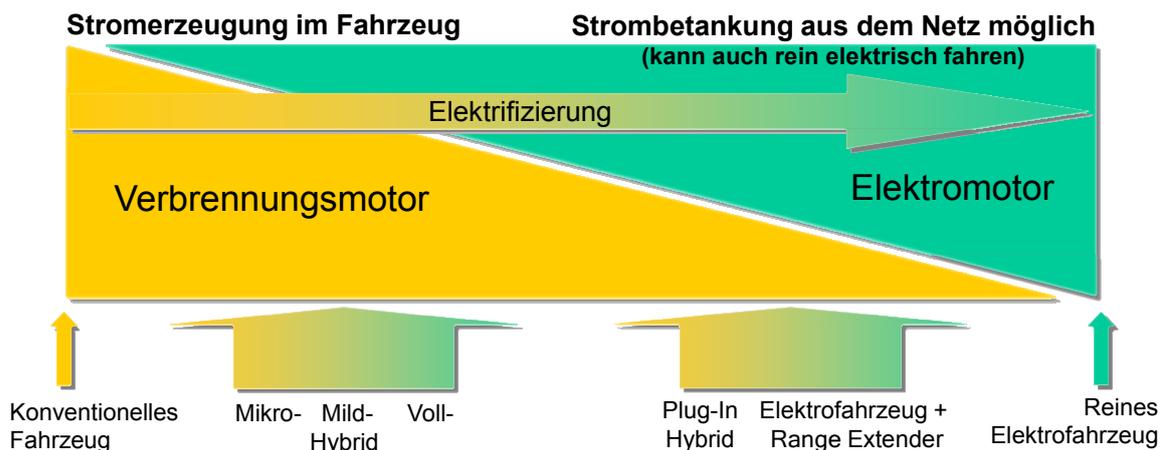


Abb. 6: Elektrifizierung des Antriebsstrangs

Hybridfahrzeuge nutzen jedoch ausschließlich Kraftstoff als Energiequelle und sind damit keine Elektrofahrzeuge im Sinne des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität der Bundesregierung.

Dieser versteht unter Elektromobilität sämtliche Antriebsformen, bei denen Fahrzeuge zumindest teilweise direkt mit elektrischem Strom aus dem Netz betankt werden ([Bundesregierung 2009]).

Diese Möglichkeit ergibt sich bei größerer Batteriekapazität, mit der auch größere Strecken rein elektrisch zurückgelegt werden können.

Solche Fahrzeuge werden derzeit unter dem Begriff „Plug-In-Hybrid“ oder auch als „Range-Extender-Fahrzeuge“ (Fahrzeuge mit Reichweitenverlängerung) in der Fachöffentlichkeit verstärkt diskutiert. Erste Fahrzeuge dieses Konzeptes sind schon auf dem Markt. Bei einem solchen Antriebskonzept kann ein Teil der Fahrleistung rein elektrisch mit Strom aus dem Netz erbracht werden. Reine Elektrofahrzeuge verfügen nur über einen elektromotorischen Antrieb mit entsprechend größerer Batterie.

3.2 Welche Vorteile bietet Elektromobilität?

Die Elektrifizierung von Fahrzeugen ermöglicht Effizienzgewinne, die auch bei den teilelektrifizierten Hybridfahrzeugen erreicht werden. So ermöglicht der Elektroantrieb die Zwischenspeicherung und Rückspeisung von Bremsenergie und hat auch bei geringen Lasten einen hohen Wirkungsgrad. Damit kann insbesondere im Innerortsbereich eine Senkung des Energieverbrauchs gegenüber rein konventionellen Fahrzeugen erreicht werden.

Im Elektrobetrieb sind die Fahrzeuge zudem vor Ort emissionsfrei und auch lärmarm. Damit haben sie heute noch lokal große ökologische Vorteile gegenüber Verbrennungs-Pkw, die ein Hauptverursacher der hohen Luftbelastungen mit Feinstaub und Stickstoffdioxid sind sowie Lärmbelastungen verursachen. Zukünftig wird dieser Vorteil angesichts der strengeren Grenzwerte für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren jedoch geringer werden.

Große Hoffnungen werden insbesondere im Klimaschutz auf Elektrofahrzeuge gesetzt. Bisher waren Biokraftstoffe die einzige erneuerbare Energiequelle im Straßenverkehr. Es werden jedoch auch

Fokus vieler Elektromobilitätsprojekte sind rein batterieelektrische Fahrzeuge. Der Vergleich dieser Fahrzeuge mit anderen Antriebskonzepten (Verbrennungsmotor, Brennstoffzelle) bildet daher auch den Schwerpunkt der UMBReLA-Begleitforschung. Brennstoffzellenfahrzeuge sind dabei definitionsgemäß keine Elektrofahrzeuge, da sie die Energie für den Elektromotor direkt an Bord, aus getanktem Wasserstoff gewinnen. Brennstoffzellenfahrzeuge werden hier jedoch betrachtet um eine strategische Bewertung verschiedener Antriebskonzepte vornehmen zu können.

zahlreiche mit dem Einsatz von Biokraftstoffen assoziierte Probleme wie Landnutzungsänderungen, Nahrungsmittelkonkurrenz etc. kritisch diskutiert.

Durch Elektrofahrzeuge können nun zahlreiche Energiequellen für den Verkehr nutzbar gemacht werden, die bisher im Verkehrsbereich keine Rolle gespielt haben. Hierzu gehören auch die erneuerbaren Energien wie Windkraft, Wasserkraft oder Fotovoltaik. Die Gesamtbilanz der Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen durch den Betrieb von Elektro-Pkw ist dann von der ökologischen Qualität des zur Stromerzeugung genutzten Kraftwerksparks abhängig. Zusätzlich verringert sich die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern.

Mit ihrer Stromentnahme aus dem Stromnetz können Elektrofahrzeuge auch Abnehmer der Spitzenleistung von fluktuierenden erneuerbaren Energien sein. Dies könnte insbesondere in Deutschland mit seinem geplanten hohen Anteil an Windkraft von Vorteil sein. Grundsätzlich kann von den Batterien der Elektro-Pkw auch Strom ins Netz zurückgespeist werden. Damit können Elektrofahrzeuge größerer Zahl in lang-

fristiger Perspektive als Abnehmer und auch als Speicher fluktuierend anfallender erneuerbarer Energie fungieren. Entsprechende Steuerungstechniken und

Abrechnungsmodelle sind vorstellbar; für die Netzintegration bedarf es jedoch des Aufbaus einer Infrastruktur.

3.3 Quo vadis Elektromobilität?

Während die Verbrennungs-Pkw einen mittlerweile sehr hohen Entwicklungsgrad erreicht haben und fast ausschließlich den Pkw-Bestand darstellen, stehen Elektrofahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien erst am Anfang ihrer Entwicklung. Für Brennstoffzellenfahrzeuge ist derzeit noch kein breiter Markteintritt abzusehen.

Fahrzeuge u.a. nach der Batteriekapazität. So sind eine Reihe von Anwendungen mit kleinen Batterien (< 5kWh) zu erwarten: Zweiräder einerseits und Hybrid-Fahrzeuge mit kleinen Hochleistungsbatterien andererseits. Beide sind bereits am Markt verfügbar und der Übergang zu einem Massenmarkt wird eher kurzfristig erwartet ([Thielmann & Sauer 2011]).

Wo werden sich Elektrofahrzeuge durchsetzen? Experten unterscheiden die



Abb. 7: Roadmap Produkte mit Li-Ionen-Batterien (IFEU nach [Thielmann & Sauer 2011])

Weiterhin wird eine Reihe von Produkten mit Traktionsbatterie mittlerer Kapazität (5 – 25 kWh) erwartet, insbesondere teil- und vollelektrisch Pkw (PHEV und BEV) sowie Kleintransporter als vollelektrische Fahrzeuge (Abb. 7). Erste Serienfahrzeuge sind auf dem Markt, mit einer Massenverfügbarkeit wird nach 2015 gerechnet. Solche Fahrzeuge wurden im Rahmen der vom BMU geförderten Projekte erforscht und werden in UMBReLA betrachtet.

Größere Anwendungen werden vor allem im Markt der ÖPNV-Busse gesehen. Dieser wird jedoch zunächst durch Hybridbusse dominiert, die sich bereits ab 2015 zu einem Massenmarkt entwickeln könnten. Mittel- bis langfristig - mit steigender Energiedichte und sinkenden Preisen bei Batterien - sind auch rein elektrische Busse vorstellbar ([Thielmann & Sauer 2011]).

4 Hintergrund der Umweltbilanzen Elektromobilität

Die Ergebnisse dieses Berichtes stützen sich auf umfangreiche Umweltbilanzen, deren Methodik, Datenbasis und Detailanalysen in dem UMBReLA-Grund-

lagenbericht ([IFEU 2011]) dokumentiert sind. In diesem Kapitel werden Hintergrundinformationen zu den Umweltbilanzen beschrieben.

4.1 Berücksichtigte Lebenswegabschnitte

Die hier dargestellten Umweltbilanzen folgen einem ökobilanziellen Ansatz indem sie den gesamten Lebensweg verschiedener Fahrzeugkonzepte bilanzieren. Das Vorgehen ist angelehnt an ISO 14040/14044. Berücksichtigt werden dabei die Herstellung des Fahrzeugs (mit allen notwendigen Komponenten), die Nutzung und damit verbundene Bereitstellung von Energie und die Entsorgung bzw. das Recycling verschiedener Rohstoffe (siehe Abb. 8). Im Mittelpunkt steht der direkte Vergleich verschiedener Fahrzeugkonzepte. Die Infrastruktur zur Fahrzeugherstellung und -entsorgung bzw. zur Energiebereitstellung wird in der Regel nicht bilanziert.

Als Vergleichsmaßstab zur Bewertung der Ergebnisse dient die sogenannte „funktionelle Einheit“. Dies kann die Fahrleistung, in der Regel der gefahrene Kilometer, oder die Lebensfahrleistung sein. Bei der Detailbetrachtung werden auch andere Bezugsgrößen verwendet, z.B. werden die Umweltwirkungen pro

Batterie, Fahrzeug, kWh-Strom oder MJ Kraftstoff verglichen. Der geographische Bezugsrahmen ist in der Regel Deutschland. Zeitlich wird sowohl der aktuelle Stand der Technik abgebildet (Stand 2010), als auch – in Szenarien – die Situation im Jahr 2030.

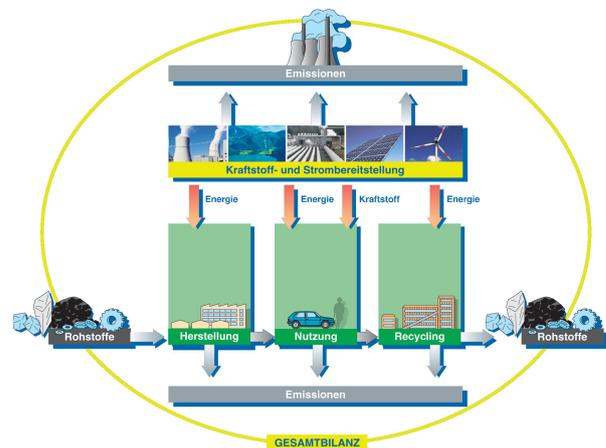


Abb. 8: Was wird bei der Bilanzierung berücksichtigt?

4.2 Berücksichtigte Umweltwirkungen

Neben dem Verbrauch an Energie und Ressourcen werden auch andere, aus Schadstoffemissionen resultierende Umweltwirkungen betrachtet. Diese Emissionen entstehen sowohl bei der Fahrzeugherstellung und Entsorgung bzw. Recycling, als auch bei der Herstellung von Kraftstoff oder Strom, den das Fahrzeug für den Betrieb benötigt, bzw. beim Betrieb des Fahrzeugs selbst. Hier tragen die sogenannten Treibhausgasemissionen, insbesondere Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Stickstoffmo-

noxid (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 zusammengefasst),

Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC) und Schwefeldioxid (SO₂). Die Substanzen sind dabei für unterschiedliche - teilweise aber sich überschneidende - Wirkungen verantwortlich. Um diese Wirkungen zusammenfassend bewerten zu können, werden 'Umweltwir-

kungskategorien verwendet. Diese gewichten die einzelnen Komponenten zu einem einzigen Faktor, der die Stärke der Umweltwirkung beschreibt. Tab. 1 gibt einen Überblick über die betrachteten Umweltwirkungskategorien.

Tab. 1: Überblick betrachteter Umweltwirkungskategorien

Wirkungskategorie	Einheit	Beschreibung
Klimawirkung	CO ₂ -Äquivalente	Beitrag zum Treibhauseffekt
Kumulierter Energieaufwand	MJ	Gesamter Energieaufwand
Versauerung	SO ₂ -Äquivalente	Absenkung des pH-Wertes
Eutrophierung (terrestrisch)	Phosphat-Äquivalente	Übermäßiger Nährstoffeintrag in Böden
Sommersmog	POCP-Äquivalente	Bildung bodennahen Ozons
Feinstaubemissionen	PM ₁₀	Emission von Feinstaub (ohne Wichtung)

IFEU 2011

4.3 Realisierung und Datengrundlage

Zur umfassenden Bilanzierung der Umweltwirkungen wurde von IFEU das Ökobilanzmodell eLCAr (Electric Car LCA) aufgebaut. Dieses wurde mit der Ökobilanzsoftware UMBERTO realisiert, welche vom 'ifu Hamburg' unter IFEU-Beteiligung entwickelt wird. eLCAr ermöglicht eine differenzierte Betrachtung des Materialeinsatzes und der Emissionen, die mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung bzw. Recycling von Fahrzeugen mit verschiedensten Antriebssystemen verbunden sind. Auf allen Abschnitten des Lebensweges werden der Material- und Energieeinsatz sowie die damit verbundenen Emissionen bilanziert. Durch die hoch differenzierte Modellierung können verschiedenste Parameter variiert und damit beliebige Szenarien berechnet werden.

Zur Bilanzierung der Herstellung von Fahrzeugen und Batterien sind detaillierte Informationen zum Materialeinsatz für das Fahrzeug sowie den mit der Produktion zusammenhängendem Energie- und Transportaufwand hinterlegt. Die mit der Bereitstellung von Materialien verbunde-

nen Umweltwirkungen basieren dabei im gesamten Modell auf Ecoinvent 2.2 ([Ecoinvent 2008]). Die Differenzierung nach Bauteilen erlaubt die individuelle Bilanzierung von Fahrzeugen verschiedener Größe und mit verschiedenen Antriebskonzepten (Otto, Diesel, RE, BEV).

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. Zudem können auch Fahrzeuge einbezogen werden, zu denen bisher nur wenige Verbrauchsdaten vorliegen (z.B. Elektrofahrzeuge). Die Differenzierung der Fahrzeugparameter erlaubt zusätzlich die transparente Darstellung von Szenarien.

Für die Energiebereitstellung kann ein beliebiger Kraftwerkspark mit verschiedenen Eigenschaften definiert werden. Bei den Kraftstoffen können neben fossilem Otto- und Dieselmotorkraftstoff auch Biokraftstoffe als Beimischung oder Reinkraftstoff gewählt werden.

Die Datenbasis von eLCAR ist im wissenschaftlichen UMBReLA-Grundlagenbericht detailliert dokumentiert ([IFEU 2011]). Sowohl die Eingangsdaten von

eLCAR, als auch die (Teil-)Ergebnisse wurden an den Erfahrungen der aktuellen Flottenversuche zur Elektromobilität gespiegelt. Einen Überblick gibt Abb. 9.

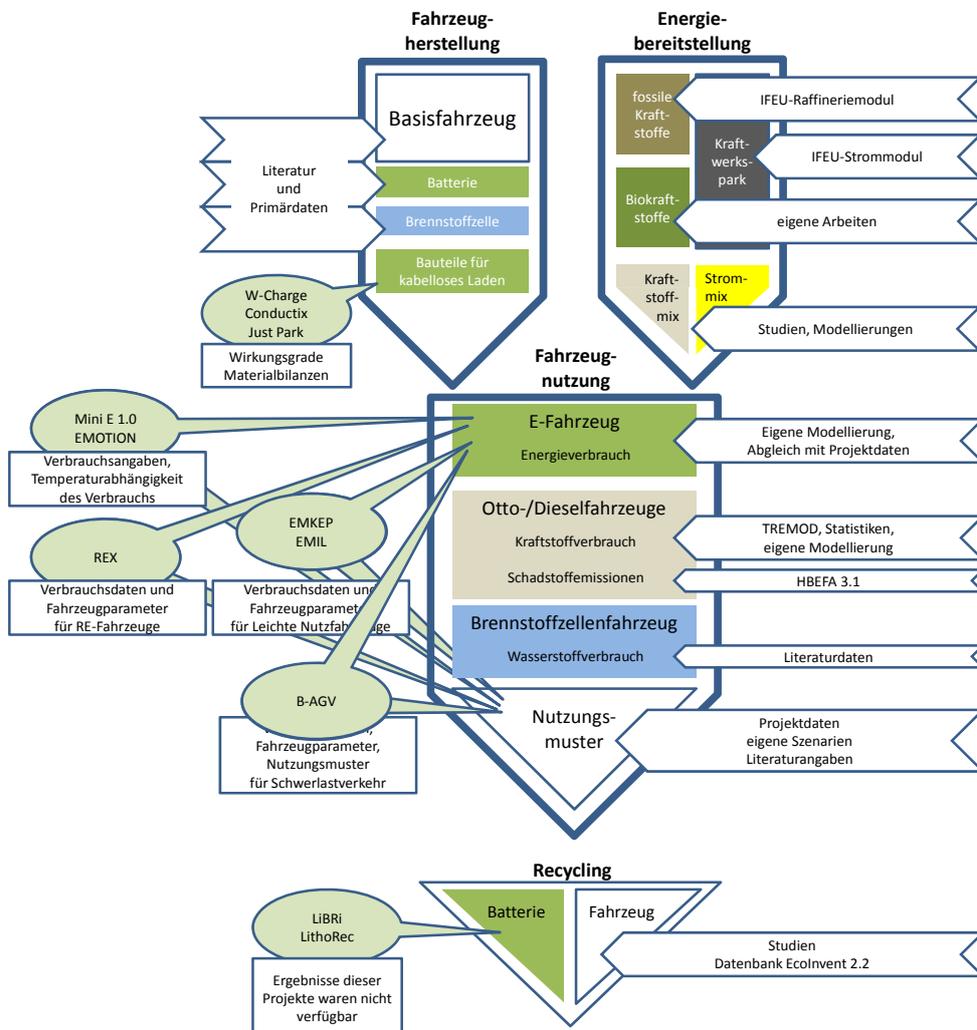


Abb. 9: Schematischer Überblick der Datengrundlagen und besuchten Projekte

4.4 Betrachtete Fahrzeuge und Szenarien

Die Umweltbilanzen Elektromobilität beschränken sich hier auf Elektrofahrzeuge im Sinne des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität ([Bundesregierung 2009]), also auf Fahrzeuge, die zumindest teilweise direkt mit elektrischem Strom aus dem Netz geladen werden. Analog zu den vom BMU geförderten Forschungsprojekten stehen Pkw und leichte Nutzfahrzeuge im Fokus. Bei Pkw werden dabei verschiedene Größenklassen (klein, mittel und groß) entsprechenden Nutzungsmustern unterschieden.

