

TEXTE

30/2015

# Postfossile Energieversorgungs- optionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträger- übergreifende Bewertung



TEXTE 30/2015

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Projekt-Nr. 24180  
UBA-FB 002039

# **Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung**

von

Martin Schmied, Philipp Wüthrich  
INFRAS AG – Forschung und Beratung, Bern, Schweiz

Rainer Zah, Hans-Jörg Althaus  
Quantis, Zürich, Schweiz

Christa Friedl, Wissenschaftsjournalistin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

# Impressum

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
info@umweltbundesamt.de  
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

**Durchführung der Studie:**

INFRAS AG – Forschung und Beratung  
Mühlemattstrasse 45 3007 Bern Schweiz

**Abschlussdatum:**

2014

**Redaktion:**

Fachgebiet I 3.1 Umwelt und Verkehr  
Kirsten Adlunger

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/postfossile-energieversorgungsoptionen-fuer-einen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2015

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Projekt-Nr. 24180 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

## Kurzbeschreibung

Die vorliegende Studie „Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung“ zeigt auf, welche Kombinationen aus Antriebssystem und Kraftstoff – auch als Energieversorgungsoption bezeichnet – einen treibhausgasneutralen Verkehr in Deutschland im Jahr 2050 möglich machen. Auf Basis bestehender Forschungsarbeiten und Studienergebnisse wird ein systematischer Überblick über postfossile Optionen gegeben. Zu den potentiellen postfossilen Kraftstoffen zählen regenerativer Strom, aus regenerativem Strom hergestellte Kraftstoffe wie Power-to-Gas (PtG-Wasserstoff, PtG-Methan) und Power-to-Liquid (PtL) sowie Biokraftstoffe, zu den Antrieben neben Verbrennungsmotoren Elektromotoren, Hybride (Plug-in-Hybride, Elektrofahrzeuge mit Range-Extender) sowie Brennstoffzellen. Für Pkw, Lkw, Linienbus, Flugzeug und Seeschiff wurde untersucht, mit welcher postfossilen Energieversorgungsoption die jeweils höchsten Treibhausgasminderungen erreicht werden können. Außerdem wurden weitere ökologische, ökonomische, technische, infrastrukturelle sowie systemische Aspekte in die ganzheitliche Bewertung der Energieversorgungsoptionen einbezogen.

Die Gesamtbewertung aller Aspekte zeigt: Wenn Strom direkt im Fahrzeug genutzt werden kann, ist dies die effizienteste, ökologischste und meist auch ökonomischste Option. Ob dabei rein batterieelektrische Fahrzeuge oder Plug-In-Hybride die beste Wahl darstellen, hängt von den erforderlichen Reichweiten und davon ab, ob – wie beim Linienbus – Oberleitungen oder Schnellademöglichkeiten genutzt werden können.

Strom lässt sich aber nicht immer direkt nutzen. Bei Flugzeugen im Langstreckenverkehr und Seeschiffen im internationalen Verkehr werden auch zukünftig nach heutiger Sicht keine Elektroantriebe möglich sein. Daher werden Biokraftstoffe der 2. Generation aus Restholz und -stroh ebenso wie stromgenerierte Kraftstoffe wie PtG-Methan und PtL eine wichtige Rolle spielen. Da Biokraftstoffe der 2. Generation im globalen Maßstab nur ein begrenztes Mengenpotential aufweisen, sind für einen treibhausgasneutralen Luft- und Seeverkehr stromgenerierte Kraftstoffe zwingend notwendig. Aber auch Plug-in-Hybride benötigen für den Verbrennungsmotor flüssige Kraftstoffe. Somit ist auch der Pkw-Verkehr langfristig neben Biokraftstoffen der 2. Generation auf stromgenerierte Kraftstoffe angewiesen. Für den Lkw-Fernverkehr zeigt derzeit keine der untersuchten postfossilen Energieversorgungsoptionen eindeutige Vorteile; hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Klar ist aber, dass bei schweren Lkw im Fernverkehr selbst im Jahr 2050 rein batterieelektrische oder Plug-in-Varianten nicht möglich sein werden.