Neben dem rein elektrischen Antrieb wird zusätzlich das Range-Extender-Antriebskonzept betrachtet, da es für den Markteintritt von Elektromobilität als wichtig angesehen wird.

Betrachtet werden keine spezifischen Fahrzeugmodelle, sondern generalisierte, mittlere Fahrzeugtypen nach heutigem Stand der Technik sowie Szenarien bezüglich der möglichen Entwicklung bis 2030. Wichtige Fahrzeug- und Nutzungsbeispiele für die Ergebnisdarstellung sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Ein wichtiger Parameter der Herstellungsbilanz ist die Batterie-Lebensdauer. Die ist heute vor allem kalendarisch auf etwa 8 Jahre begrenzt. Bei einer mittleren Lebensdauer eines Pkw in Deutschland von gut 12 Jahren sind statistisch 1,5 Batterien über das Fahrzeugleben in

Deutschland notwendig. Dieser Wert für 2010 berücksichtigt, dass einige Fahrzeuge kürzer genutzt werden und dabei eventuell mit einer Batterie auskommen, während länger genutzte Fahrzeuge zwei Batterien benötigen.

Tab. 2: Betrachtete Fahrzeugkonzepte und Nutzungsmuster

Name	Größe	Batterie (kWh)*	Lebenslaufleistung (km)
City-Pkw	klein	18	120.000
Standard-Pkw	klein/mittel/groß	18/24/28	150.000
Gewerbe-Pkw	groß	28	200.000
Standard-RE-Pkw	mittel	12	150.000
Intensiv-RE-Pkw		14	200.000
Lieferwagen, leichte Nutzung	Leichtes Nfz.	30	100.000
Lieferwagen, standard Nutzung			150.000
Lieferwagen, intensive Nutzung			200.000

* 2010 wird von 1,5 Batterien über den Lebensweg des Fahrzeugs ausgegangen IFEU 2011

Die Zahl der Elektrofahrzeuge ist heute noch gering, Anfang 2011 waren in Deutschland gut 2300 Elektrofahrzeuge zugelassen ([KBA 2011]). Erst zukünftig gewinnt die Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen also an Bedeutung für die Umweltwirkung des gesamten Straßenverkehrs. Für 2020 hat der Nationale Entwicklungsplan ([Bundesregierung 2009]) das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen auf Deutschlands Straßen gesetzt, 2030 sollen es über fünf Millionen Fahrzeuge sein. Das entspräche z.B. fast 12 % des Pkw-Bestandes.

Gleichzeitig ist bis 2030 auch von einem erheblichen Entwicklungspotenzial bei Batterien und Elektrofahrzeugen auszu-

gehen. Die Bandbreite der möglichen Entwicklung ist jedoch groß, daher wird das Bezugsjahr 2030 in Szenarien einer konservativen, einer moderaten und einer innovativen Entwicklung betrachtet.

Die drei Szenarien ermöglichen damit eine vergleichende perspektivische Betrachtung der untersuchten Antriebskonzepte: Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, Elektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge. Dazu werden Annahmen bezüglich der zukünftigen Fahrzeugherstellung und Batterieentwicklung gemacht sowie Effizienzverbesserung im Antriebsstrang und ein Ausbau erneuerbarer Energien im Strommix unterstellt (siehe Tab. 3).

Tab. 3: Szenarioannahmen

	Fahrzeug	Batterie	Nutzung
Konservativ	Strommix 2030 für Fertigung	Energiedichte 100 Wh/kg	Jeweils leichte Verbesserung der Fahrzeugparameter und damit des Energieverbrauchs
Moderat	Zusätzlich Aluminium Leichtbau	Energiedichte 150 Wh/kg*	
Innovativ	Zusätzlich Downsizing	Energiedichte 200 Wh/kg*	

* Zusätzlich verbesserte Dauerhaltbarkeit: 1 Batterie über den Lebensweg des Fahrzeugs IFEU 2011

5 Umweltbilanz Elektromobilität

5.1 Betrachtung der heutigen Situation

5.1.1 Batterie-elektrische Pkw haben über den Lebensweg (inkl. Fahrzeugherstellung und Energiebereitstellung) bei Nutzung des deutschen Strommix eine ähnliche Klimabilanz wie konventionelle Pkw, Stadt- und Gewerbefahrzeuge schneiden tendenziell etwas besser ab.

Die Klimawirkungen batterieelektrischer Pkw (BEV), die mit dem heute durchschnittlichen Strommix in Deutschland betrieben werden, liegen bei gemischter Nutzung, die auch Fahrten auf Landstraßen und Autobahnen enthält (Standard Pkw in Abb. 10), etwa zwischen dem Otto- und Diesel-Pkw. Es zeigen sich leichte Vorteile gegenüber Otto-Pkw und leichte Nachteile gegenüber 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 – unabhängig von der Fahrzeuggröße.

Bei konventionellen Fahrzeugen geht die Klimawirkung 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 der Elektrofahrzeuge kommt aus der Strombereitstellung (64 %) und ist damit indirekt ebenfalls durch die Nutzungsphase bedingt. Der Energieverbrauch eines

mittleren Elektro-Pkw liegt heute im Stadtverkehr bei gut 21 kWh/100 km, auf Autobahnen bei fast 27 kWh/100 km. Dies liegt am dort deutlich höheren physikalischen Energiebedarf bei gleichbleibender Effizienz des Antriebsstrangs. Berücksichtigt werden dabei reale Fahrmuster und Nebenaggregate wie Klimaanlagen.

Über den Lebensweg tragen heute auch die Herstellungsaufwendungen mit einem Anteil von über 30 % relevant zur Klimawirkung bei. Die Herstellung schlägt bei einer angenommenen Nutzung von 1,5 Batterien über den Lebensweg eines mittleren Pkw, mit fast 11 Tonnen Treibhausgasemissionen zu Buche und liegt damit etwa doppelt so hoch wie beim konventionellen Referenzfahrzeug (knapp 6 Tonnen). Fahrzeugentsorgung und -wartung spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Elektrofahrzeuge, die vornehmlich im Stadtbereich eingesetzt werden (City Pkw in Abb. 10), können zusätzliche Effizienzvorteile in der Nutzungsphase erzielen. Hier wurde ein kleiner Pkw angenommen, der als Zweitwagen jedoch eine niedrigere Lebensfahrleistung von 120.000 km hat. Trotz der damit schlechteren Abschreibung der Batterieherstellung liegt die Klimawirkung etwa 17 % niedriger als beim Otto-Pkw und ist etwa vergleichbar mit dem Diesel-Pkw.

Die absolute Klimabilanz des City-BEV ist pro km aufgrund der niedriger angenommen Lebensfahrleistung jedoch ungünstiger beim kleinen Standard-Pkw, da Fahrzeug- und Batterieherstellung auf

weniger Fahrleistung abgeschrieben werden. In gewerblicher Nutzung (Taxi, Kundendienst etc.) sind auch höhere Fahrleistungen im Stadtbereich denkbar. Das Beispiel eines großen Pkw mit 200.000 km Lebenslaufleistung zeigt dann auch Vorteil gegenüber dem Diesel-Pkw (8 %).

Die wesentlichen Parameter einer günstigen Klimabilanz von Elektrofahrzeugen aus der Nutzungsperspektive sind daher

städtische Nutzung und hohe Fahrleistungen. 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. Gegenüber Diesel-Pkw ergeben sich für ein Stadt-BEV Vorteile ab etwa 100.000 km.

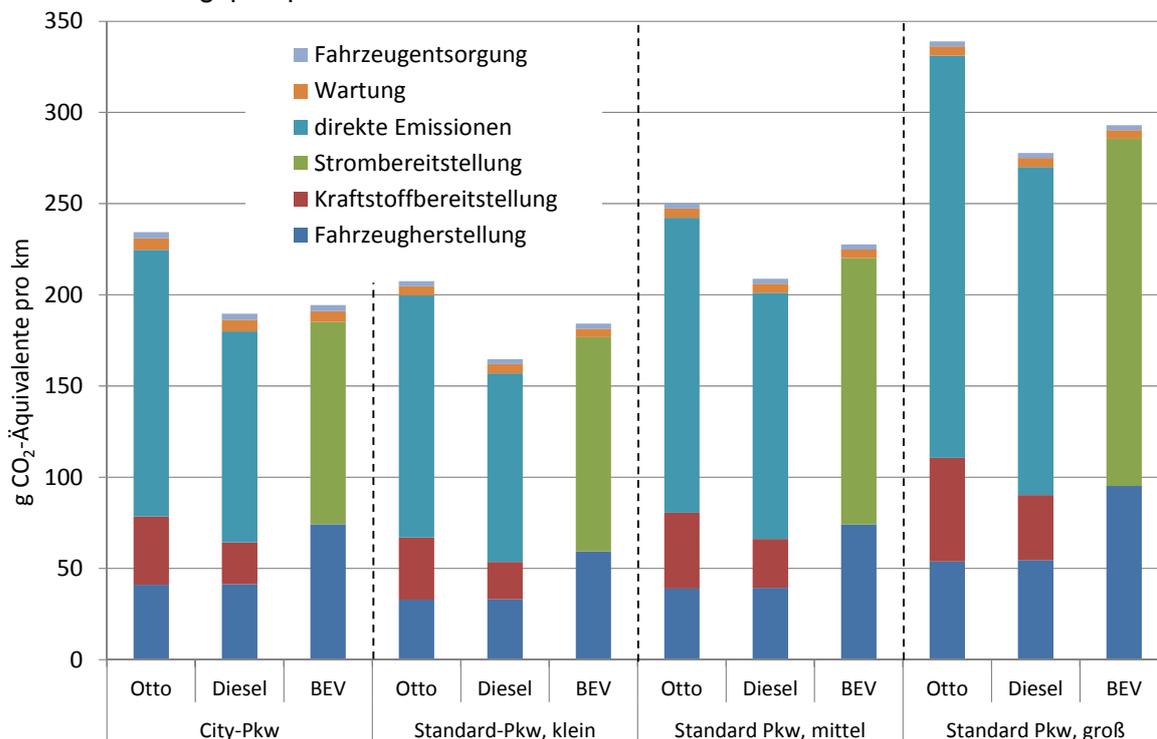


Abb. 10: Klimabilanz von Pkw für verschiedene Nutzungsmuster (2010)

5.1.2 Die Klimabilanz von Elektro-Pkw hängt stark von der Lebensfahrleistung und vom Strommix ab: Bei Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Energie haben Elektrofahrzeuge in ihrer Klimawirkung deutliche Vorteile gegenüber konventionellen Fahrzeugen – sogar wenn diese Biokraftstoffe tanken.

Bei Nutzung des heute durchschnittlichen deutschen Stroms wird die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen über den Lebensweg trotz zusätzlicher Klimawirkung der Batterieherstellung von der Nutzungsphase dominiert. Dabei ist der Strommix ein entscheidender Einflussparameter: Müssen z.B. neue Kraftwerke gebaut bzw. ältere genutzt werden um die zusätzlichen Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge zu befriedigen, führt

dies im Fall von Steinkohlekraftwerken zu einer deutlich höheren Klimawirkung über den Lebensweg (siehe Abb. 11). Werden dagegen für die zusätzliche Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen moderne Gaskraftwerke gebaut, verbessert sich die Klimabilanz.

Elektrofahrzeuge erlauben zu dem den Einsatz zahlreicher erneuerbarer Energieträger im Verkehr, die bisher nicht zur

Verfügung standen. Damit verbessert sich die Klimabilanz der Nutzungsphase

deutlich.

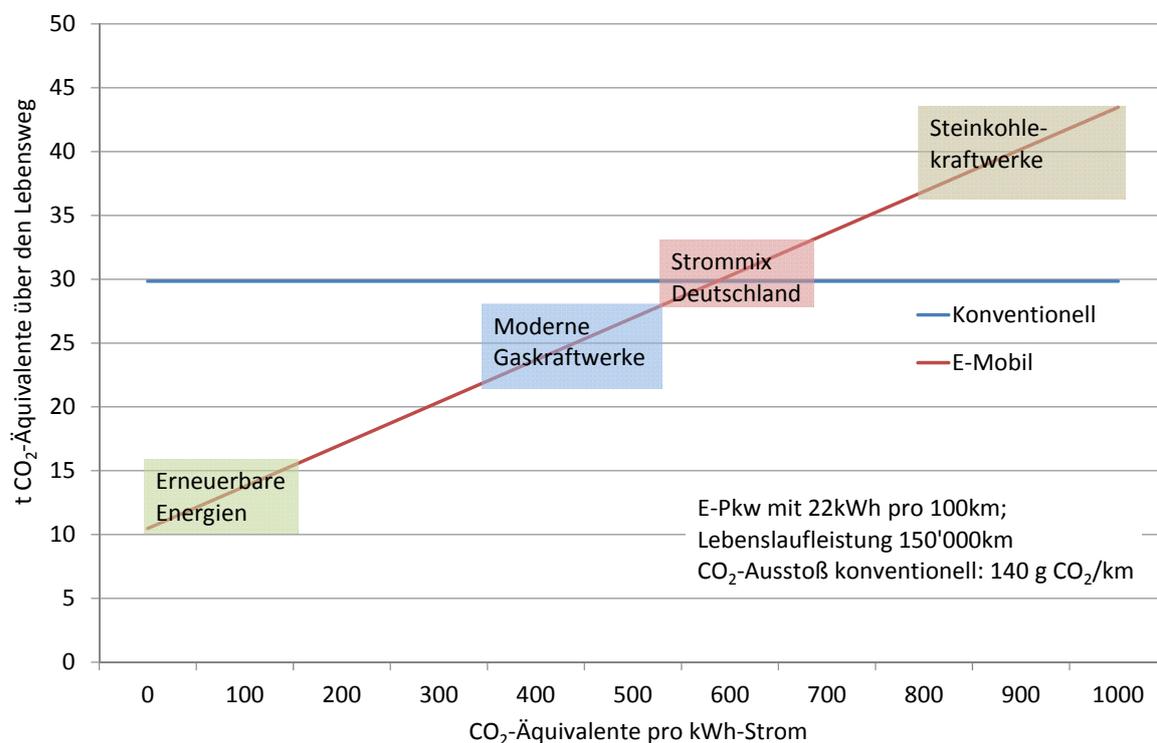


Abb. 11: Klimawirkung eines mittleren Elektro-Pkw über den Lebensweg nach Klimawirkung des genutzten Stroms

Die gegenüber konventionellen Pkw insbesondere durch die Batterie höhere Klimawirkung der Fahrzeugherstellung stellt heute einen relevanten „Geburtsnachteil“ des Elektrofahrzeugs dar. Dieser kann durch den effizienten Antrieb und den Einsatz erneuerbarer Energien in vielen Fällen ausgeglichen werden. Über den gesamten Lebensweg ist die Klimabilanz eines mit deutschem Strommix betriebenen und gemischt genutzten batterieelektrischen Pkw gegenüber einem Otto-Pkw bei einer Fahrleistung von etwa 100.000 km ausgeglichen (siehe Abb. 12). Bei Diesel Pkw ist die Klimawirkung in der Nutzungsphase aufgrund des höheren Wirkungsgrades des Dieselmotors geringer, die Batterieherstellung kann daher bei gemischter Nutzung gegenüber Diesel-Pkw erst ab Fahrleistungen über 200.000 km ausgeglichen werden.

Bei Nutzung von erneuerbaren Energien aus zusätzlichen Anlagen (z.B. Wind-

kraft) verbessert sich die Klimabilanz deutlich: Bereits nach etwa 30.000 km ist die zusätzliche Klimawirkung der Batterieherstellung gegenüber einem konventionellen Pkw mit fossilem Kraftstoff kompensiert (siehe Abb. 12). Wichtig für die Anrechnung des Windstroms für die Bilanz des Elektrofahrzeugs ist jedoch, dass es sich um zusätzliche Anlagen handelt, die ohne den Betrieb von Elektrofahrzeugen nicht installiert worden wären.

In diesem Fall ist die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen auch deutlich günstiger als die von konventionellen Fahrzeugen, die Biokraftstoffe tanken. Durch landwirtschaftliche Prozesse sind mit der Bereitstellung von Biokraftstoffen in der Regel eine relevante Klimawirkung und höhere Umweltwirkungen im Bereich der Versauerung und Eutrophierung (z.B. durch Düngung) verbunden. Weiterhin kommt es zu Nutzungs- und Flächenkonkurrenzen, die bei der Erzeugung er-

neuerbaren Stroms kaum eine Rolle spielen.

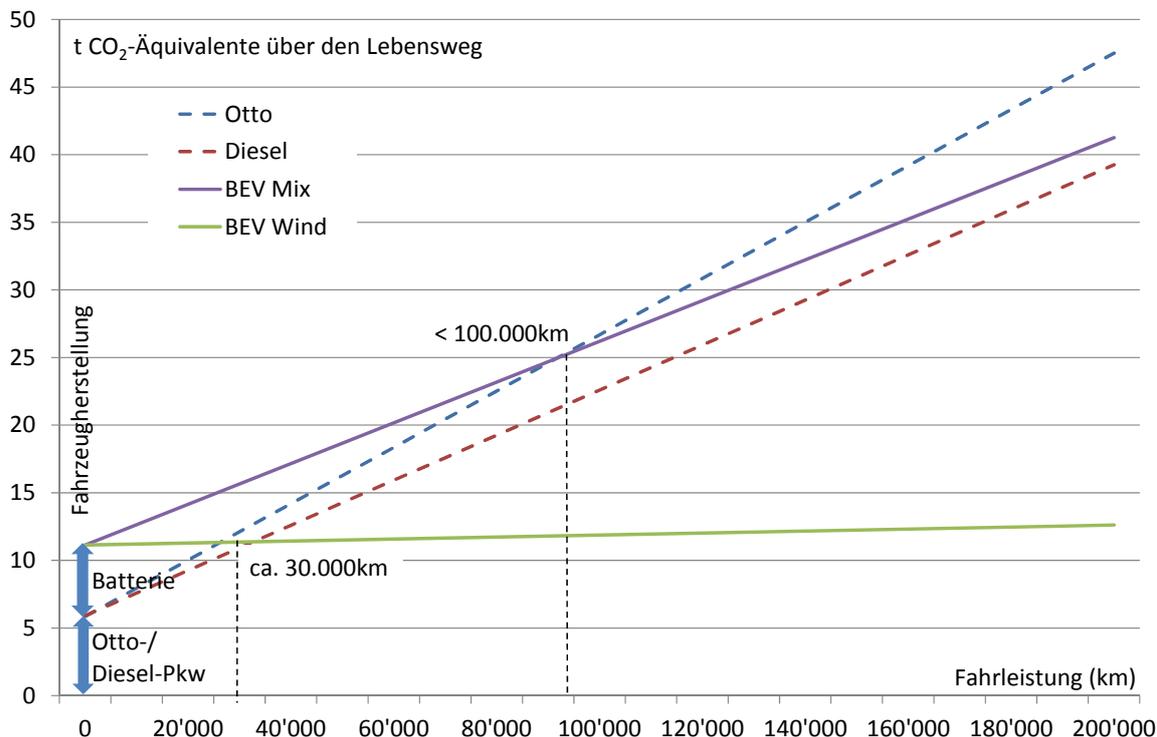


Abb. 12: Treibhausgasemissionen eines mittleren Elektro-Pkw über den Lebensweg nach Fahrleistung für verschiedene Kraftwerkstypen

5.1.3 Im Wirtschaftsverkehr (z.B. bei Lieferfahrzeugen) zeigen sich auch bei Nutzung des deutschen Strommix Vorteile in der Klimawirkung - bei intensiver Nutzung bis zu 13 %. Besonders wirkt sich hier die hohe Effizienz des elektrischen Antriebsstrangs in Innenstädten bei gleichzeitig hoher Fahrleistung im Wirtschaftsverkehr aus.

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. Leichte Nutzfahrzeuge werden daher als rein städtische Lieferfahrzeuge mit Dieselmotor betrachtet.

Die tägliche Fahrleistung solcher Fahrzeuge schwankt stark, nach Nutzerangaben zwischen 20 und 80 km. Dies bestätigen auch die Daten aus dem Feldversuch. Im städtischen Lieferverkehr ist die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen jedoch schon bei leichter Nutzung

(100.000 km Lebenslaufleistung) vorteilhaft gegenüber dem Referenzfahrzeug mit Dieselmotor. 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 zusätzlichen Treibhausgasemissionen 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 (Abb. 13).

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. Tourendisponierung) be-

günstigt werden. Da es sich im Wirtschaftsverkehr häufig um Fahrzeugflotten handelt, können die Elektrofahrzeuge bevorzugt für Stadtfahrten mit ihrer Reichweite entsprechender Fahrstrecke eingesetzt werden.

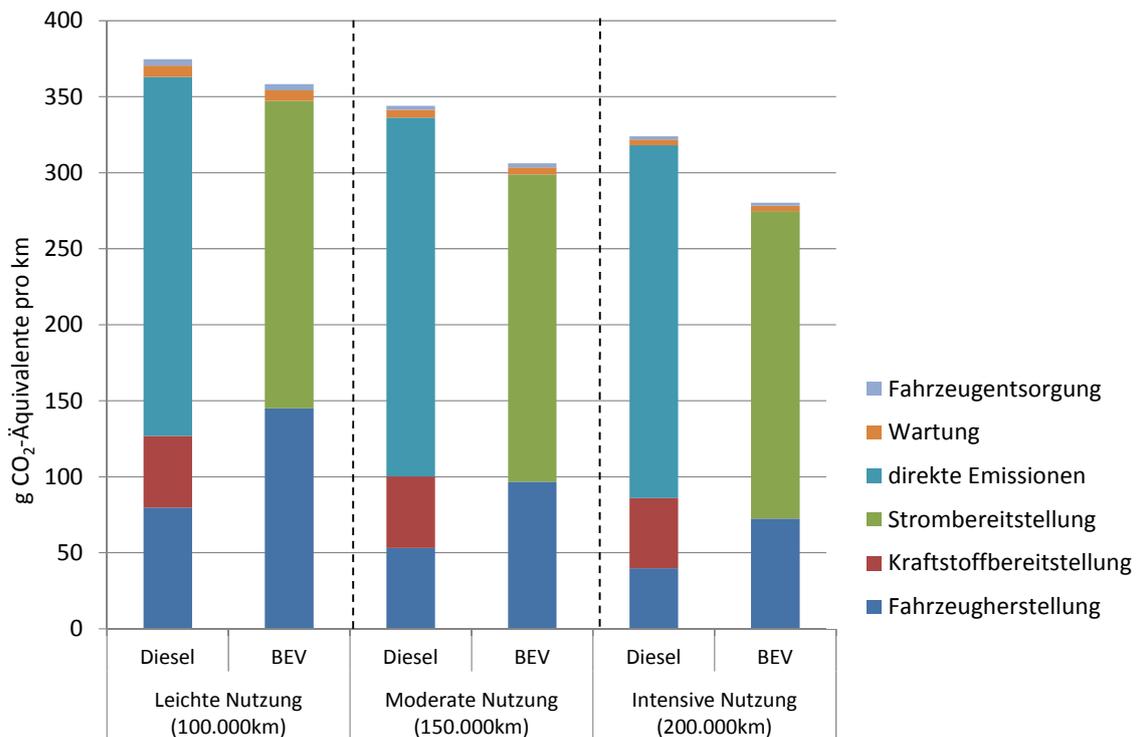


Abb. 13: Klimawirkung eines städtischen Lieferwagens über den Lebensweg (2010)

5.1.4 Fahrzeuge mit einem Benzin-Motor als Range-Extender haben eine Klimabilanz, die bei Nutzung des deutschen Strommix mit rein batterieelektrischen Fahrzeugen vergleichbar ist. Sie erlauben dazu ein unverändertes Mobilitätsverhalten.

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 wurde aufgrund des geringeren Gewichts und der niedrigeren 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 je-

doch zahlreiche konzeptspezifische Hinweise und Daten zur Ableitung der verschiedenen Betriebsmodi verwendet werden, die eine vergleichende Umweltbilanz ermöglichen.

Die Batteriekapazität wurde beim RE-Fahrzeug mit 12 kWh nur halb so hoch angesetzt wie beim rein batterieelektrischen Fahrzeug. Die Herstellungsbilanz fällt dadurch günstiger aus: Beim mittleren RE-Pkw liegen die Treibhausgasemissionen mit 1,5 Batterien über den Lebensweg bei etwa 9 Tonnen (gegenüber 11 Tonnen für das BEV).

Der Energieverbrauch von RE-Pkw ist im elektrischen Betrieb etwa vergleichbar mit einem reinen Elektro-Pkw. Das geringere Batteriegewicht wird durch den zusätzlichen Antriebsstrang etwa kompensiert. Im verbrennungsmotorischen Betrieb ist der Verbrauch vergleichbar mit dem Otto-Pkw, der Gewichtsnaheile kann durch Rückspeisung und Effizienzgewinne durch seriellen Betrieb im Stadtverkehr ausgeglichen werden.

Für die Umweltbilanz ist damit besonders relevant, welcher Fahrleistungsanteil in den verschiedenen Straßenkategorien verbrennungsmotorisch erbracht werden muss. Diese Anteile sind stark abhängig vom individuellen Nutzerprofil, untersucht werden zwei Fallbeispiele:

- Ein mittlerer RE-Pkw wird mit 150.000 km Lebensfahrleistung angenommen und erreicht dabei eine rein elektrische Fahrleistung von etwa 70 %, größtenteils im Innerortsbereich.
- Zusätzlich wird eine Fahrleistung von 200.000 km betrachtet. Der Anteil des elektrischen Betriebs liegt dann bei nur 54 %, da mehr Fernstrecken zurückgelegt werden.

Die Klimabilanzen zeigen Vorteile gegenüber dem Otto-Pkw von etwa 20 %

und sind mit denen von 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 zu höheren Treibhausgasemissionen führt als der elektrische Betrieb (Abb. 14).

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

RE-Pkw haben damit 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 ähnlich der Bilanz von Diesel-Pkw, kann aber durch Nutzung erneuerbaren Stroms weiter verbessert werden und liegt dann deutlich unter der von konventionellen Pkw (siehe Abb. 14).

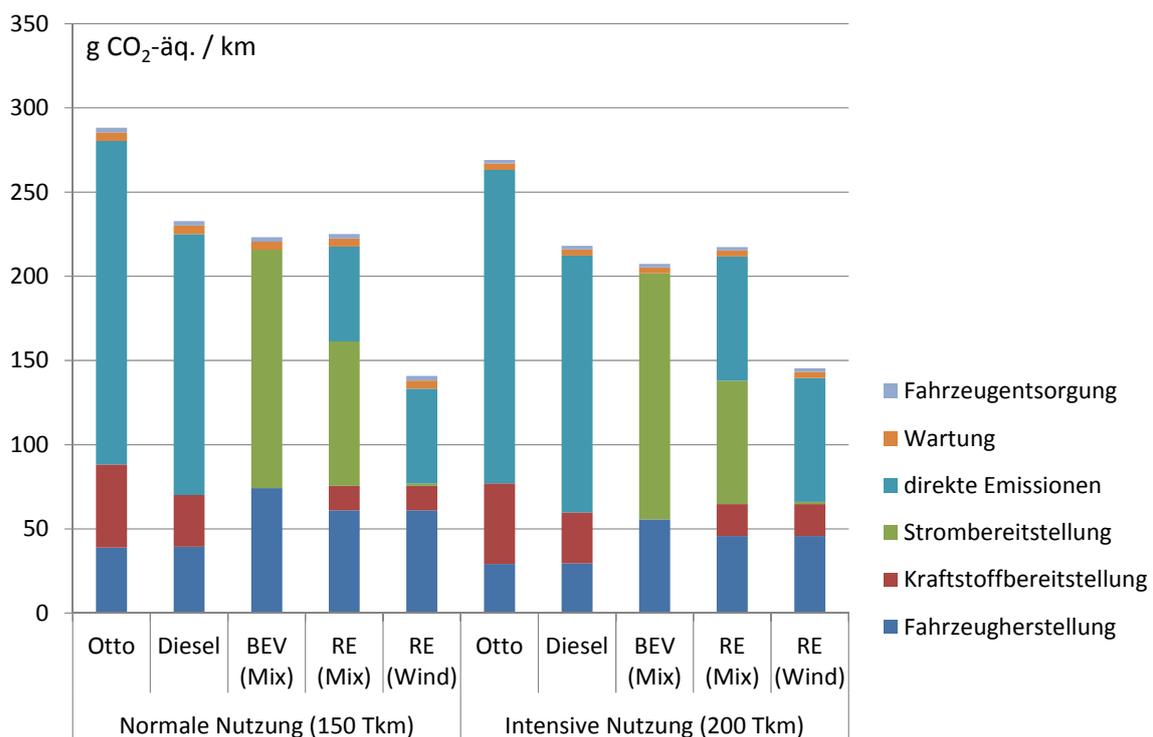


Abb. 14: Klimawirkung eines Elektro-Pkw mit Otto-Motor als Range-Extender (Strommix 2010)

5.1.5 Kontaktloses Laden erhöht die Treibhausgasemissionen eines mittleren Elektrofahrzeugs über den Lebensweg um etwa 5 Tonnen, insbesondere durch den niedrigeren Wirkungsgrad bei der Übertragung. Die Vorteile liegen im Bereich der Sicherheit und des Komforts.

Der Ladevorgang heutiger Elektrofahrzeuge wird in der Regel mit einem Stromkabel und Stecker durchgeführt. Dies bringt jedoch auch Sicherheitsprobleme mit sich: „Herumhängende Kabel können zu Stolperfallen werden, Ladesäulen im öffentlichen Raum bieten ein leichtes Ziel für Vandalismus und Sabotage“ ([VDI 2011]). Kabelloses, also kontaktloses Laden erhöht hier diese Sicherheit und natürlich auch den Bedienkomfort. Außerdem wird die Batterie tendenziell auch über eine längere Zeit mit dem Netz verbunden und kann entsprechend schonend geladen werden. Perspektivisch können Elektrofahrzeuge so auch besser einen relevanten Beitrag zur Integration fluktuierender erneuerbarer Energien leisten.

Auf der anderen Seite stehen höhere Umweltwirkungen durch die Ladeinfra-

struktur, höheres Fahrzeuggewicht und Verluste bei der kontaktlosen Energieübertragung. Diese Effekte wurden im Rahmen von UMBReLA auf Basis von Angaben aus den Forschungsprojekten näherungsweise quantifiziert.

Es zeigt sich, dass kabelloses Laden mit relevanten zusätzlichen Umweltwirkungen verbunden ist, die vor allem auf den niedrigeren Wirkungsgrad der Energieübertragung zurückgehen: Insgesamt entstehen heute über den Lebensweg fast 5 Tonnen zusätzliche Treibhausgasemissionen durch kabelloses Laden. Der größte Teil dieser zusätzlichen Belastung geht bei einem angenommenen Gesamtladewirkungsgrad von 75 % (gegenüber 90 % für Laden per Kabel) auf den niedrigeren Ladewirkungsgrad zurück. Perspektivisch verringert sich diese Zusatz-

belastung bis 2030 auf 1,7 t CO₂-Äquivalente.

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 überschüssiger Windstrom durch die zusätzliche Zeit der Pkw am Stromnetz integriert werden. Dies entspricht etwa 34.000 km oder 23 % der angenommenen Gesamt-

fahrleistung 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

Die Ergebnisse hängen jedoch stark vom angenommen Übertragungswirkungsgrad ab, wie die Sensitivitätsbetrachtung in Abb. 15 zeigt. Eine weitergehende Analyse muss darüber hinaus in Betracht ziehen, ob 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.

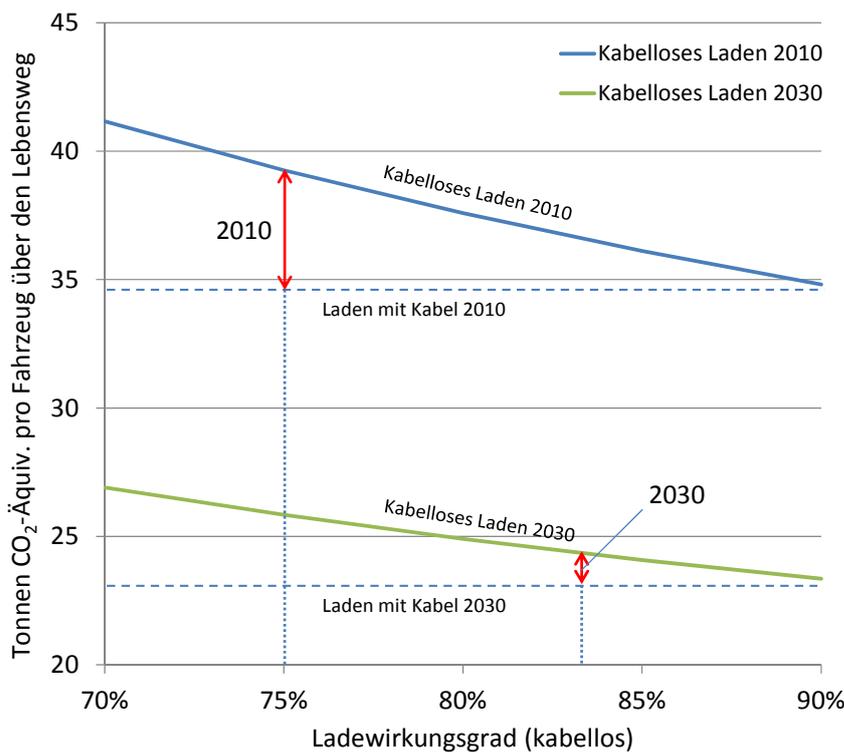


Abb. 15 :Klimabilanz eines mittleren Pkw über den Lebensweg mit und ohne kontaktloses Laden nach Ladewirkungsgrad (Strommix Deutschland)

5.2 Betrachtung der Entwicklungsperspektiven von Elektrofahrzeugen

5.2.1 Die Treibhausgasbilanz von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen wird sich mit dem Ausbau erneuerbarer Energien tendenziell verbessern.

Heute ist die Klimabilanz von Elektro-Pkw über den Lebensweg (150.000 km) bei Nutzung des deutschen Strommix etwa vergleichbar mit konventionellen Fahrzeugen. Zukünftig werden sich beide Konzepte verbessern:

- Bezüglich des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen sehen die 2009 beschlossenen EU-Grenzwerte ([EU 2009b]) vor, dass zwischen 2012 und 2015 schrittweise ein Grenzwert von 120 g CO₂/km bzw. fahrzeugeitig 130 g CO₂/km eingeführt wird.
- Elektrofahrzeuge und Batterien stehen noch am Anfang ihrer Entwicklung für den Mobilitätsbereich. Daher gibt es noch vielfältige Verbesserungsmöglichkeiten, die in drei Szenarien abgebildet wurden: einem konservativen, einem moderaten und einem innovativen Szenario (siehe Abschnitt 4.4).

Das Beispiel eines mittleren Pkw (Abb. 16) zeigt bereits im konservativen Szena-

rio 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 Elektrofahrzeugen, insbesondere der Batterie, 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 %.

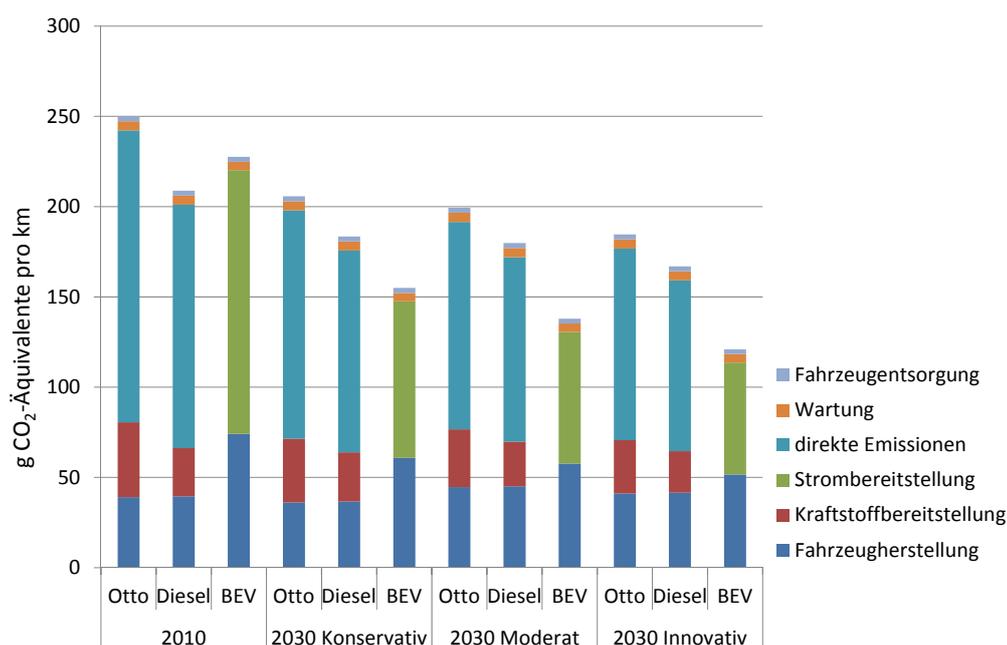


Abb. 16: Klimabilanz mittlerer Pkw mit verschiedenen Antrieben (Szenarien für 2030)

5.2.2 Die zusätzliche Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge birgt die Gefahr, dass verstärkt fossile Kraftwerke (als Grenzkraftwerke) eingesetzt werden – eine Kopplung des Ausbaus von Elektromobilität und mit einem Ausbau erneuerbarer Energien ist daher notwendig.

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 [Pehnt et al. 2011] verschiedene Szenarien zum Betankungsstrommix als Marginalbetrachtung abgeleitet, die auf einer Nachfrage von 12 Millionen Elektrofahrzeugen beruhen:

- **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 vergleichmäßigt 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 Erzeu-

gung an Fahrstrom erforderlich ist (Szenario „DSM+EE“).