Für alle postfossilen Optionen gilt: Keine Option ohne Nachteile. Beispielsweise sind Elektromobilität, Biokraftstoffe der 2. Generation sowie stromgenerierte Kraftstoffe gerade in der Einführungsphase oftmals teurer als konventionelle Kraftstoffe. Stromgenerierte Kraftstoffe schneiden aufgrund der Energieverluste bei der Herstellung nur dann ökologisch vorteilhaft ab, wenn sie ausschließlich aus regenerativem Strom hergestellt werden. Dennoch müssen neue Konzepte frühzeitig entwickelt und Anlagenkapazitäten rechtzeitig errichtet werden, um bis 2050 eine breite Einführung zu ermöglichen – auch wenn beispielsweise regenerativer Strom in anderen Bereichen außerhalb des Verkehrs in den nächsten Jahren effizienter eingesetzt werden kann. Dabei muss die Politik mit geeigneten Maßnahmen schon kurz- und mittelfristig einen passenden Rahmen schaffen. Um langfristig bei allen Verkehrsmitteln eine treibhausgasneutrale Mobilität im Jahr 2050 zu erreichen, müssen alle verfügbaren postfossilen Energieversorgungsoptionen – Elektromobilität, stromgenerierte Kraftstoffe und Biokraftstoffe der 2. Generation – zum Einsatz kommen. Andernfalls ist dieses Ziel nicht erreichbar.

## Abstract

The present study on "Post-fossil energy supply options for a greenhouse gas neutral mobility in 2050: An assessment across all modes of transport" shows which combinations of drive train and fuel type can help achieving greenhouse gas neutral mobility by 2050. Based on existing research, the study provides a systematic review of post-fossil fuel options. These options include renewable electricity, fuels based on renewable electricity such as "Power-to-Gas" (or PtG, like hydrogen and methane) and "Power-to-Liquid" (PtL) as well as 2<sup>nd</sup> generation biofuels. Besides combustion engine vehicles electric and hybrid vehicles (plug-in-hybrids, electric vehicles with range extenders) as well as fuel cell electric vehicles are considered. For cars, trucks, buses, airplanes and ships, recommendations are made for options achieving the highest greenhouse gas reductions. At the same time, environmental, economic, technical, infrastructural and systemic aspects are taken into account.

The overall assessment shows that direct use of electricity allows for the most efficient, environmentally friendly and in the majority of cases the most economical option. The decision between battery electric vehicles and plug-in hybrids largely depends on the requirements regarding distance range and hence on whether overhead lines (for busses) or fast charging stations are available.

The direct use of electricity is not in all cases possible. For long range aviation and international sea shipping battery powered aircraft and vessels will not be available in the foreseeable future. Therefore, 2<sup>nd</sup> generation biofuels from residual timber and straw, as well as electricity-based fuels such as PtG-methane and PtL will play an important role. However, since 2<sup>nd</sup> generation biofuels on a global scale have a limited volume potential, in order to reach greenhouse gas neutral air and sea transport electricity-based fuels are essential. At the same time, hybrid vehicles also need liquid fuels. Therefore, passenger cars are also depending on 2<sup>nd</sup> generation biofuels and electricity-based fuels in the long term. For long-distance trucks none of the investigated options provide clear benefits, so more research is necessary in this field. Clearly, pure battery electric or plug-in technologies will not be available for long-distance trucks by 2050.