Die Auswirkungen dieser Szenarien zum Betankungsstrommix auf die Klimabilanz über den Lebensweg (150.000 km) werden am Beispiel des mittleren Elektro-Pkw nach moderatem Szenario dargestellt (Abb. 17). 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 %. Durch die Verstetigung des Ladevorgangs werden vor allem Kraftwerke mit niedrigen Betriebskosten genutzt, hier Steinkohlekraftwerke. Durch diese relevante Verschiebung der Stromerzeugung von modernen Gas-Kraftwerken hin zu Steinkohlekraftwerken, ist die Klimawirkung der Strombereitstellung pro kWh 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) reduzieren sich die mit der Strombereitstellung verbundenen Treibhausgasemissionen. Das Ziel einer klimaneutralen Betankung wird dann fast erreicht.

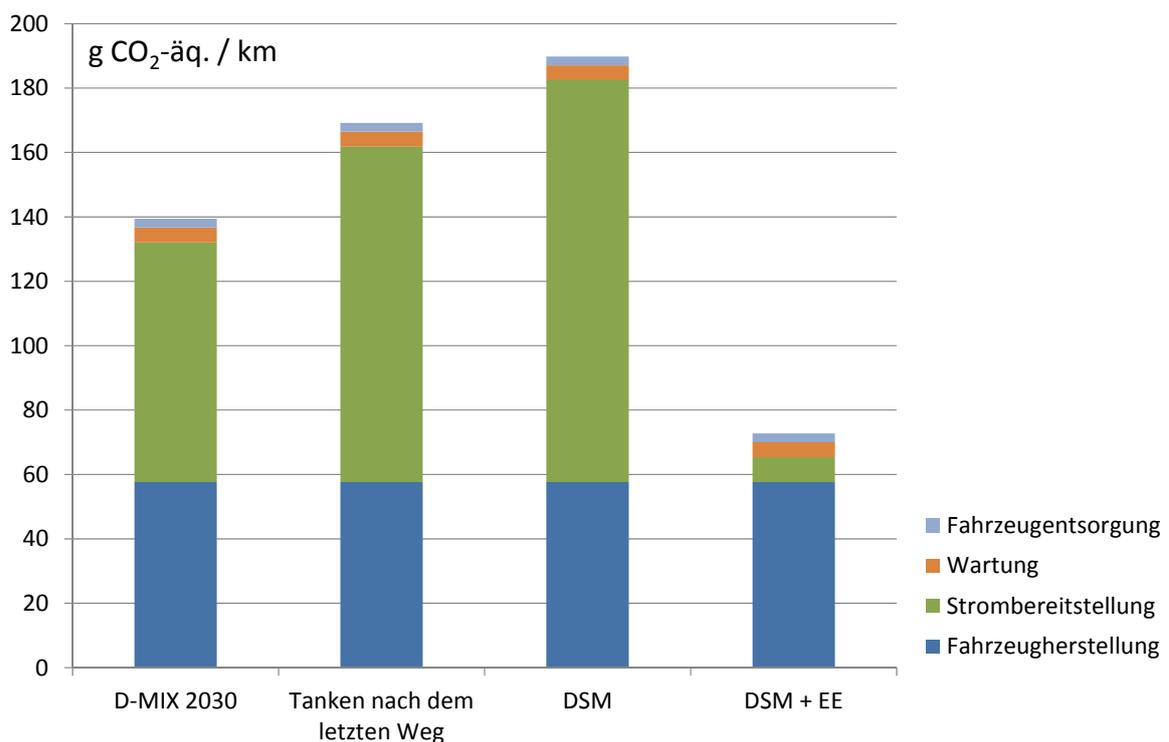


Abb. 17: Klimabilanz eines mittleren Elektro-Pkw nach Betankungsstrommix

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“.

5.2.3 Weitere Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen wie Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog und Feinstaubemissionen werden über den Lebensweg heute und zukünftig vorwiegend durch die Fahrzeug-, insbesondere die Batterieherstellung verursacht.

Die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen steht im Fokus der öffentlichen und politischen Diskussion und wird stark durch die Nutzungsphase beeinflusst. Bei anderen Umweltwirkungen wie Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog und den Feinstaubemissionen wird die Bilanz des Elektrofahrzeugs durch die Fahrzeugherstellung dominiert.

Diese trägt bei der Versauerung 70 %, bei der Eutrophierung 54 % und beim Sommersmog sogar 75 % zu den Um-

weltwirkungen über den Lebensweg bei (Abb. 18). Dadurch haben Elektrofahrzeuge bei der Versauerung heute deutliche Nachteile gegenüber konventionellen Pkw, obwohl diese auch erhebliche direkte Emissionen verursachen.

Die Schadstoffemissionen gehen überwiegend auf die Batterieherstellung zurück und werden dort durch die Zellmaterialien bestimmt. Perspektivisch verringern sich die mit der Batterieherstellung verbundenen Umweltwirkungen in den

Szenarien für 2030 zwar absolut. Durch den höheren Anteil erneuerbarer Energien bleibt der Anteil der Fahrzeuher-

stellung in den Bilanzen über den Lebensweg jedoch gleich oder steigt sogar an.

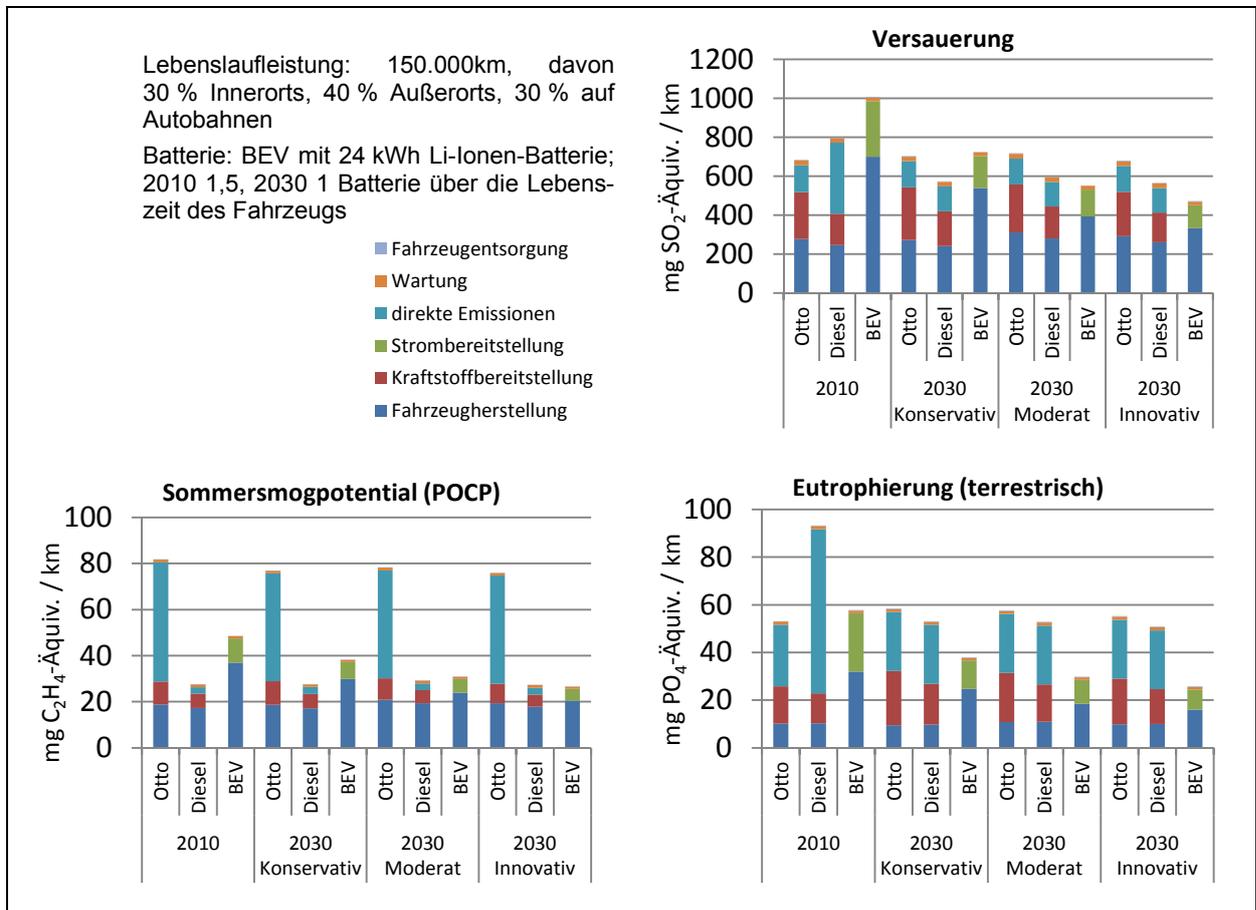


Abb. 18: Umweltwirkungen eines mittleren Pkw in Szenarien (2030)

6 Systembetrachtung Wasserstoff

6.1 Umweltbilanz Wasserstoff

Parallel zur dynamischen Entwicklung der Batterie gestützten Elektromobilität werden elektrische Antriebe auf Wasserstoffbasis in Forschung, Entwicklung und Pilotserie untersucht. Im Rahmen von

UMBReLA wurde daher eine umfassende Systembetrachtung von Wasserstoff durchgeführt. Diese zeigt die perspektivische Umweltbilanz gegenüber Elektrofahrzeugen für das Bezugsjahr 2030.

6.1.1 Die Klimawirkung der Herstellung von Brennstoffzellenfahrzeugen ist vergleichbar mit batterieelektrischen Fahrzeugen – die Batterieherstellung verursacht im Szenario für 2030 ähnliche Treibhausgasemissionen wie die Brennstoffzellenherstellung.

Der Fokus der Bilanzierung lag auf den gegenüber Elektrofahrzeugen differierenden Komponenten. Fahrzeugrumpf, Motor und elektrische Zusatzbauteile werden analog dem mittleren batterieelektrischen 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. Die antriebsspezifischen Fahrzeugkomponenten Wasserstofftank und

Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) werden zusätzlich bilanziert.

Die mit der Herstellung eines Brennstoffzellen-Pkw der Kompaktklasse verbundenen Umweltwirkungen unterscheiden sich von anderen Antriebskonzepten vor allem durch den Brennstoffzellen-Stack. Die Klimabilanz des Stacks entspricht etwa der Li-Ionen-Batterie im moderaten Szenario. Damit ist die gesamte Herstellungsbilanz 2030 vergleichbar mit batterieelektrischen Fahrzeugen.

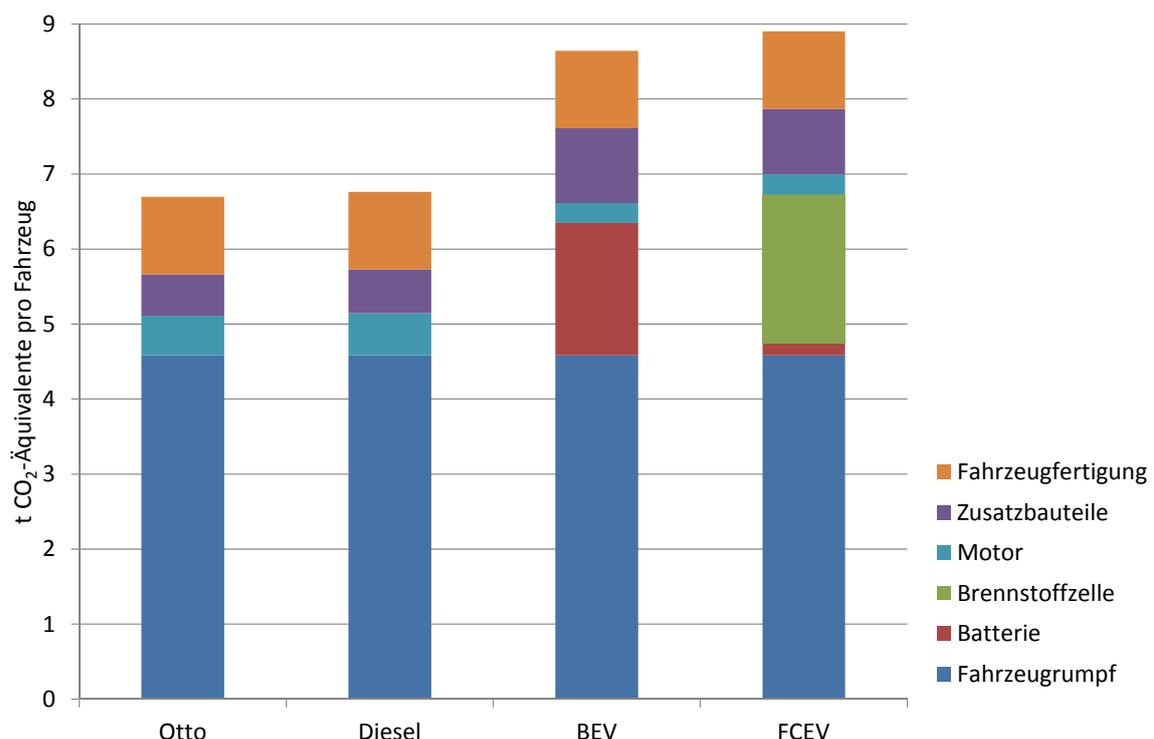


Abb. 19: Klimawirkung der Herstellung eines mittleren Pkw
UMBReLA-Ergebnisbericht

6.1.2 Der Einsatz von Platingruppenmetallen hat großen Einfluss auf die Versauerungswirkung und das Potenzial zur Sommersmogbildung, es gibt aber Optimierungsmöglichkeiten.

Der Einsatz von Platingruppenmetallen (PGM) in der Brennstoffzelle verursacht auf Grund der Gewinnung der PGM aus sulfidischen Erzen eine starke Versauerungswirkung und so genannte Photooxidantien, die zur Sommersmogbildung beitragen. Durch eine Minderung des PGM-Einsatzes oder die Verwendung von Sekundär-PGM lassen sich sowohl die Luftschadstoffe mit versauernder Wirkung als auch die Systemkosten der Brennstoffzelle reduzieren. Sowohl bezüglich des Platineinsatzes als auch bezüglich des Einsatzes von Sekundärplatin bestehen Unsicherheiten, deren Auswirkungen auf die Versauerung und Sommersmogbildung im Rahmen einer Sensitivitätsbetrachtung aufgezeigt werden (Abb. 20).

Für die Brennstoffzellenherstellung wurde ein Anteil von 90 % Sekundärplatin

unterstellt. Liegt der Sekundäranteil bei nur 60 %, verdoppeln sich die Umweltwirkungen der Brennstoffzellenherstellung und steigen die Emissionen der gesamten Fahrzeugherstellung um etwa 50 %.

Bezüglich der benötigten Masse an PGM wird eine zweite Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese berücksichtigt einen theoretisch minimalen Wert zur Aufrechterhaltung der elektrischen Leistungsfähigkeit, der auf rund 10 g PGM pro 70 kW-PEMFC abgeschätzt wird ([Grube et al. 2010]). Auch Hersteller wie GM Opel nennen 10 g PGM pro Fahrzeug bereits als Zielwert für 2020. Damit reduzieren sich die Umweltwirkungen der Brennstoffzellenherstellung auf etwa 20 %, die Wirkung der gesamten Fahrzeugherstellung wird etwa halbiert.

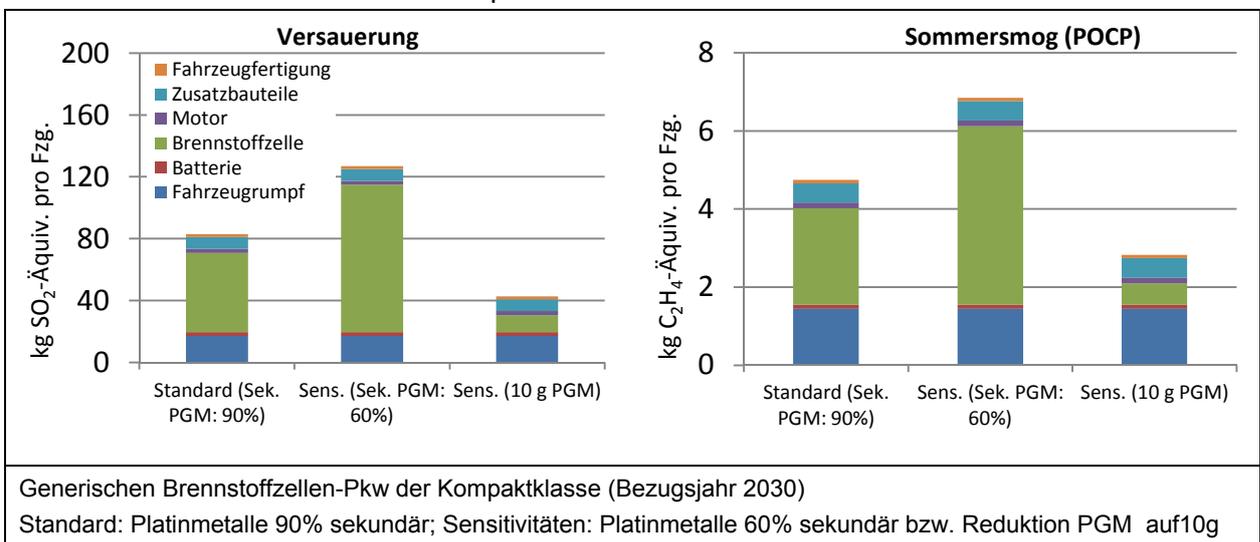


Abb. 20: Versauerungswirkung und Sommersmog-Potenzial der Herstellung eines Brennstoffzellen-Pkw

6.1.3 Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind lokal emissionsfrei wie auch batterieelektrische Fahrzeuge, haben aber einen schlechteren energetischen Wirkungsgrad.

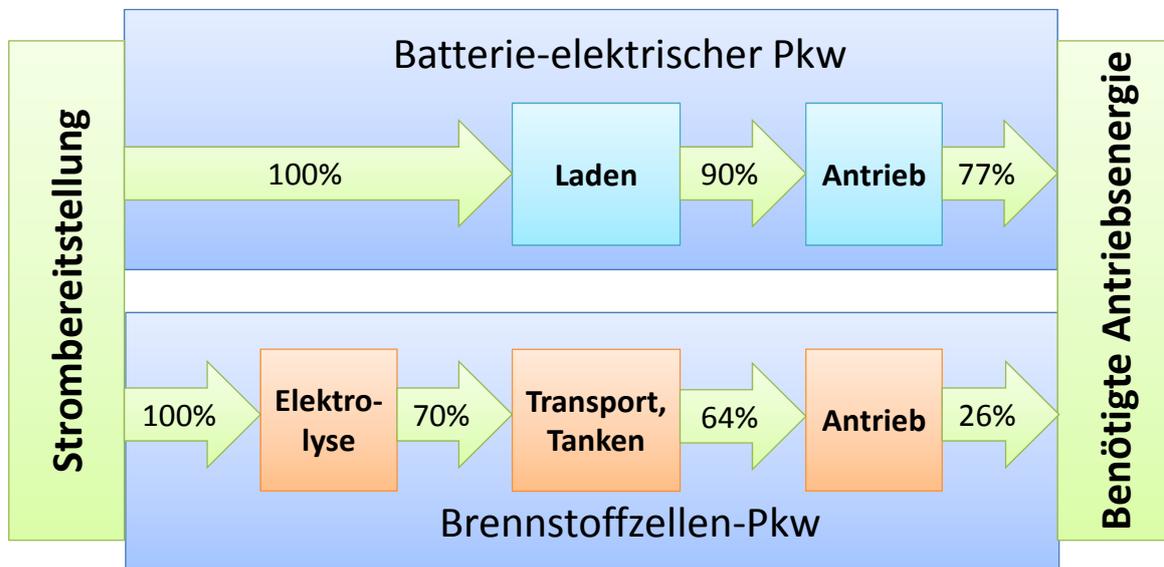


Abb. 21: Wirkungsgradbeispiel des elektrischen und H₂-Antriebsstrangs für einen Pkw (IFEU)

Der Tank-zu-Rad-Wirkungsgrad eines Brennstoffzellensystems von rd. 40 % ist zwar deutlich höher als der eines verbrennungsmotorischen Fahrzeuges. Im Vergleich zum BEV ist jedoch der Wirkungsgrad der Gesamtkette (Well-to-Wheel) auf Grund des zwischengeschalteten Umwandschritts Strom →

Wasserstoff → Strom einen Faktor zwei bis drei niedrigerer. Von 100 % elektrischer Energie kommen daher beim batterieelektrischen Pkw noch etwa 77 % am Rad an, beim Brennstoffzellen-Fahrzeug sind es jedoch nur noch etwa 26 % (Abb. 21).

6.1.4 Große Unterschiede in der Klimawirkung zeigen sich für die verschiedenen Bereitstellungspfade von Wasserstoff.

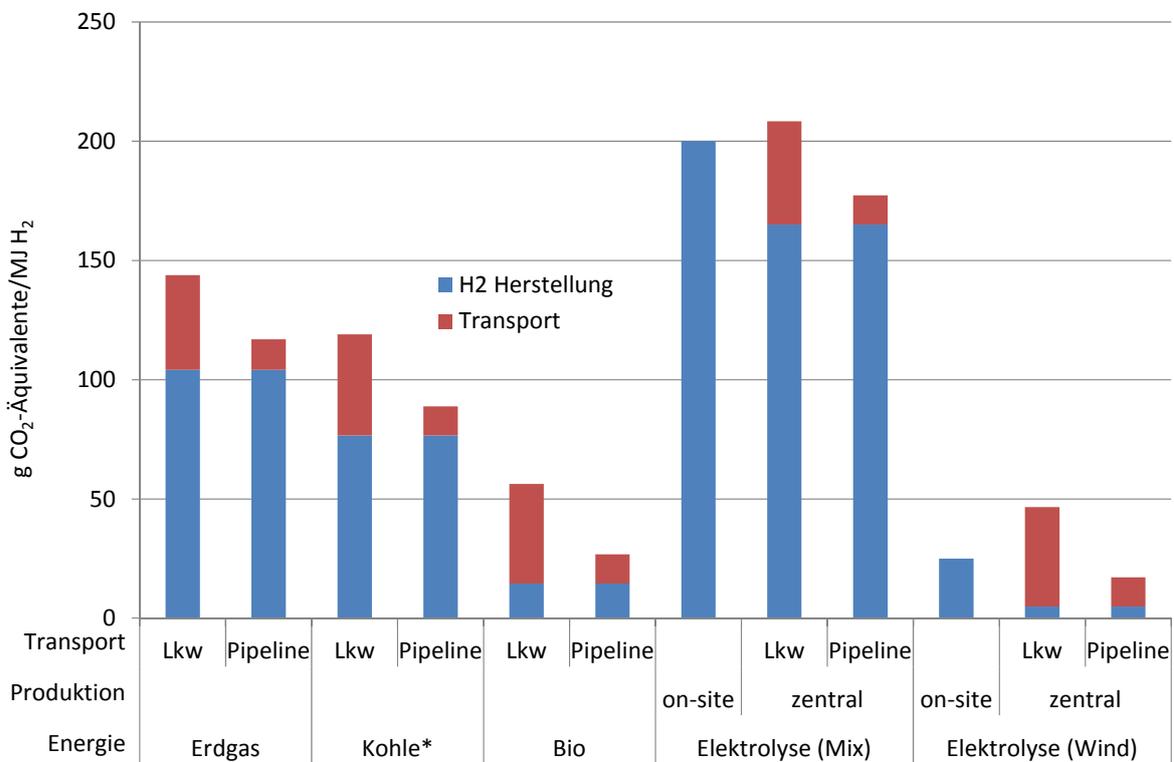


Abb. 22: Klimabilanz von Wasserstoffherstellung und Transport als Druck- oder Flüssigwasserstoff (2030)

Von entscheidender Bedeutung für die Klimawirkung der Wasserstoffbereitstellungskette sind der Energieträger und der Herstellungsprozess. Wird Wasserstoff aus fossilen Energien erzeugt, dann macht der Anteil des Herstellungsprozesses rund 90 Prozent der Treibhausgasemissionen entlang der H₂-Bereitstellungskette aus (Ausnahme: onsite, wo der Transport entfällt).

Bei der Elektrolyse ist der Strommix entscheidend: Werden zusätzlicher Windstrom oder andere erneuerbare Energieträger genutzt, dann liegen die THG-Emissionen etwa 90 Prozent niedriger als bei einer Wasserstoffproduktion mit dem bundesdeutschen Strommix. Die erkennbaren Mehremissionen beim Betrieb

der on-site Elektrolyseure (ohne Transport) sind auf den geringeren Anlagenwirkungsgrad dezentraler Anlagen zurückzuführen.

Bei der elektrolytischen Bereitstellung von Wasserstoff aus Windstrom verbleiben i. w. die Umweltwirkungen der Herstellung der Infrastruktur bzw. die Logistikkette. Der Unterschied zwischen der On-site-Bereitstellung und zentralen Versorgungskonzepten liegt in der erforderlichen Bereitstellungskette. Falls eine LKW-Logistik und eine dafür erforderliche Verflüssigung zu Grunde gelegt werden, führt der Energiebedarf der Verflüssigung zu deutlich steigenden Umweltlasten.

6.1.5 Die Klimabilanz von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Pkw ist bei Nutzung erneuerbarer Energiequellen gegenüber BEV mit deutschem Strommix 2030 günstiger und gegenüber BEV mit zusätzlichen erneuerbaren Energien geringfügig schlechter.

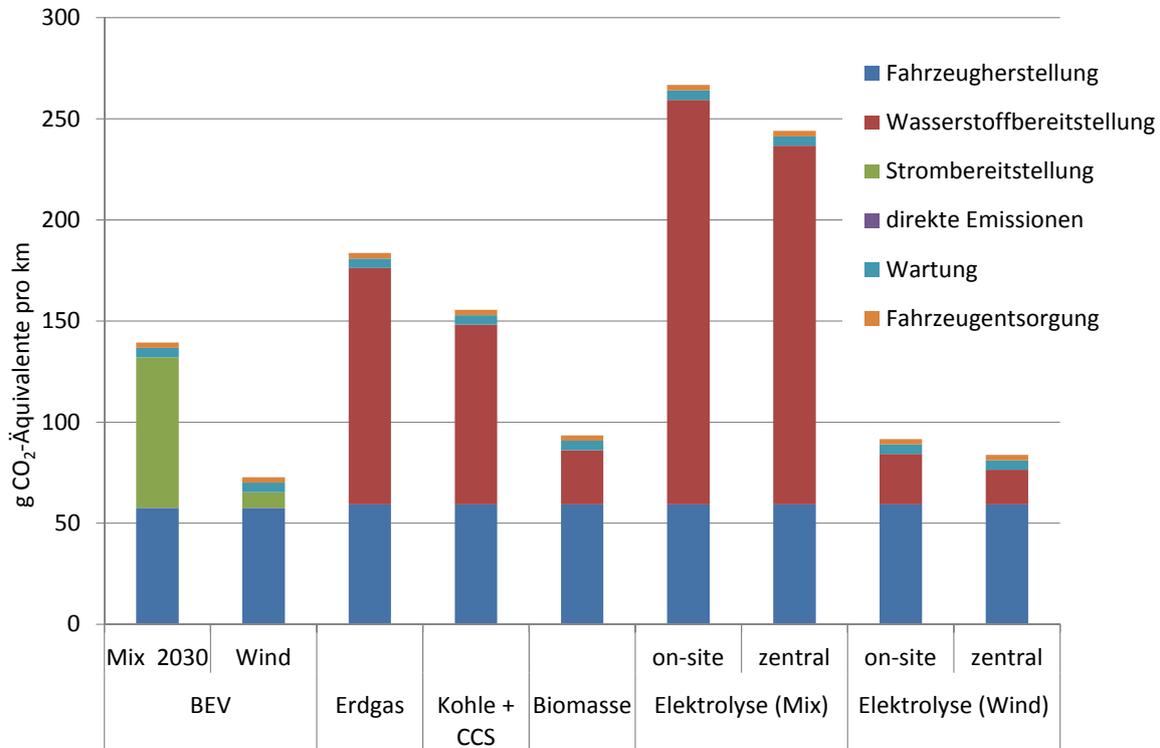


Abb. 23: Klimabilanz eines Brennstoffzellen-Pkw der Kompaktklasse (2030) (Wasserstoffdistribution mit Druckwasserstoff) im Vergleich zum BEV

Zwar ist die Klimawirkung der Fahrzeugherstellung für Brennstoffzellen-Fahrzeuge etwa vergleichbar mit batterieelektrischen Fahrzeugen. Die Treibhausgasbilanz der Wasserstoffbereitstellung ist bei fossilen Energierohstoffen (Gas, Kohle) bzw. dem Einsatz des Strommixes für die Elektrolyse jedoch ungünstiger als die für 2030 ermittelte durchschnittliche Strombereitstellung. Bei der Kohlevergasung ist der Unterschied aufgrund der bilanzierten CO₂-Abscheidung (CCS) bei Vernachlässigung von sehr langfristigen Leakage-Effekten jedoch gering. Dieser Pfad wird allerdings durch infrastrukturelle, Kosten- und Akzeptanz-Hemmnisse entscheidend beeinträchtigt.

Die Nutzung von Wasserstoff aus Elektrolyse unter Nutzung des gleichen, für 2030 ermittelten durchschnittlichen Strommixes zeigt die schlechteste Kli-

mabilanz – im Fall der dezentralen Anlage sind die Klimawirkungen des Brennstoffzellen-Pkw pro Kilometer dann nahezu doppelt so hoch wie beim BEV unter Nutzung des durchschnittlichen Strommixes.

Auf der anderen Seite ermöglichen erneuerbare Energiequellen wie Biomasse und Windstrom eine deutlich günstigere Bilanz. Die Klimabilanz für die Mobilität mit Wasserstoff aus zentraler Elektrolyse unter Nutzung von Windstrom ist dann auch nur geringfügig 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.

Für die anderen Umweltwirkungen zeigt sich ein differenzierteres Bild (Abb. 24).

Diese werden, mit Ausnahme des kumulierten Energieaufwandes, von der Fahrzeugherstellung dominiert. Höhere Versauerungsemissionen und höhere Auswirkungen beim Sommersmog ge-

genüber BEV sind auf die Brennstoffzellenherstellung (insbesondere Platinmetalle) zurückzuführen (siehe Kapitel 6.1.2) und damit stark vom Fahrzeugkonzept abhängig.

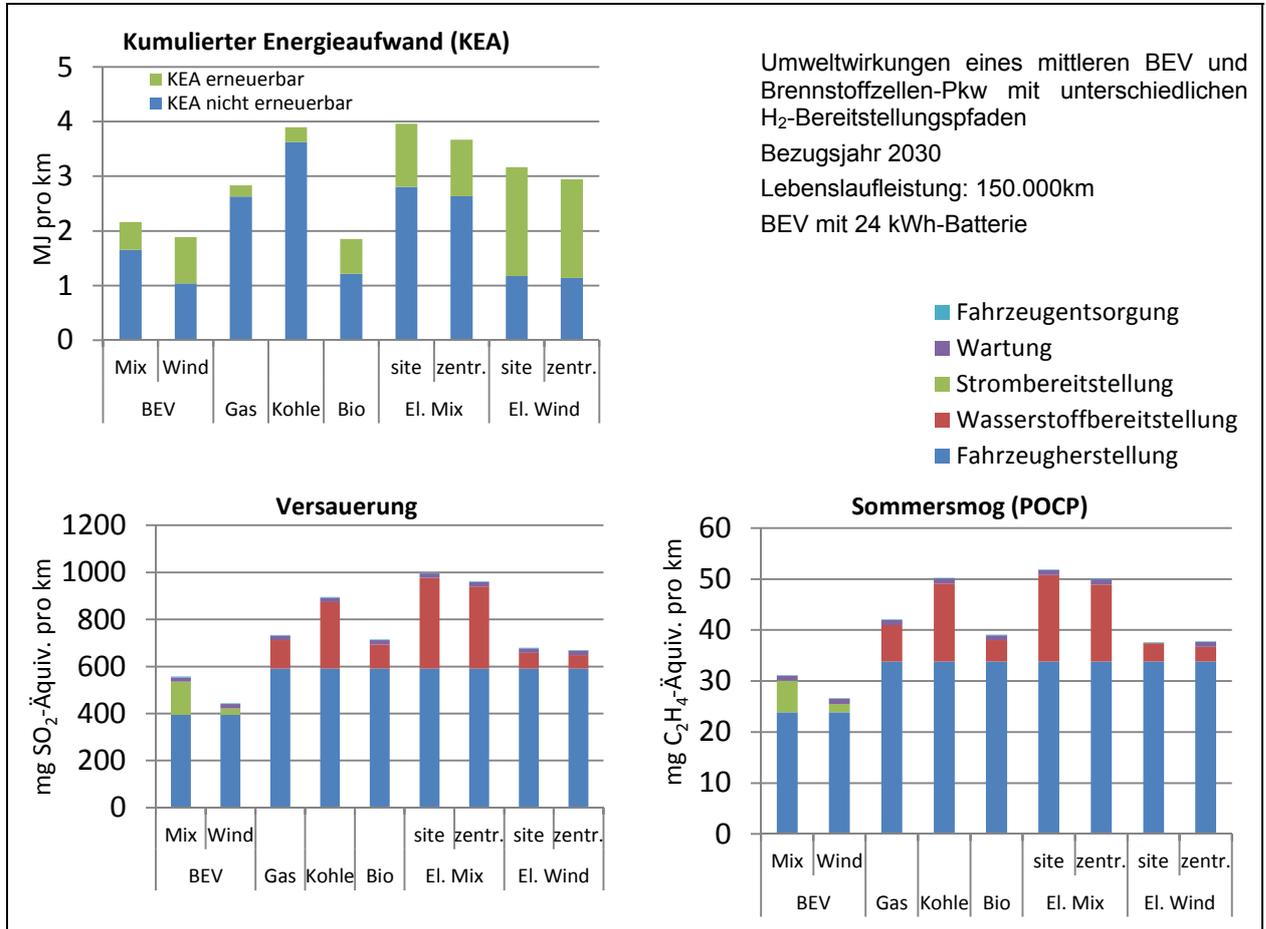


Abb. 24: Umweltwirkungen von Brennstoffzellen-Pkw über den Lebensweg (2030)

6.2 Strategische Bewertung von Wasserstoff

Die Umweltbilanzen für Brennstoffzellenfahrzeuge zeigen: Auf Basis von regenerativ erzeugtem Wasserstoff ergeben sich deutliche Klimavorteile gegenüber konventionellen Pkw. Dies reicht für eine tragende Rolle in der zukünftigen Mobilität jedoch noch nicht aus.

Während sich die Diskussion um zukünftige Antriebe Ende der 1990er Jahren also zwischen den beiden Polen „Verbrennungsmotor“ und „Wasserstoff-Brennstoffzelle“ entspannt, ist die Lage mittlerweile komplexer. Sowohl auf Antriebsseite (Batterieelektrisches Fahrzeug) als auf Kraftstoffseite (flüssige und gasförmige Biomasse; EE-Methan oder -Methanol) sind neue strategische Optionen hinzugekommen.

Dabei sind verschiedene Perspektiven auszumachen, aus denen die Wasserstoff-Bewertung vorgenommen werden kann:

- eine **input- oder kraftstoffbezogene Perspektive**: Woher kommt der Was-

serstoff? Fällt er als „Nebenprodukt“ der Speichernotwendigkeit sowieso an? Wird er in einem Stromsystem mit hohen Anteilen EE aus Strom erzeugt? Wird eine eigene Kraftstoffinfrastruktur aufgebaut?

- eine **output- oder antriebsfokussierte Perspektive**, die sich insbesondere mit der Frage der technischen Machbarkeit, ökonomischen Sinnhaftigkeit und ökologischen Vorteilhaftigkeit der einzelnen Antriebe und der ihnen zugeordneten Kraftstoffe befasst.

Jede dieser Perspektiven ist in jeweiligen Studien intensiv und mit großer empirischer Akribie untersucht worden (allein in Deutschland beispielsweise [McKinsey 2010], [Concawe 2007], [Nitsch et al. 2010], [Wietschel & Bünger 2010], [Pehnt 2002], zum internationalen Stand siehe die [WHEC 2010]). Hier soll daher der Versuch unternommen werden, diese Perspektiven thesenartig zusammenzuführen.

6.2.1 Koexistenz der Antriebe

Es wird langfristig alle drei Antriebsvarianten (Verbrennungsmotoren ICE, Brennstoffzellen-Fahrzeuge FCEV, batterieelektrische Fahrzeuge BEV) auf dem Markt geben: Sie sind technologisch einsatzfähig und zukünftig konkurrenzfähig. Die **Gesamtkosten** der verschiedenen Antriebsalternativen werden langfristig **konvergieren**.

Die **Einsatzbereiche** werden sich auf Grund der technischen Begrenzungen stärker **ausdifferenzieren**. Außerdem werden sich die **Fahrzeugkonzepte vermischen** (Range Extender mit Verbrennungsmotor/Brennstoffzelle; größere Batterie/kleinere Brennstoffzellenauslegung etc.).

Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind in Stückzahlen von mehreren Hundert in der Erprobung und damit grundsätzlich straßentauglich. Technische Herausforderungen wie Temperatur- und Wassermanagement, Dauerhaltbarkeit und Kaltstartfähigkeit bestehen und werden adressiert, und insbesondere gilt es, die Kosten der Stacks auf 100 US\$/ kW zu senken, die Platinbeladung zu reduzieren und die Lebensdauer zu erhöhen, so dass kein Stackaustausch erforderlich ist. Verschiedene Studien, insbesondere

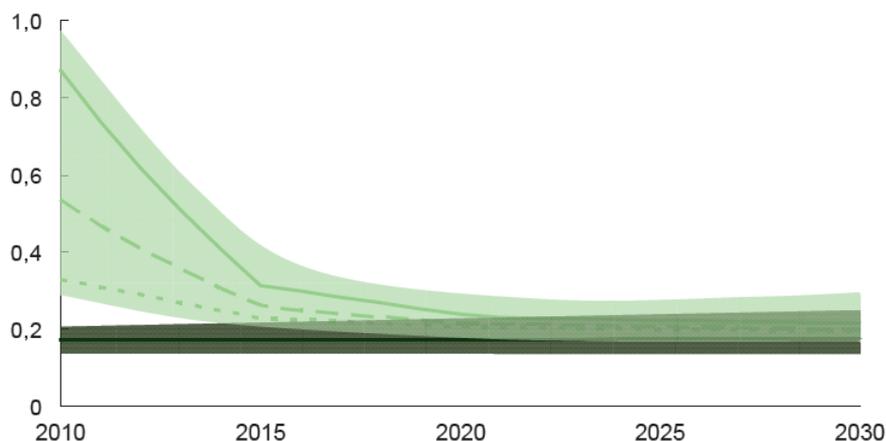
auch die von der Fahrzeugindustrie getragene McKinsey-Studie ([McKinsey 2010]), sind optimistisch, dass dies machbar ist.