None of the investigated options is without disadvantages. For instance, in the introductory phase electric vehicles, 2<sup>nd</sup> generation biofuels and electricity-based fuels are likely to be more expensive than conventional options. The ecological performance of electricity-based fuels – due to the energy loss in production – is superior only when based on renewable energy sources. Nevertheless, new concepts have to be developed early and plant capacities need to be built in time for enabling broad dissemination until 2050 – even though in the short-term renewable electricity might be used in other sectors more efficiently. Policies that set the suitable framework for this development are required, even in short and mid-term. In the long term, all available post-fossil energy options – electric mobility, electricity based fuels and 2<sup>nd</sup> generation biofuels – need to be put to use in order to reach greenhouse gas neutral transport by 2050. Otherwise, this ambition cannot be achieved.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	12
Abkürzungen .....	13
1 Zusammenfassung .....	15
2 Energiewende im Verkehr für eine treibhausgasneutrale Mobilität 2050.....	19
3 Rahmen und Annahmen für die Bewertung.....	22
3.1 Energieeffizienz der Antriebstechnologien.....	22
3.2 Speicherdichten der Kraftstoffe .....	26
3.3 Wirkungsgrad der Herstellung stromgenerierter Kraftstoffe .....	29
3.4 Treibhausgasemissionen postfossiler Optionen.....	32
3.5 Kosten künftiger Fahrzeugkonzepte .....	37
4 Vorauswahl postfossiler Energieversorgungsoptionen .....	44
4.1 Treibhausgasminderung.....	46
4.2 Verzicht auf Anbaubiomasse .....	49
4.3 Mengenpotenziale.....	51
4.4 Entwicklungsstand.....	53
4.5 Ergebnis der Vorauswahl.....	54
5 Eine erste Bewertung: Treibhausgase und Kosten .....	56
5.1 Pkw .....	57
5.2 Lkw .....	62
5.3 Linienbus .....	67
5.4 Flugzeug .....	72
5.5 Seeschiff .....	78
6 Weitere Einflüsse auf die Bewertung.....	82
6.1 Weitere ökologische Aspekte.....	82
6.2 Weitere ökonomische Aspekte .....	90
6.3 Technische, infrastrukturelle und systemische Aspekte .....	93
7 Gesamtbewertung.....	96
7.1 Pkw: Elektromobilität als Kernoption .....	98
7.2 Lkw: Bester Weg für schwere Nutzfahrzeuge noch offen.....	99
7.3 Linienbus als Sonderfall: Schnellladung von Batterien als vielversprechende Option .....	101
7.4 Flugverkehr: Power-to-Liquid ist Alternative zu Biokraftstoffen.....	102

7.5	Seeschiffe: Strombasierte Kraftstoffe unverzichtbar.....	104
8	Der Weg bis zum Jahr 2050 – erste Vorüberlegungen.....	106
9	Quellenverzeichnis.....	109



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht über die präferierten postfossilen Energieversorgungsoptionen für eine treibhausgasneutrale Mobilität im Jahr 2050 differenziert nach Verkehrsmittel .....	18
Abbildung 2:	Stufen der Elektrifizierung des Antriebsstranges .....	23
Abbildung 3:	Gravimetrische und volumetrische Energiedichten ausgewählter flüssiger und gasförmiger Kraftstoffe sowie Batterien .....	27
Abbildung 4:	Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte von Fahrzeug-Batterien bis zum Jahr 2050 .....	28
Abbildung 5:	In der Studie angenommene elektrische Wirkungsgrade bei der Herstellung stromgenerierter Kraftstoffe .....	31
Abbildung 6:	Anteile verschiedener Kostenblöcke an den jährlichen Gesamtkosten eines 40-t-Lkw im Jahr 2010 .....	39
Abbildung 7:	Entwicklung der Fahrzeugbatterie-Kosten bis zum Jahr 2050 .....	42
Abbildung 8:	Übersicht über Primärenergieträger, Herstellungswege und Endenergieträger verschiedener postfossiler Energieversorgungsoptionen .....	44
Abbildung 9:	Treibhausgasemissionen (berechnet als CO <sub>2</sub> -Äquivalente, ohne Berücksichtigung von indirekten Landnutzungsänderungen/iLUC) pro MJ Kraftstoff bzw. Strom für ausgewählte postfossile Energieversorgungsoptionen im Jahr 2050 (inkl. Vergleichswert Benzin/Diesel) .....	48
Abbildung 10:	Spezifische Umweltindikatoren für Biokraftstoffe der 1. Generation relativ zur fossilen Referenz Benzin .....	50
Abbildung 11:	Globaler Endenergieverbrauch des Verkehrs 2009 und 2050 .....	51
Abbildung 12:	Theoretisches globales Produktionspotenzial von Biotreibstoffen der 2. Generation hergestellt aus land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen im Jahr 2030 (aus 10 % bzw. 25 % der Reststoffe) .....	52
Abbildung 13:	Kosten pro kg Algenbiomasse und pro l Öl/Ethanol aus Algen unter verschiedenen Szenarien in Kanada .....	53
Abbildung 14:	Ergebnis der Vorauswahl der postfossilen Energieversorgungsoptionen .....	55
Abbildung 15:	Postfossile Energieversorgungsoptionen für Pkw .....	57
Abbildung 16:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung eines Mittelklasse-Pkw im Jahr 2050 .....	59
Abbildung 17:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen eines Mittelklasse-Pkw im Jahr 2050: Referenzfall und Sensitivität .....	60
Abbildung 18:	Bandbreite der spezifischen Kosten für Fahrzeuganschaffung und Energie für einen Mittelklasse-Pkw im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010) .....	61
Abbildung 19:	Postfossile Energieversorgungsoptionen für Lkw .....	63