Für BEV gilt es, Batteriekosten drastisch auf unter 250 €/kWh zu senken und die Zyklenfestigkeit zu steigern. Wenn die technische Fortentwicklung weiterhin so verläuft wie bislang, so sagt beispielsweise die McKinsey-Studie eine Kostenkonvergenz zwischen ICE, BEV und FCEV im Jahr 2030 voraus. Unterstellt

wurde allerdings eine äußerst ehrgeizige Kostenreduktion von 90 bzw. 80 % bis

2020 für Brennstoffzellen- bzw. Elektroautos.

TCO ranges¹ of different power-train technologies
EUR/km



¹ Ranges based on data variance and sensitivities (fossil fuel prices varied by +/- 50%; learning rates varied by +/- 50%)

Abb. 25: Gesamtkosten (TCO) verschiedener Antriebssysteme ([McKinsey 2010])

Diese optimistische Analyse, die auch von [Wietschel & Bünger 2010] geteilt wird, ermöglicht es, den verschiedenen Antriebssystemen optimale Einsatzbereiche zuzuordnen.

werden. Das dort erforderliche Fahrprofil ist für einen konventionellen Diesel-Antrieb relativ ineffizient. Der Brennstoffzellen-Antrieb mit seinen grundsätzlichen ökologischen Vorteilen weist gerade in diesem Einsatzspektrum hohe Tank-to-Wheel-Wirkungsgrade auf, was ihn gegenüber dem Diesel-Antrieb als recht attraktiv ausweist. Zudem können die Busse wieder am Ausgangspunkt betankt werden. Der VDV spricht in seinem Positionspapier von den „überzeugenden ökologischen Vorteilen“ der Brennstoffzellen-Nutzung in Stadtbussen, verweist aber auf die derzeit gegenüber dem Diesel-Bus 5-mal höheren Kosten ([VDV 2009]).

Technisch bestehen durchaus signifikante Unterschiede zwischen den Antrieben. Kritische Parameter sind insbesondere Reichweite, Kosten, Infrastruktur und Tankzeiten. Während BEV zukünftig Reichweiten zwischen 100 und 200 km haben werden und, je nach Ladesystemen, Tankzeiten zwischen 0,5 und 10 Stunden, ist die Reichweite und die Tankzeit von FCEV mit Verbrennungsmotoren vergleichbar.

Demgegenüber sind im Lkw-Fernverkehr die Wirkungsgrad-Differenzen zwischen konventionellem Diesel-Antrieb und Brennstoffzellen-Antrieb recht gering. Unbeschadet der auch hier bestehenden ökologischen Vorteile des regenerativen Wasserstoff-Pfades ist seine Rentabilität gegenüber dem Diesel-Pfad noch geringer als bei der Nutzung in Stadtbussen.

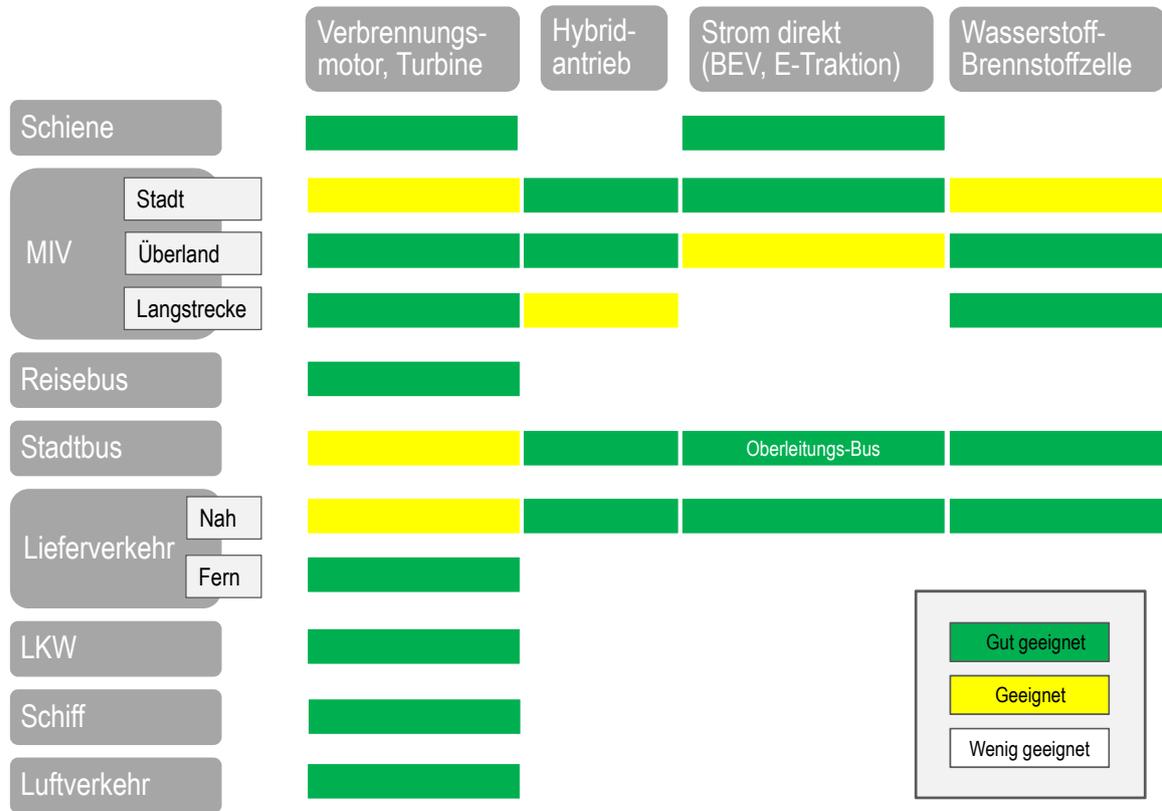
Daher wird es eine zunehmende Ausdifferenzierung und Hybridisierung geben. Es gibt Einsatzzwecke für den elektrischen Antrieb, in denen zusätzlich zur Emissionsfreiheit vor Ort, zur Lärmarmut und zu der generellen Klimaverträglichkeit die Ausgestaltung des Antriebs Vorteile mit sich bringt. BEV werden daher insbesondere im städtischen, Pendler- und Kurzstrecken-Lieferverkehr an Bedeutung gewinnen.

Um die Vorteile der Fahrzeugkonzepte optimal zu kombinieren, werden sie sich nicht nur nach Einsatzbereichen differen-

Bereits kurzfristig können Brennstoffzellen hingegen in Stadtbussen eingesetzt

ziert, sondern auch zunehmend durchmischelt sein: FCEV werden größere Batterien erhalten und mit Plug-In-Möglich-

keit ausgestattet werden, BEV können Wasserstoff oder Verbrennungsmotoren als Range Extender erhalten.



IFEU 2011

Abb. 26: Eignung verschiedener Antriebe für verschiedene verkehrliche Einsatzfälle

6.2.2 Adaptive Infrastruktur

Der große Aufwand für einen notwendigen Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur ist nicht prohibitiv für den Ausbau von Brennstoffzellen-Fahrzeugen, aber in der Einführungsphase werden die Kosten hoch sein. Daher sollte die Einführungsphase auf die Anwendungsgebiete fokussieren, die sich als zukünftig robust erweisen (Stadtbusse etc.) und eine **zunächst dezentrale Infrastruktur** (dezentrale Reformer und Elektrolyseure) ermöglichen. Dies erlaubt spätere Korrekturen der Wasserstoffstrategie. Die Kosten der Wasserstoffbereitstellung werden in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie versteuertes Benzin.

Verschiedene Kostenanalysen der Wasserstoffbereitstellung kommen zu dem Schluss, dass – abhängig vom Mix der eingesetzten Rohstoffe – die Gesamtkos-

ten des unverteuerten Wasserstoffs langfristig in einer ähnlichen Größenordnung liegen werden wie die heutigen Kraftstoffkosten mit Steuern.

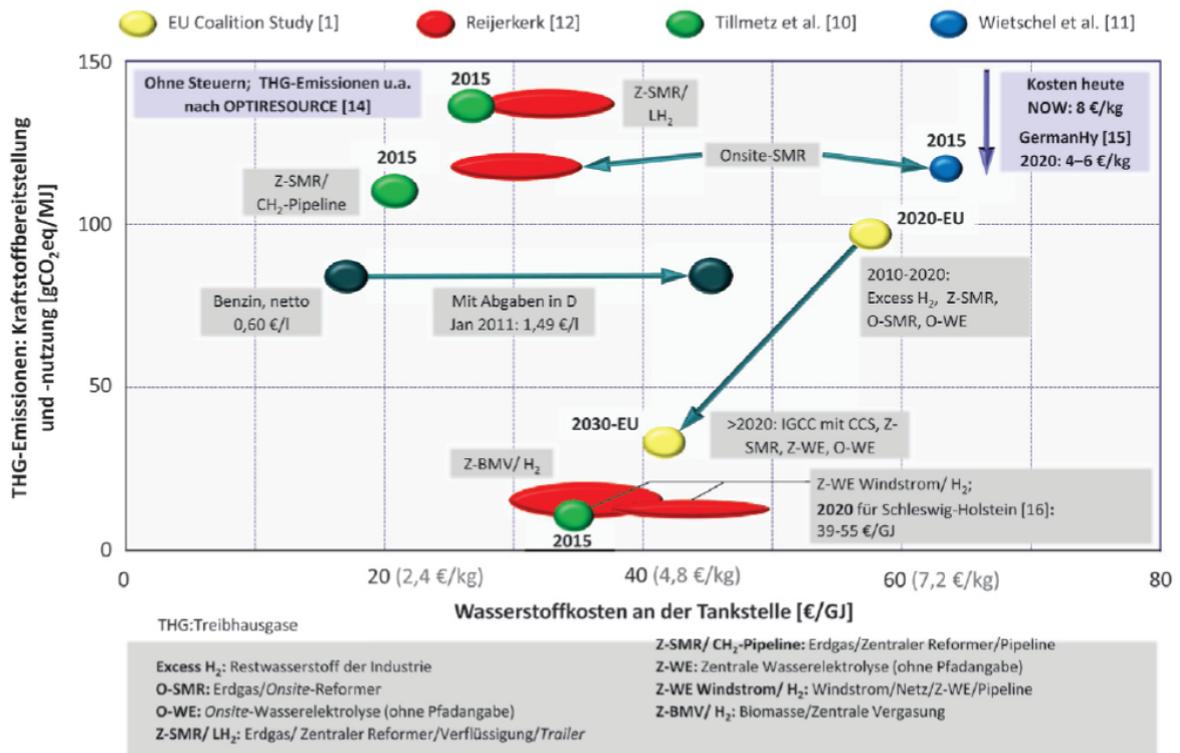


Abb. 27: Wasserstoffkosten an der Tankstelle ([Höhlein & Grube 2011])

Zu den Produktionskosten kommen die Kosten für die Herstellung und Abschreibung der Infrastruktur der Wasserstoffherzeugung, der Kompression, der Lagerung und der Befüllung des Fahrzeuges hinzu. [McKinsey 2010] quantifiziert die langfristigen, auf das Fahrzeug abgeschriebenen Infrastrukturkosten auf rd. 1000 bis 2000 € pro Fahrzeug (2-3 Mrd €/a). Insgesamt summieren sich die Kosten nach der McKinsey-Quantifizierung auf rd. 100 Mrd. € für die EU über die nächsten 40 Jahre bei angenommenen 100 Mio. FCEVs im Jahr 2050. [GermanHy 2009] beziffert die Infrastrukturkosten bis 2030 auf lediglich 1 Mrd €/a. Andere Studien prognostizieren höhere Infrastrukturkosten von anfänglich rd. 12.000 € pro Fahrzeug, die aber mittelfristig auf 3.000 € sinken werden ([COM Expert Group 2011]).

Ein unmittelbarer Vergleich mit den Kosten für den Ausbau einer elektrischen Ladeinfrastruktur für BEV und PHEV ist nicht möglich. Entscheidend für diese Kosten sind u. a. zwei derzeit noch nicht abschätzbare Parameter: a) der Anteil öffentlicher Ladestationen (deren spezifische Investitionen deutlich höher sind als die privater Ladestationen), b) und der Anteil an PHEV (PHEV führen zu deutlich niedrigeren Infrastrukturerfordernissen).

Zeitlich und räumlich würde ein sinnvoller Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur sukzessive erfolgen ([GermanHy 2009]). Zunehmend wird dabei auf Druckwasserstoff und Pipeline-Transport umgestiegen.

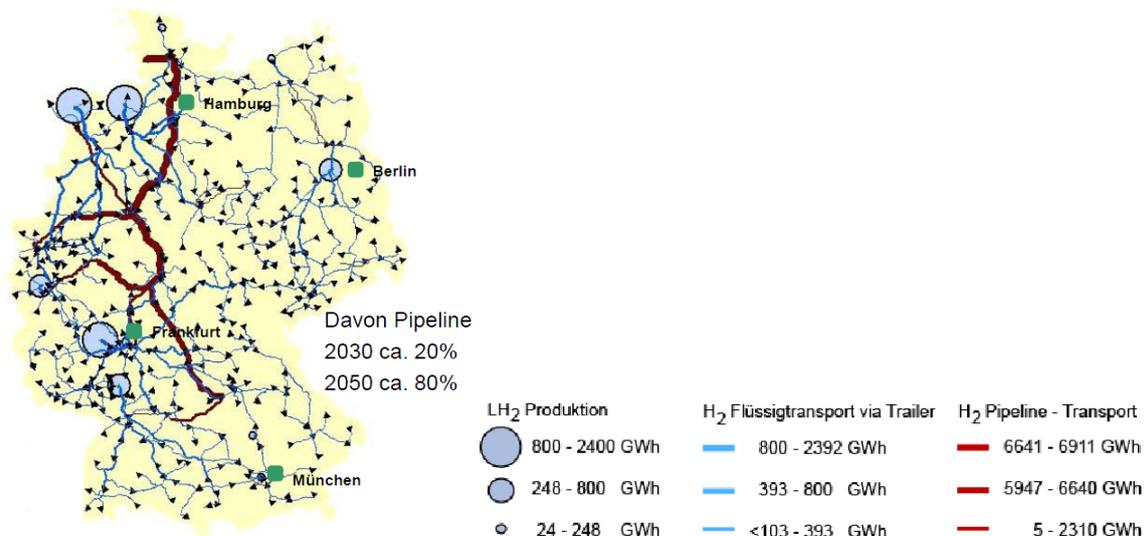


Abb. 28: Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur ([GermanHy 2009])

Um Pfadabhängigkeiten – d. h. irreversible Infrastrukturentscheidungen – zu vermeiden, sollte der Wettbewerb zwischen den drei Antriebsantriebssystemen so lange wie möglich offengehalten werden, damit sich optimale Einsatzfälle für die jeweiligen Energieträger herauskristallisieren. Am Ende werden dann wahrscheinlich alle drei Antriebssysteme übrig bleiben.

Dies bedeutet für den Ausbau der Infrastruktur insbesondere, dass anfangs dezentrale Erzeugungsanlagen mittels On-

Site-Reformern und -Elektrolyseuren vorangetrieben werden sollten, um Wasserstoff-Verbrauchsknoten zu versorgen.

Allerdings sind dezentrale Versorgungsoptionen in allen Kostenstudien die teuersten. Die europäische Expertengruppe quantifiziert die Wasserstoffgestehungskosten aus dezentralen Systemen derzeit als 2-3 mal teurer im Vergleich zu zentraler Produktion, sagt aber zugleich signifikante Kostensenkungen gerade für die „small-scale hydrogen production“ voraus ([COM Expert Group 2011]).

6.2.3 Vorhandenen Strom bevorzugt in direkte Elektromobilität

Die ökobilanzielle Betrachtung fokussiert auf die Umweltwirkungen pro gefahrenen Kilometer. Umgekehrt ist aber auch relevant, wie viel Umweltnutzen mit (begrenzt vorhandenen) erneuerbaren Energieträgern erzielt werden kann. Wegen des schlechteren Well-to-Wheel-Nutzungsgrads von Brennstoffzellenfahrzeugen im Vergleich zum Elektroauto sollte **Strom bevorzugt in Elektroautos** eingesetzt werden, **wo dies technisch möglich** ist.

Der erneuerbare Strom bewirkt wegen der unterschiedlichen Wirkungsgrade im Laufe der gegenüber gestellten Nutzungspfade auch unterschiedliche Einsparungen an Kohlendioxid und Treibhausgasen. Abb. 29 zeigt die Treibhausgas-Einsparung auf der Basis der unterschiedlichen Wirkungsgradabschätzungen. Kommt der Strom über die Kette „Windenergie – Verteilung – Batterie“ zur Anwendung, resultiert aus der Nutzung regenerativ erzeugten Stroms in Elektro-

fahrzeugen eine Einsparung von 550 bis 690 g Treibhausgasen je eingesetzter kWh erneuerbarer Energie (EE) gegenüber einem konventionellen Verbrennungs-Pkw.

Wird der EE-Strom über die Elektrolyse, die Verteilung und Kompression des Wasserstoffs und dann über die Brennstoffzelle/(Batterie) an den Elektromotor abgegeben, sind die energetischen Verluste höher. Mit der Nutzung des regenerativ erzeugten Stroms wird demnach ei-

ne Einsparung von 240 bis 330 g Treibhausgas je eingesetzter kWh EE erzielt. Damit ist dieser Nutzungspfad grob einen Faktor 2 ungünstiger (siehe Kapitel 6.1.5).

Eine ähnliche Struktur ergibt sich bei stationärer Nutzung des Stroms. Die hohen Verluste des Wasserstoffpfades führen dazu, dass dieser Speicherpfad im Vergleich zur ungespeicherten Direkteinspeisung (720 g THG je eingesetzter kWh EE entsprechend einem verdrängten Kraftwerkspark mit 70 % Steinkohle-, 30 % Gas-Anteil in Anlehnung an Klobasa et al. 2009) Einsparungen von lediglich 150 bis 380 g THG je eingesetzter kWh EE erzielt – je nach eingesetzter Rückverstromungstechnik.

Eine Methanisierung des Wasserstoffs führt nochmals zu einer Absenkung des Wirkungsgrades um mehrere Prozentpunkte – vorausgesetzt, eine konzentrierte CO₂-Quelle (beispielsweise aus einem Kraftwerk oder Zementwerk) ist verfügbar.

Andere Großspeichertechnologien wie Pumpwasserkraftwerke oder Druckluftspeicher, kommen auf Einsparungen, die rund einen Faktor zwei höher sind. Auch die Umsetzung des Stroms in Wärme, insbesondere bei Einsatz einer Wärmepumpe, ist eine nicht uninteressante Variante, vorausgesetzt es gibt ein Wärmenetz, in das diese Wärme eingespeist werden kann.