Abbildung 20:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung für einen 10-t-Lkw im Nahverkehr im Jahr 2050 .....	64
Abbildung 21:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung für einen 40-t-Lkw im Fernverkehr im Jahr 2050 .....	65
Abbildung 22:	Bandbreite der spezifischen Kosten für Fahrzeuganschaffung und Energie für einen 10-t-Lkw im Nahverkehr im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010).....	66
Abbildung 23:	Bandbreite der spezifischen Kosten für Fahrzeuganschaffung und Energie für einen 40-t-Lkw im Fernverkehr im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010, O-Lkw ohne Kosten der Oberleitungsinfrastruktur).....	66
Abbildung 24:	Postfossile Energieversorgungsoptionen für Linienbus.....	68
Abbildung 25:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung für einen 12-m-Standardbus im Stadtverkehr im Jahr 2050 .....	70
Abbildung 26:	Bandbreite der spezifischen Kosten für Fahrzeuganschaffung und Energie für einen 12-m-Standardbus im Stadtverkehr im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010).....	71
Abbildung 27:	Postfossile Energieversorgungsoptionen für Flugzeuge.....	73
Abbildung 28:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung für Kurz- und Langstreckenflugzeuge im Jahr 2050 - ohne Treibhausgaswirkung von Wasserdampf und Luftschadstoffen in Reiseflughöhe .....	74
Abbildung 29:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung für Kurz- und Langstreckenflugzeuge im Jahr 2050 - mit Treibhausgaswirkung von Wasserdampf und Luftschadstoffen in Reiseflughöhe .....	75
Abbildung 30:	Vergleich der Kerosinkosten (2010 und 2050) mit den Produktionskosten postfossiler Kraftstoffe für den Luftverkehr im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010).....	76
Abbildung 31:	Spezifische Kosten für Flugzeuganschaffung und Energie für Kurzstreckenflugzeug im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010) .....	77
Abbildung 32:	Postfossile Energieversorgungsoptionen für Containerschiffe .....	78
Abbildung 33:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung von Containerschiffen im Feeder-Verkehr (800 TEU) und im Interkontinental-Verkehr (15.000 TEU) im Jahr 2050.....	79
Abbildung 34:	Spezifische Kosten für Schiff und Kraftstoffe für ein Containerschiff im Interkontinental-Verkehr (15.000 TEU) im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010).....	80

Abbildung 35:	Fahrstrecke pro MJ erneuerbaren Stroms für einen Mittel-Klasse-Pkw (Golf-Klasse) ausgewählte postfossile Energieversorgungsoptionen.....	83
Abbildung 36:	Primärenergieverbrauch pro Fahrzeug-km für Mittelklasse-Pkw (Golf-Klasse) im Jahr 2050 basierend auf heutigen Primärenergiefaktoren .....	84
Abbildung 37:	Versauerungswirkung durch SO <sub>2</sub> - und NO <sub>x</sub> -Emissionen (berechnet in SO <sub>2</sub> -Äquivalenten) für die Herstellung von konventionellen Kraftstoffen, Biokraftstoffen sowie stromgenerierten Kraftstoffen aus erneuerbarer Energie (WTT-Betrachtung).....	85
Abbildung 38:	Bedarf an wichtigen und kritischen Metallen für Elektro-Pkw und Pkw mit Verbrennungsmotor .....	87
Abbildung 39:	Typische flächenspezifische Energieerträge von erneuerbarer Primärenergien .....	89
Abbildung 40:	Bandbreite der spezifischen Kosten für Fahrzeuganschaffung, Kraftstoffe, Oberleitungen und Tankstelleninfrastruktur für einen 40-t-Lkw im Fernverkehr im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010) .....	92
Abbildung 41:	Übersicht der Fahrzeug- und Versorgungsinfrastrukturen postfossiler Energieversorgungsoptionen bei Bussen.....	94
Abbildung 42:	Überblick über die systemische Anschlussfähigkeit der postfossilen Energieversorgungsoptionen nach Art des Verkehrsmittels .....	95
Abbildung 43:	Überblick über die möglichen postfossilen Energieversorgungsoptionen pro Verkehrsmittel im Jahr 2050.....	96
Abbildung 44:	Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für den Pkw für das Jahr 2050.....	98
Abbildung 45:	Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für den 10-t-Lkw im Nahverkehr im Jahr 2050 .....	100
Abbildung 46:	Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für den 40-t-Lkw im Fernverkehr im Jahr 2050.....	101
Abbildung 47:	Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für Linienbusse im Jahr 2050.....	102
Abbildung 48:	Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für Flugzeug im Jahr 2050 .....	103
Abbildung 49:	Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für das Seeschiff für das Jahr 2050.....	104
Abbildung 50:	Bausteine einer Energiewende im Verkehr .....	108