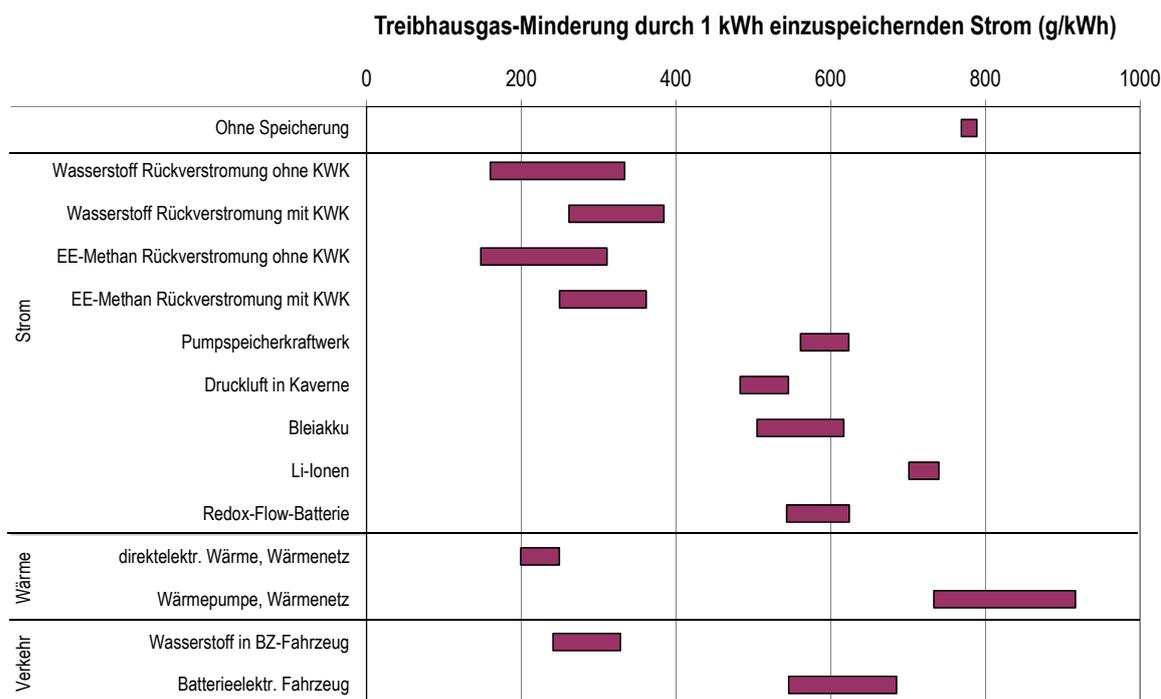


Abb. 29: Treibhausgas-Einsparung mit einer kWh regenerativ erzeugten Stroms bei stationärer oder mobiler Nutzung des Stroms direkt bzw. über den H₂-Pfad (Quelle: eigene Berechnungen aufbauend auf [Pehnt & Höpfner 2010])

Insgesamt ergeben sich im Vergleich der Wasserstoffpfade mit den anderen Pfaden THG-Minderungen, die um einen Faktor 1,5 bis 3 niedriger sind. Legt man anstelle des substituierten Grenzkraftwerks (70 % Steinkohle, 30 % Gas) eine andere CO₂-ärmere Stromerzeugung, beispielsweise den Strommix, zu Grun-

de, so wird die Differenz zwischen den Wasserstoff- und sonstigen Pfaden zwar kleiner, bleibt aber in der Grundstruktur erhalten. Ob der Wasserstoff dabei verkehrlich genutzt wird oder eher verstromt, ist aus Klimaschutzsicht dabei nicht entscheidend.

Diese Frage wird eher über die Erlöse entschieden, die mit den Produkten erzielt werden können. Und hier kommt insbesondere der Frage der effizienten

Speicherung von Strom in einem Energiesystem mit hohen fluktuierenden Anteilen von Strom eine wichtige Rolle zu.

6.2.4 Wasserstoff als Speicher für Überschuss-Strom

Zunehmende Anteile fluktuierender erneuerbarer Energien werden in Deutschland zu „**Überschuss-Strom**“ führen. Die Menge einzuspeichernden Stroms wird in verschiedenen Studien sehr unterschiedlich bewertet und hängt davon ab, ob 2050 eine Vollversorgung mit EE angestrebt wird oder ein gewisser Prozentsatz fossiler Backup-Kraftwerke zulässig ist.

Die bereitstehenden Wasserstoffmengen reichen für eine Versorgung von ausgewählten verkehrlichen Einsatzfällen, nicht aber für die Versorgung des gesamten Verkehrssektors aus, zumal ökonomisch und ökologisch sinnvolle Nutzungs-Alternativen existieren. Wasserstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge müsste daher mittel- bis langfristig in den nicht für BEV geeigneten Anwendungsgebieten aus zusätzlichen EE-Strommengen erzeugt werden. Dies würde auch eine ausreichende Auslastung von Elektrolyseuren garantieren, die mit Auslegung nur auf Spitzenstrom sehr gering ist.

In einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energieträger gewinnt Speicherung an Bedeutung. Ein Teil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien erfolgt aus stetigen, gut vorher-sagbaren und bedarfsgerecht einsetzbaren Energieträgern, beispielsweise Biomasse, Klär- und Deponiegas, Geothermie und in der Regel auch Wasserkraft. Ein anderer Teil hängt jedoch von der Solarstrahlung und den meteorologischen Gegebenheiten ab, insbesondere Solarenergie und Windkraft. Der Anteil dieser fluktuierenden Energieträger wird deutlich ansteigen.

Wie viel „Überschuss-Strom“ entsteht? Wie in verschiedenen Studien untersucht (beispielsweise [Stern et al. 2011], [SRU 2010], [TU München 2010]), wird sowohl Kurzzeit- als auch Langzeit-Speichertechnologien in Zukunft eine wichtige Rolle zukommen. Der „Überschuss-Strom“, der langfristig durch ein temporäres Überangebot bei fluktuierender Erzeugung sowie stromnetzseitiger Restriktionen entsteht, hängt äußerst stark ab von

- den Anteilen der einzelnen EE-Sparten (grundlast- bzw. bedarfsgerecht verfügbare Erneuerbare, Verhältnis Wind/Solar (die sich saisonal und ta-

geszeitlich teilweise komplementär verhalten), Anteil Import);

- der Betriebsweise der EE-Anlagen (beispielsweise ist ein Erzeugungsmanagement (Abschalten von Wind/Solar bei hohem Angebot und niedriger Nachfrage an wenigen Stunden im Jahr), mitunter einer Auslegung des Systems auf die maximale Leistung vorzuziehen);
- dem Grad des erfolgten deutschland- und europaweiten Netzausbaus (europäischer Netzverbund; Erschließung von Speicherpotenzialen im Alpenraum und Skandinavien) und des durchgeführten Lastmanagements.

Der einzuspeichernde Strom braucht sowohl Kurzzeit- (Pumpspeicher, Batterien) als auch Langzeitspeicher, die die erforderliche Energie auch über einen längeren Zeitraum von Wochen und Monaten beispielsweise für längere Windflauten bereithalten können. Wie in [Pehnt & Höpfner 2010] diskutiert, kommen für die Langzeitspeicher insbesondere chemische Speicher in Frage.

Menge, Leistung und Speicherzeit für Langzeitspeicher wird für die längerfristige Zukunft sehr unterschiedlich beziffert, liegt aber in den meisten Fällen zwischen 1 und 15 % des Jahresstromverbrauchs.

Eine Reihe von Studien beziffert diesen energetischen Speicherbedarf für 2050 auf zwischen 20 und 50 TWh (zum Vergleich: die Speicherkapazität heutiger Pumpspeicherkraftwerke liegt bei 0,04 TWh). Bei Annahme einer regenerativen Vollversorgung im Jahr 2050 steigt der Speicherbedarf überproportional an auf zwischen 80 ([UBA 2010b]) und 170 TWh/a ([Sternier et al. 2011]). Dieser Speicherbedarf geht weit über die Strommengen hinaus, die in BEV gespeichert werden könnten (40 Mio. Pkw mit 20 kWh frei verfügbarer Speicherkapazität könnten nur rd. 0,8 TWh abspeichern). 20 TWh reichen für den Betrieb von rd. 4 Mio. FCEV (Jahresfahrleistung 12.000 km).

„Überschuss-Strom“, der sonst nicht hätte genutzt werden können, wird in verschiedenen Studien beziffert, beispielsweise in [Wietschel & Bünger 2010]. Dort wird unter der Voraussetzung einer optimalen Netzsituation („Kupferplatte“) für einen vergleichsweise ambitionierten EE-Ausbau, wie ihn die Leitstudie 2009 prognostiziert, ein Überschussstrom von rd. 5 TWh für Deutschland im Jahr 2030 errechnet ([Wietschel & Bünger 2010]). [Wietschel et al. 2006] berechnet bei 38 GW Windleistung rund 8 TWh, bei 48 GW rund 28 TWh.

Der „Überschuss-Strom“ kann allerdings unterschiedlich eingesetzt werden:

- Einspeicherung und anschließende Rückverstromung; unterschiedliche Speicherprinzipien bieten sich an, die in verschiedenen Literaturwerken ausführlich vorgestellt sind (vgl. [Oertel 2008]). Allerdings sind die Lade-Entlade-Wirkungsgrade dieser Speicher äußerst unterschiedlich (siehe [Pehnt & Höpfner 2010]).
- Wasserstofferzeugung, ggf. mit der Einspeisung ins Erdgasnetz, und anschließende Rückverstromung, entweder rein oder Erdgas beigemischt;
- Wasserstofferzeugung und anschließende verkehrliche Nutzung;
- Wasserstofferzeugung und anschließende industrielle Nutzung, beispielsweise in der chemischen, Grundstoff-, Stahl- oder Kupferindustrie; das Einsatzpotenzial allein diesen Pfads wurde nur für Norddeutschland in [Stiller et al. 2011] auf knapp 1 TWh nur für Hamburg und Schleswig-Holstein beziffert;
- Methanisierung und anschließende Substitution von Erdgas (die vergleichende Bewertung von Wasserstoff und EE-Methan ist nicht Gegenstand dieser Studie). Es soll allerdings darauf hingewiesen werden, dass Wasserstoff mit Anteilen von 5 Vol.%, unter bestimmten Bedingungen sogar bis zu 10 Vol.% beigemischt werden kann, entsprechend 12 (24) TWh Wasserstoff ([Albrecht 2011]);
- Umsetzung in Wärme (direktelektrisch oder mittels Wärmepumpen) und Einspeisung in Wärmenetz oder Nutzung vor Ort, eine Option, die aus Sicht der CO₂-Substitution nicht unvorteilhaft abschneidet (siehe Abb. 29).

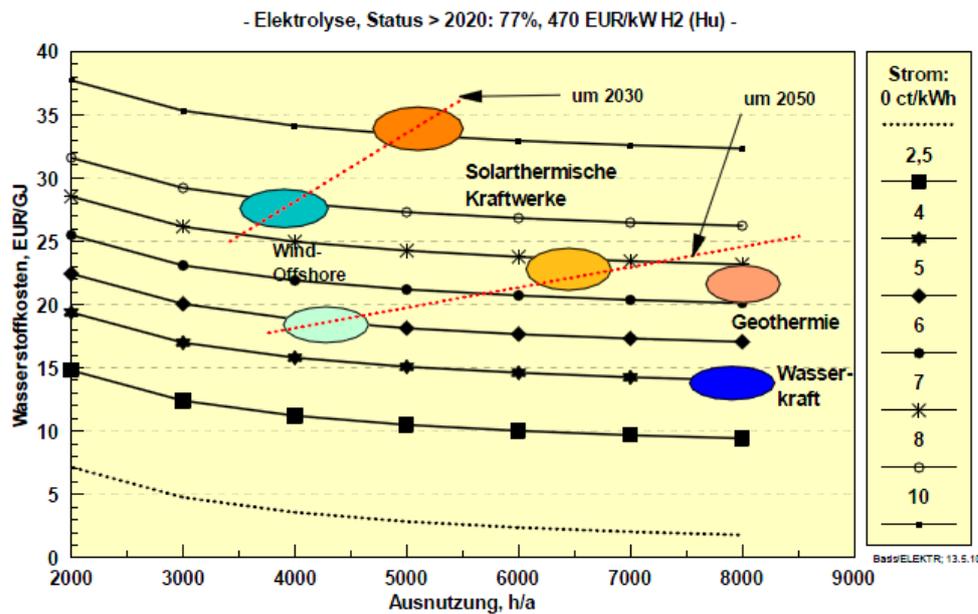


Abb. 30: Auslastung als Parameter der Wasserstoffkosten ([Nitsch et al. 2010])

Oben wurde bereits gezeigt, dass der Nutzungspfad Strom - Wasserstoff - Kraftfahrzeug durchaus nicht der Pfad mit der höchsten Klimaschutzwirkung ist.

Zudem wird sich der Einsatzpfad an der wirtschaftlichen Bewertung messen lassen müssen. Hier kommt erschwerend hinzu, dass die Auslastung solcher elektrolytischer Überschussstromnutzung deutlich geringer ist als eine auf hohe Produktionskapazität ausgelegte Anlage. LBST errechnet für die Überschussstromnutzung Volllaststunden für einen Elektrolyseur von rund 200 h/a, was ei-

ner Auslastung von rd. 2 % entspricht. Räumlich begrenzt, beispielsweise in Hamburg/Schleswig-Holstein, können die Auslastungen auch deutlich höher sein, bis zu 1000 h/a ([Stiller et al. 2011]). Damit steigen die Wasserstoffgestehungskosten signifikant an (Abb. 30). Eine höhere Auslastung der Anlage kann dann nur mit dem Einsatz von Strom erzielt werden, der kein „Überschussstrom“ ist, sondern aus an der Strombörse „zugekauftem“ oder aus weiteren, gezielt für die Wasserstoff-Produktion gebauten Anlagen, stammt.

6.3 Perspektive: Angebot und Nachfrage nach Wasserstoff

Das vorläufige Fazit aus dieser Betrachtung lautet: Wasserstoff als Langzeit-Speicheroption wird sich im Laufe der Systemtransformation des Stromsystems als notwendig erweisen – insbesondere bei der Annahme einer Vollversorgung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2050, bei der der Speicherbedarf überproportional ansteigt. Ob dieser Wasserstoff aber im Verkehrssektor eingesetzt werden soll, ist damit noch nicht präjudiziert.

Die große Bandbreite der hierzu gängigen Einschätzungen zeigt ein Szenariovergleich. Während Wasserstoff in den Energieszenarien des Energiekonzepts und den Szenarien Modell Deutschland des WWF vernachlässigbar ist ([Prognos/EWI/GWS 2010], [Prognos/Öko-Institut 2009]), quantifiziert das Leitszenario 2010 [Nitsch et al. 2010] den Anteil von Wasserstoff-Pkw an der Fahrleistung auf 20 % im Jahr 2050. Dieser Wasserstoffanteil substituiert im Vergleich zu den anderen Langfristszenarien insbesondere Biokraftstoffe.

Die strategische Einordnung der Sinnhaftigkeit eines Wasserstoffeinsatzes im Verkehr lässt sich in vier Themenkomplexe zusammenfassen:

- Wie viel Wasserstoff ist über die Zeitachse verfügbar (Infrastrukturaufbau, Speicherbedarf, etc.)?
- Welcher Einsatzpfad ist aus volks- und betriebswirtschaftlicher Kostensicht optimal?
- Welcher Einsatzpfad bringt den ökologisch maximalen Nutzen?
- In welchem Einsatzbereich gibt es keine sinnvollen Alternativen, um eine weitestgehende Dekarbonisierung zu erreichen?

Die folgende Betrachtung fokussiert auf die Wasserstoff-Herstellung aus Strom. Dahinter steht die Überlegung, dass

Wasserstoff aus den fossilen Energieträgern Gas und Kohle aus Klimaschutzgründen und Gründen der Nutzungskonkurrenz (Einsatz von Gas im stationären Sektor) in Deutschland nicht forciert wird; dass CCS für die Wasserstoffproduktion ökonomisch nicht langfristig kompetitiv ist¹ und aus Akzeptanz- und infrastrukturellen Gründen in Deutschland keine große Rolle spielen wird und dass Biomasse für die verkehrliche Wasserstoffproduktion aus Gründen der Flächen- und Nutzungskonkurrenz nur Nischenanwendungen erfährt.

Dabei wird hier davon ausgegangen, dass es in den nächsten Jahrzehnten keinen entscheidenden Durchbruch bei der großtechnischen Bereitstellung von Wasserstoff auf weiteren Herstellpfaden gibt (z. B. Wasserstoff aus Algen). Sollte dies erfolgen, so verschiebt sich das Einsatzportfolio der Antriebstechnologien zu Gunsten von Wasserstoff und Brennstoffzellen.

¹ Im Vergleich von CO₂-armem CCS-Wasserstoff und CO₂-freiem elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff mit Strom aus erneuerbaren Quellen ergeben sich für die Langfristperspektive (2030-2040) zunächst ähnliche Gestehungskosten, wobei die Kostentendenz für EE-Wasserstoff nach unten weist, während CCS-Wasserstoff auf Grund steigender Brennstoffkosten tendenziell steigende Kosten aufweist ([WI/IFEU/DLR 2005]).

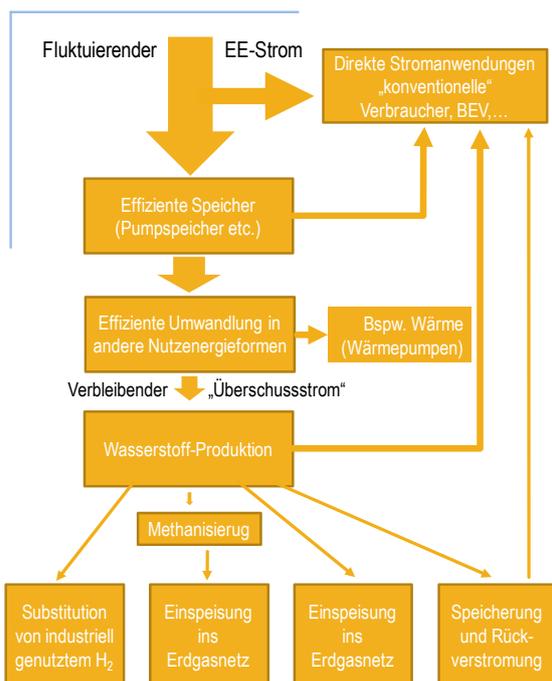


Abb. 31: Entscheidungsdiagramm für die Nutzung von erneuerbarem „Überschuss-Strom“

Die Betrachtung des ökologisch maximalen Nutzens in Kapitel 6.2.3 hat gezeigt: aus Sicht der maximalen Klimagasreduktion ist zunächst eine maximale Menge von EE-Strom in anderen Nutzungspfaden einzusetzen, wo der Strom direkt genutzt (Stromanwendungen, BEV, Schienentraktion etc.), effizient gespeichert oder effizient in andere Nutzenergien überführt wird (Wärmepumpe).