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Annahmen zur Entwicklung der Energieeffizienz der Verkehrsmittel.....	25
Tabelle 2:	Angenommene Kapazität der Batterien nach Verkehrsmittel und Antriebstechnologie (in Klammern: Angaben zur Reichweite).....	29
Tabelle 3:	Ableitung der prozentualen Minderung der CO <sub>2</sub> - und Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) durch Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung im Jahr 2050 bezogen auf 2009 .....	33
Tabelle 4:	Treibhausgasemissionsfaktoren für Strom und strombasierte Kraftstoffe in g CO <sub>2</sub> -Äquivalente (CO <sub>2</sub> e) pro MJ Strom bzw. MJ Kraftstoff im Jahr 2050 .....	34
Tabelle 5:	Treibhausgasemissionsfaktoren für Biokraftstoffe der 2. Generation in g CO <sub>2</sub> -Äquivalente (CO <sub>2</sub> e) pro MJ Kraftstoff im Jahr 2050 .....	35
Tabelle 6:	Variation der Annahmen für die Kraftstoffherstellung für das Jahr 2050 im Vergleich zum Referenzfall (optimistischer und pessimistischer Fall) .....	35
Tabelle 7:	Leergewicht, Lebensdauer und Jahresfahrleistungen für verschiedene Verkehrsmittel .....	36
Tabelle 8:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Fahrzeug-km für die Herstellung eines Mittelklasse-Pkw (Golf-Klasse) heute sowie im Jahr 2050 .....	37
Tabelle 9:	Weltmarktpreise für konventionelle Kraftstoffe sowie Produktionskosten ausgewählter postfossiler Kraftstoffe sowie Strom heute und im Jahr 2050 (günstigster und ungünstigster Fall, ohne MwSt., Energie- bzw. Mineralölsteuer) .....	41
Tabelle 10:	Kosten für die Fahrzeuganschaffung (Verkaufspreise ohne MwSt.) für Lkw mit unterschiedlichen Antriebskonzepten im Jahr 2050.....	43
Tabelle 11:	Mögliche Kriterien für die Vorauswahl postfossiler Energieversorgungsoptionen.....	45
Tabelle 12:	Übersicht zu den Kriterien für die Bewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen.....	97

## Abkürzungen

BEV	Battery Electric Vehicle
BtL	Biomass-to-Liquid
BYD	Build Your Dreams
BZ	Brennstoffzelle
CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage (CO <sub>2</sub> -Abtrennung und -Speicherung)
CGH <sub>2</sub>	Compressed hydrogen (komprimierter Wasserstoff)
CNG	Compressed Natural Gas
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> e	CO <sub>2</sub> -Äquivalente
CtG	Coal-to-Gas
CtL	Coal-to-Liquid
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EJ	Exajoule
EU	Europäische Union
FC	Fuel Cell
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FT	Fischer-Tropsch
GtL	Gas-to-Liquid
GWP	Global Warming Potential
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HFO	Heavy Fuel Oil (Schweröl)
ICE	Internal Combustion Engine
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
IEA	Internationale Energieagentur
iLUC	Indirect Land Use Change (indirekte Landnutzungsänderungen)
IMO	International Maritime Organisation
JTE	Jet Turbine Engine
LH <sub>2</sub>	Liquid hydrogen (flüssiger Wasserstoff)
Li-Ionen-Akku	Lithium-Ionen-Akkumulator
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquified Natural Gas
MDO	Marine Diesel Oil
MGO	Marine Gasoil

MJ	Megajoule
PHEV	Plug-in Electric Hybrid Vehicle
Pkw	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
SNG	Synthetic Natural Gas
TCO	Total Cost of Ownership
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit (20-Fuss-Standardcontainer)
TTW	Tank-to-Wheel
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

## 1 Zusammenfassung

Die Verkehrswende ist ein wichtiger Baustein der Energiewende in Deutschland. Verkehrsverlagerung, -vermeidung und Effizienzverbesserung der Fahrzeuge können zwar Energieverbrauch und Emissionen senken, aber für eine treibhausgasneutrale Gesellschaft im Jahr 2050 in Deutschland braucht es mehr: Die Energieversorgung des Verkehrs muss auf postfossile Energieträger umgestellt werden. Es braucht neue Konzepte für Fahrzeuge, Antriebe, Kraftstoffe und Infrastruktur. Doch welche Kraftstoffe und Antriebe sind dafür die richtigen?

Diese Frage steht im Zentrum der vorliegenden Studie „Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung“, die INFRAS und Quantis im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt haben. Sie zeigt, welche Kombinationen aus Antriebssystem und Kraftstoff – auch als Energieversorgungsoption bezeichnet – einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050 möglich machen. Auf Basis bestehender Forschungsarbeiten und Studienergebnisse wird ein systematischer Überblick über postfossile Optionen gegeben. Für Pkw, Lkw, Bus, Flugzeug und Seeschiff werden Empfehlungen formuliert, mit welcher Option die höchsten Treibhausgasminderungen langfristig erreicht werden können. Die Bahn wurde hingegen nicht weiter betrachtet, da für dieses Verkehrsmittel mit der Elektrifizierung in Kombination mit der Nutzung von regenerativem Strom bereits eine treibhausgasneutrale Option zur Verfügung steht, die lediglich weiter umgesetzt werden müsste. Nicht Gegenstand dieser Untersuchung war zudem die Frage, welche Maßnahmen und Strategien notwendig wären, die vorteilhaften Energieversorgungsoptionen bis 2050 marktreif zu machen.

Fossile Energien sind für eine treibhausgasneutrale Gesellschaft ungeeignet. Daher werden in dieser Studie ausschließlich postfossile Optionen berücksichtigt:

- direkte Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom;
- Nutzung von stromgenerierten Kraftstoffen wie Power-to-Gas (z. B. PtG-Wasserstoff und PtG-Methan) sowie Power-to-Liquid (PtL), die mittels erneuerbarem Strom hergestellt werden;
- Biokraftstoffe der 1. Generation aus Anbaubiomasse und Reststoffen wie z. B. Ethanol, Biodiesel, Pflanzenöle, Biogas;
- Biokraftstoffe der 2. Generation aus Reststoffen (Restholz und -stroh), deren Gewinnung nicht in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion steht und die stofflich nicht genutzt werden können, wie z. B. Zellulose-Ethanol, Biomass-to-Liquid (BtL), Synthetic Natural Gas (Bio-SNG);
- Biokraftstoffe der 3. Generation, die aus Algen und unabhängig von Kulturflächen gewonnen werden.

Viele der postfossilen Energieträger werden auch im Jahr 2050 noch in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor eingesetzt, die bis dann allerdings deutlich energieeffizienter sein werden. Strom wird entweder in batterieelektrischen Fahrzeugen oder Oberleitungsfahrzeugen genutzt. Stromgenerierter Wasserstoff kann daneben in Brennstoffzellenfahrzeugen zum Einsatz kommen.