Die dann verbleibende Menge an Wasserstoff aus den oben zitierten Systemsimulationen in einer Größenordnung zwischen 20 und 50 TWh/a Überschussstrom liegt bei entsprechend 13 bis 32 TWh Wasserstoff (Abb. 32) (nur in der Maximal-Abschätzung einer regenerativen Vollversorgung liegt es deutlich darüber). Diese „Überschuss-Strommengen“ stehen zeitlich allerdings erst zunehmend ab ca. 2040 zur Verfügung.

Für zusätzliche Wasserstoffmengen müsste weitere EE-Kapazität ausgebaut werden. Eine ähnliche Wasserstoffmenge (22 TWh/a) könnte bereitgestellt werden, wenn man beispielsweise 10 GW

Offshore-Windparks (40 Parks à 250 MW) gezielt zur Wasserstoffproduktion nutzen würde.

Um ein Gefühl für eine Größenordnung erforderlichen Wasserstoffs in den verschiedenen Einsatzsegmenten zu erhalten, unternimmt Abb. 32 den Versuch einer Maximalabschätzung: Quantifiziert werden die erforderlichen Wasserstoffmengen für einen Einsatz in den in Abb. 26 grün gekennzeichneten Einsatzfeldern von Wasserstoff insbesondere in Brennstoffzellenantrieben. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass der Lieferverkehr außerorts (ohne Autobahn) für Lieferfahrten über den städtischen Bereich hinaus für BZ-Fahrzeuge geeignet ist, ebenso wie Linienbusse und Binnenschiffe (letztere motorische Verbrennung von Flüssigwasserstoff); der Anteil der Pkw-Fahrten von Vielfahren mit häufigen Fernfahrten zur Abschätzung für BZ-affine Pkw-Nutzungen geeignet ist. Hierzu wurde basierend auf [infas/DLR 2010] abgeschätzt, welche Fahrleistung auf Pkw mit einer Jahresfahrleistung von über 50.000 km entfällt. Dieser Anteil (etwa 15 %) wurde auf den Energieverbrauch übertragen. Dies entspricht auch grob dem Anteil von Fahrten länger als 100 km an der Pkw-Fahrleistung.

Wirkungsgraddifferenzen und Mehrgewicht wurden durch Abschlagsfaktoren berücksichtigt.

Der maximal „erforderliche“ Wasserstoff für diese Fahrzwecke bemisst sich auf rund 15 TWh für Nicht Pkw-Anwendungen und rund 35 TWh für die Pkw-Fernfahrten.

Alternativ könnte der Wasserstoff auch derzeitig fossil hergestellten Wasserstoffverbrauch in der Industrie ersetzen. Der derzeitige Wasserstoffbedarf liegt bei rd. 20 Mrd. Kubikmetern pro Jahr ([NRW 2009]). Allerdings sind hierin auch die Mengen Wasserstoff für Raffinerien inbegriffen, deren Nachfrage zukünftig ent-

sprechend sinken würde. Für Hamburg und Schleswig-Holstein wurde beispielsweise ein unmittelbares Substitutionspotenzial von rd. 270 Mio. Kubikmetern pro Jahr errechnet. Eine Einspeisung in das

Erdgasnetz würde unter der Annahme einer Einspeisung von 5 bis 10 Volumen-% eine Aufnahme von 12 bis 24 TWh ermöglichen ([Albrecht 2011]).

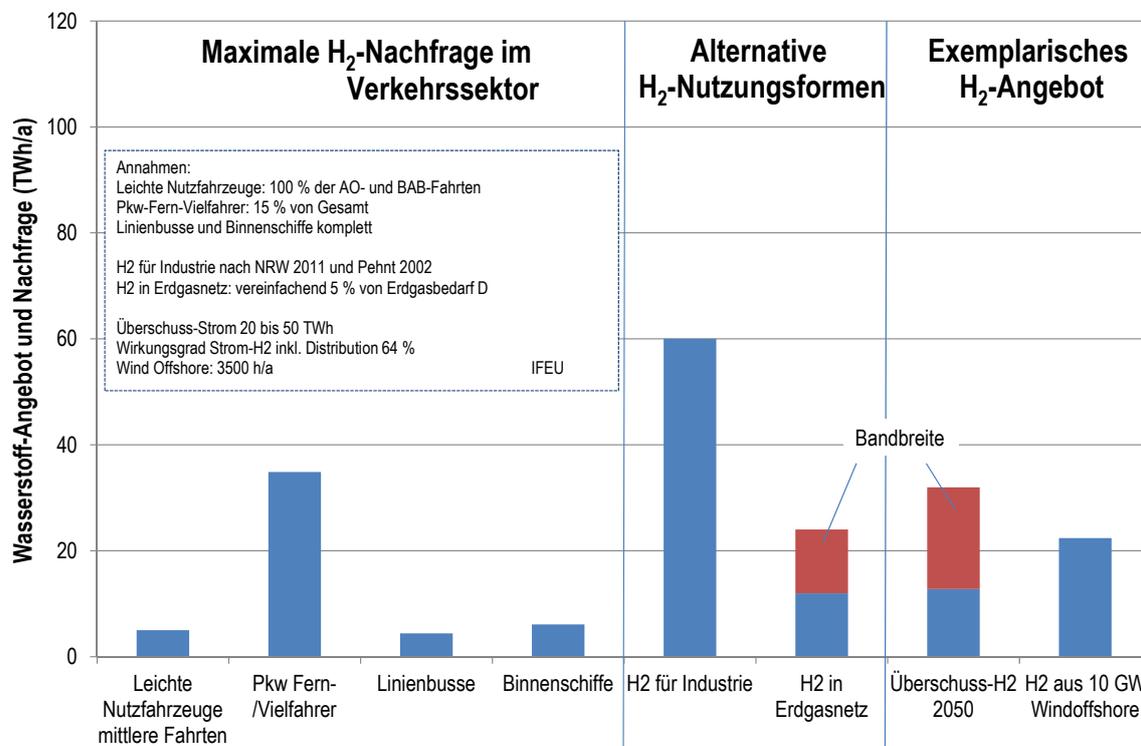


Abb. 32: Maximale Nachfrage nach Wasserstoff im Verkehrssektor für ausgewählte verkehrliche Zwecke im Vergleich zu weiteren Nutzungsvarianten und einem exemplarischem Angebot an Wasserstoff aus erneuerbaren Energieträgern (eigene Berechnungen)

Diese Darstellung zeigt: Einsatzmöglichkeiten für EE-Wasserstoff auch außerhalb des Verkehrs gibt es verschiedene; diese Einsatzmöglichkeiten weisen geringere Infrastrukturaufwendungen und einen zumeist höheren Klimanutzen auf.

In der strategischen Argumentation bzgl. verkehrlichen Wasserstoffs muss man in der Argumentationskette daher weniger von den Fragen 1 - 3, sondern von Frage 4 ausgehen: Welche Alternative hat man für die Versorgung der verkehrlichen Bereiche in einer dekarbonisierten Gesellschaft?

Zugespitzt hängt die Perspektive und Notwendigkeit insbesondere von zwei Fragen ab:

- Wie schreitet die technische Entwicklung der Elektromobilität hinsichtlich der auch für die Nutzerakzeptanz entscheidenden Parameter Reichweite und Tankzeit voran und wie verläuft die Kostenentwicklung? Wenn es gelingt, Schnellladekonzepte zu entwickeln oder Range Extender-Fahrzeuge aufzubauen, die – mit Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle – ausreichende Reichweiten realisieren, so sinkt die Einsatznotwendigkeit von reinen Brennstoffzellenfahrzeugen im Motorisierten Individualverkehr.
- Wie entwickelt sich das Angebot an nachhaltig angebaute Biomasse, die für den deutschen Verkehrsbereich allokiert werden kann und deren Ein-

satzmenge über die vorrangigen, da alternativlosen Einsatzsegmente Schwerlastverkehr und Flugverkehr hinausgeht?

Diese Frage muss nicht nur für Deutschland betrachtet werden, sondern in einer europäischen Perspektive.

Aus den Betrachtungen dieses Kapitels schlussfolgern wir:

1. Brennstoffzellenfahrzeuge sind ein prinzipieller Weg zu CO₂-freier Personen- und Gütermobilität in Einsatzbereichen, in denen Nutzerakzeptanz (Reichweite, Tankzeit) oder die Verfügbarkeit von Biokraftstoffen andere Antriebs- und Kraftstoffalternativen begrenzen.
2. Eine eindeutige Festlegung zu Gunsten eines Einsatzzweckes von Wasserstoff ist aber nach derzeitigem Wissensstand noch nicht möglich. Aus Überschussstrom gewonnener Wasserstoff kann in nicht-verkehrlichem Einsatz zu höheren Umweltentlastungen führen.
3. Synergiepotenziale der technischen Weiterentwicklung von BEV und BZ-Fahrzeugen mildern die Konkurrenzsituation zwischen den Antriebspfaden (Elektromotoren, Steuerung etc.).
4. Infrastrukturentscheidungen sollten verschiedene Verzweigungsmöglichkeiten offen lassen („adaptive Infrastruktur“). Hierzu sind weiterentwickelte dezentrale Versorgungsstrukturen (dezentrale Reformer, effiziente kleinere Elektrolyseure) zweckdienlich.
5. Die Weiterentwicklung der batterieelektrischen Antriebe ist von größter Bedeutung. Insbesondere die Reduktion der Kosten und Tankzeiten sowie die Erhöhung der Reichweite helfen – kombiniert mit intelligenten Mobilitätskonzepten – hier weiter.
6. Zugleich sollten verschiedene Flexibilisierungsoptionen für Fernfahrten (Range Extender auf Basis von Brennstoffzelle oder Verbrennungsmotor) vorangebracht werden.

7 Ausblick Elektromobilität

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 Batteriegroße 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-Äquivalenten bei einem Otto-Pkw und etwa 730 g CO₂-Äquivalenten 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 Koppelung 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 durch-

schnittlichen 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 Abb. 33). 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.

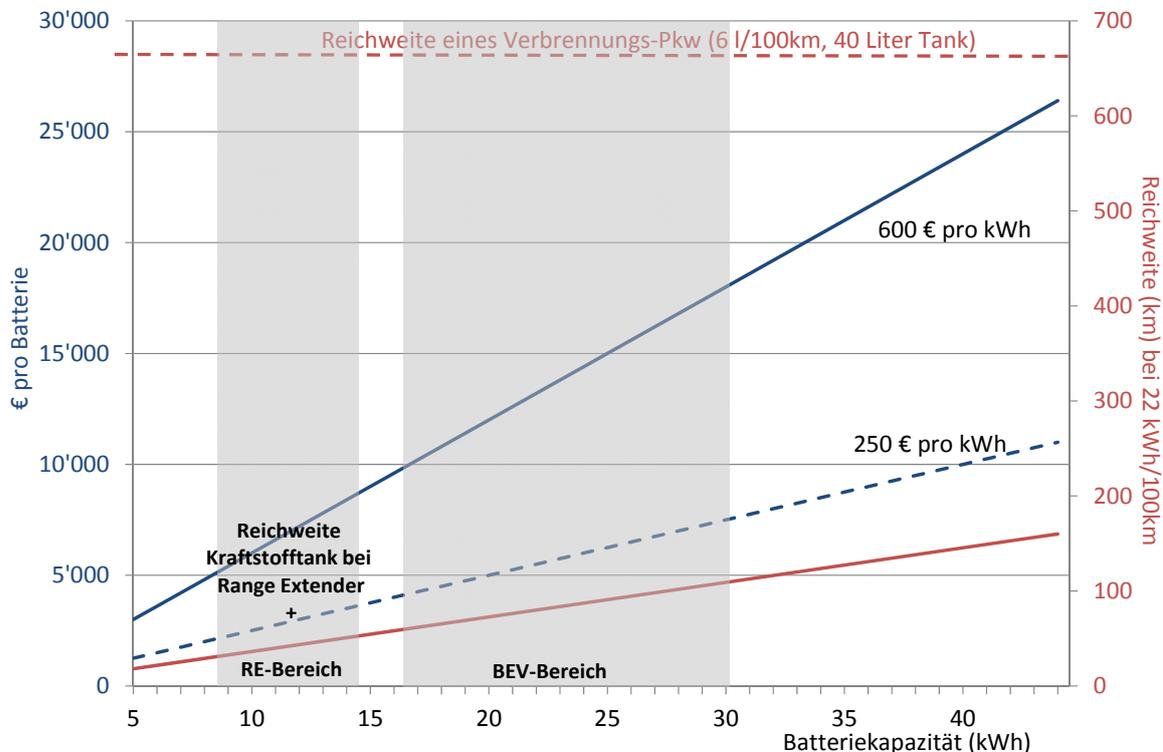


Abb. 33: Batteriekosten und Fahrzeugreichweite nach Batteriekapazität

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 Brennstoffzellenfahrzeugen 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 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 batterieelektrisch 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 Recyclings 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?

Quellenverzeichnis

- [AGEB 2011] Energy Balance for the Federal Republic of Germany 2009. AG Energiebilanzen e.V. Berlin 2011.
- [Albrecht 2011] Albrecht, U.: Langzeitspeicherung verbindet Strom- und Gasnetz. In: Dow Jones Energy Weekly 25 (2011). New York 2011.
- [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.
- [COM Expert Group 2011] Future Transport Fuels. Report of the European Expert Group on Future Transport Fuels. Brüssel 2011.
- [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 (EU-CAR) und European Commission Directorate General, Joint Research Center (JRC). Ispra 2007.
- [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.
- [EU 2009a] Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Europäische Union. Brüssel 2009.
- [EU 2009b] 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.
- [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.
- [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.
- [Höhlein & Grube 2011] Höhle, N. und T. Grube: Kosten einer potenziellen Wasserstoffnutzung für E-Mobilität mit Brennstoffzellenantrieben. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 61 (2011). Essen 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; Deut-

- sche Bahn AG, Deutsche Lufthansa, TUI; mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) u. a.
- [IFEU 2011] Helms, H., J. Jöhrens, J. Hanusch, U. Höpfner, U. Lambrecht und M. Pehnt: UMBReLA - Umweltbilanzen Elektromobilität. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht. Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg 2011.
- [infas/DLR 2010] Mobilität in Deutschland 2008 – Tabellenband. Infas und DLR im Auftrag des BMVBS (FE-NR. 70.801/2006). Bonn/Berlin 2010.
- [ITP 2007] Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025. Intraplan Consult. München/Freiburg 2007.
- [KBA 2011] Statistik ‚Bestand an Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen – 1. Januar 2011‘. Kraftfahrtbundesamt. Flensburg 2011.
- [Mattes et al. 2011] Mattes, K., C. Lerch, M. Schröter und K.-A. Phan: Anwendungsfelder mobiler Energiespeicher – Eine Bestandsaufnahme und Perspektiven für die Konzeption aussichtsreicher Geschäftsmodelle für Elektrofahrzeuge. Working paper sustainability and innovation No. S 2/2011. Fraunhofer ISE und ISI. Karlsruhe 2011.
- [McKinsey 2010] A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey 2010.
- [Nitsch et al. 2010] Nitsch, J., T. Pregger, Y. Scholz, T. Naegler, M. Sterner, N. Gerhardt, A. v. Oehsen, C. Pape, Y. Saint-Drenan und B. Wenzel: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global („Leitstudie 2010“). DLR, Fraunhofer IWES im Auftrag des Bundesumweltministeriums (BMU). Stuttgart/Kassel 2010
- [NRW 2009] Wasserstoff – Schlüssel zur weltweit nachhaltigen Energiewirtschaft. Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Produktion zur Anwendung. EnergieRegion NRW. Düsseldorf 2009.
- [Oertel 2008] D. Oertel, Energiespeicher – Stand und Perspektiven. TAB Arbeitsbericht Nr. 123, Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin 2008.
- [Pehnt & Höpfner 2010] Pehnt, M. und U. Höpfner: Wasserstoff- und Stromspeicher in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien: Analyse der kurz- und mittelfristigen Perspektive. Institut für Energie- und Umweltforschung. Kurzgutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Heidelberg 2010.
- [Pehnt 2002] Pehnt, M.: Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik. VDI-Forschungsbericht Energietechnik Nr. 476. Düsseldorf 2002.
- [Pehnt 2010] Pehnt, M.: Elektromobilität und erneuerbare Energien. In: Müller, T.: 20 Jahre Recht der Erneuerbaren Energien. Würzburg 2010.
- [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.
- [Prognos/EWI/GWS 2010] Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Prognos AG, EWI, GWS im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi). Basel/Köln/Osnabrück 2010.

- [Prognos/Öko-Institut 2009] Modell Deutschland: Klimaschutz bis 2050. Prognos AG, Öko-Institut im Auftrag des WWF. Basel/Berlin 2009.
- [SRU 2010] Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen. Berlin 2010
- [Stern et al. 2011] Sterner, M., M. Jentsch und U. Holzhammer: Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes. Fraunhofer IWES im Auftrag von Greenpeace Energy. Kassel 2011.
- [Stiller et al. 2011] Stiller, C., P. Schmidt, J. Michalski, R. Wurster, U. Albrecht, U. Bünger und M. Altmann: Potenziale der Wind-Wasserstoff-Technologie in der Freien und Hansestadt Hamburg und in Schleswig-Holstein. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) im Auftrag der Wasserstoffgesellschaft Hamburg e.V. Berlin 2011.
- [Thielmann & Sauer 2011] Thielmann, A. und A. Sauer: Protokoll zum Workshop ‚Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien‘ (PRM-LIB). Frankfurt 17.2.2011. Karlsruhe 2011.
- [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 München 2010] Analyse der Notwendigkeit des Ausbaus von Pumpspeicherwerken und anderen Stromspeichern zur Integration der erneuerbaren Energien. TU München, RWTH Aachen, Deutsche Energieagentur im Auftrag der Schluchseewerk AG. München 2010.
- [UBA 2010a] Emissionsberichterstattung der Bundesrepublik Deutschland 2010. Umweltbundesamt. Dessau 2010.
- [UBA 2010b] Klaus, T., C. Vollmer, K. Werner, H. Lehmann und K. Müschen: Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Umweltbundesamt 2010.
- [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/>.
- [VDV 2009] Umfassend nachhaltige Kraftstoff- und Antriebskonzepte für den Linien-busverkehr – Darstellung und Bewertung der Resultate einer vom VDV durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchung. Positionspapier des VDV. Köln 2009.
- [WHEC 2010] 18. Weltwasserstoffkonferenz 2010. Veranstaltet von der Energie Agentur NRW unter der Schirmherrschaft der International Hydrogen Association for Hydrogen Energy (IAHE). 16.-21. Mai 2010, Essen.
- [WI/IFEU/DLR 2005] Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugten Wasserstoffs. Wuppertal Institut, IFEU und DLR im Auftrag des Umweltbundesamtes (FKZ 203 45 118). Wuppertal 2005.
- [Wichmann 2003] Wichmann, E.: Ad hoc Maßnahmen zur Schadstoffminderung an Kfz. Auswirkung Partikelfilter. GSF Neuherberg im Auftrag des UBA (UBA Forschungsbericht 203 45 161/1). Berlin 2003.
- [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.
- [Wietschel et al. 2006] Wietschel, M., U. Hasenauer, N. J. Vicens, M. Klobasa und P. Seydel: Ein Vergleich unterschiedlicher Speichermedien für überschüssigen Windstrom. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 30 (2006). Wiesbaden 2006.