Der Blick allein auf die Treibhausgasminderung durch postfossile Optionen greift für eine umfassende Bewertung zu kurz. Aus diesem Grund werden weitere ökologische, ökonomische, technische, infrastrukturelle sowie systemische Aspekte in die Untersuchung einbezogen. Die Studie fokussiert zwar auf die Situation in Deutschland, für Verkehrsträger wie Flugzeug und

Schiff wird aber der internationale Rahmen bei der Bewertung notwendig und in dieser Studie auch berücksichtigt. Gleiches gilt auch bei den Potentialen für Biokraftstoffe – auch hier ist nur eine globale Perspektive sinnvoll.

Um die Vielzahl der Möglichkeiten einzugrenzen, wurden im ersten Schritt dieser Studie vier Kriterien definiert, die erfüllt werden müssen, um in die engere Wahl für eine postfossile Energieversorgungsoption für das Jahr 2050 zu kommen. Nur diese ausgewählten Optionen wurden dann in dieser Studie einer Detailbewertung unterzogen. Für die Vorauswahl wurden folgende vier Kriterien zugrunde gelegt:

- Treibhausgasminde rung: Die postfossilen Optionen müssen im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der Kraftstoff- und Fahrzeugherstellung um mindestens 50 % gegenüber konventionell angetriebenen Verkehrsmitteln senken.
- Verzicht auf Anbaubiomasse: Kraftstoffe, die bei der Herstellung Anbaubiomasse verwenden, wurden generell als nicht nachhaltige Option ausgeschlossen, da – wie in dieser Studie gezeigt – mit dem intensiven Anbau von Energiepflanzen erhebliche ökologische Folgewirkungen verbunden sind.
- Ausreichendes Mengenpotential: Der postfossile Kraftstoff muss in der Lage sein, theoretisch mindestens 10 % des weltweiten Endenergiebedarfs des Verkehrs im Jahr 2050 zu decken.
- Entwicklungsstadium: Die postfossile Option muss 2050 großtechnisch einsetzbar sein.

Das Ergebnis dieser Vorauswahl war, dass Biokraftstoffe der 1. und 3. Generation von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen wurden. Biokraftstoffe der 1. Generation aus Anbaubiomasse verursachen zu geringe Treibhausgasminde rungen und zu hohe ökologische Folgewirkungen in anderen Bereichen; aus Reststoffen haben sie zwar eine deutlich bessere Umweltbilanz, sind aber in zu geringen Mengen verfügbar und können lediglich in Nischenmärkten eingesetzt werden. Die Herstellungsverfahren für Biokraftstoffe der 3. Generation stecken demgegenüber erst in den Anfängen, so dass eine großtechnische Realisierung bis 2050 wenig wahrscheinlich ist. Vor allem können Kraftstoffe aus Algen die geforderte Treibhausgasminde rung nach aktuellem Wissensstand in 2050 nicht erbringen.

Für eine postfossile Energieversorgung stehen daher die direkte Nutzung von regenerativem Strom, mittels regenerativen Stroms hergestellte Kraftstoffe wie PtG-Wasserstoff, PtG-Methan oder PtL sowie Biokraftstoffe der 2. Generation aus Restholz und -stroh (Zellulose-Ethanol, BtL, Bio-SNG) zur Verfügung. Die Analysen dieser Studie zeigen, dass Biokraftstoffe der 2. Generation aus land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen weltweit im günstigsten Fall lediglich zwischen 13 bis 19 EJ an Energie im Jahr 2050 zur Verfügung stellen können. Zum Vergleich: Der weltweite Endenergieverbrauch des Verkehrs wird auf 100 bis 170 EJ im Jahr 2050 geschätzt. Daher erfüllen zwar Biokraftstoffe der 2. Generation aus Restholz und -stroh die geforderte Mindestschwelle, um in dieser Studie detaillierter untersucht zu werden. Sie können aber den Verkehr im Jahr 2050 nicht annähernd allein versorgen.

Die so ausgewählten postfossilen Energieversorgungsoptionen wurden schließlich einer Detailbewertung unterzogen. Dabei wurden Treibhausgaswirkungen, Energieeffizienz, Primärenergiebedarf, Luftschadstoff- und Lärmemissionen, der Verbrauch kritischer Metalle, Wasser- und Flächenverbrauch sowie Auswirkungen auf die Biodiversität als ökologische Kriterien betrachtet. Bei den Kosten wurden die Anschaffungs- und Energiekosten jeder Option für alle Verkehrsträger bewertet. Ergänzend wurden orientierende Aussagen zu den Kosten der notwendigen Infrastruktur aus Tankstellen, Ladestationen oder Oberleitungen getroffen. Unter den sonstigen Aspekten wurden vor allem Reichweitenbeschränkungen, der Anpassungsbedarf bei



Fahrzeugen, Versorgungs- und Verkehrsinfrastruktur, Realisierbarkeit bis 2050 und die systemische Anschlussfähigkeit berücksichtigt. Die Bewertungen wurden dabei für alle Verkehrsträger getrennt durchgeführt – bei Lkw, Flugzeug und Schiff wird zwischen kurzen und langen Einsatzstrecken unterschieden.

Für die meisten Verkehrsträger konnten präferierte postfossile Energieversorgungsoptionen für das Jahr 2050 identifiziert werden. Dabei ergibt sich meist ein deutliches Ranking. Wenn erneuerbarer Strom direkt im Fahrzeug genutzt werden kann, ist dies die effizienteste, ökologischste und meist auch ökonomischste Option. Ob dabei rein batterieelektrische Fahrzeuge oder so genannte Plug-In-Hybride die beste Wahl darstellen, hängt von den erforderlichen Reichweiten ab. Beim Nahverkehrs-Lkw mit seiner geringen Tagesfahrleistung dürfte die batterieelektrische Option ausreichend sein, beim Pkw ist eher der Plug-In-Hybrid bzw. das Elektrofahrzeug mit Range-Extender die erste Wahl. Den größten Spielraum hat der elektrifizierte Linienbus: Durch die feste Linienführung kann die Batterie unterwegs an Haltestellen nachgeladen werden, was Reichweiteneinschränkungen auflöst. Aber auch Oberleitungsbusse mit zusätzlicher Batterie für leitungsfreie Teilstrecken ermöglichen die direkte und effiziente Nutzung von regenerativem Strom.

Auch wenn Biokraftstoffe der 2. Generation und stromgenerierte Kraftstoffe bei diesen Verkehrsmitteln nur zweite oder dritte Wahl sind, dürfen sie dennoch nicht ganz außer Acht gelassen werden. Plug-In-Hybride bzw. Elektrofahrzeuge mit Range-Extender benötigen für den Verbrennungsmotor flüssige Kraftstoffe wie Zellulose-Ethanol, BtL oder PtL. Gasförmige Kraftstoffe sind prinzipiell für Hybride ebenfalls denkbar, erscheinen jedoch aufgrund des aufwändigeren Energiespeichers in Kombination mit dem relativ großen und schweren Batteriespeicher eine unwahrscheinliche Energieversorgungsoption und werden daher in dieser Studie als wenig zielführend angesehen. Da Biokraftstoffe der 2. Generation als postfossile Option nur beschränkt verfügbar sind, werden möglicherweise auch bei Hybrid-Pkw langfristig stromgenerierte Kraftstoffe als Zweitkraftstoff eingesetzt werden müssen, wenn eine treibhausgasneutrale Mobilität mit Treibhausgasreduzierungen von mehr als 95 % im Verkehr in Deutschland erreicht werden soll. Dies gilt auch vor dem Hintergrund, dass die Effizienz der Produktion stromgenerierter Kraftstoffe niedrig und damit die Produktionskosten hoch sind.

Brennstoffzellenfahrzeuge haben im Vergleich zum Verbrennungsmotor eine vergleichsweise hohe Energieeffizienz, zugleich verursacht dieses Konzept aber auch hohen Anpassungsbedarf auf Fahrzeug- und Versorgungsseite und besitzt eine schlechte Anschlussfähigkeit an aktuelle Fahrzeugkonzepte. Brennstoffzellen wären allerdings für den Fernverkehrs-Lkw eine Option unter der Maßgabe, dass sich die direkte Stromnutzung in Form von Oberleitungs-Lkw nicht realisieren lässt. Für den Oberleitungs-Lkw müsste ein Großteil des europäischen Autobahnnetzes elektrifiziert werden – ein aus heutiger Sicht wenig wahrscheinliches Szenario, so dass die Realisierung dieser Variante trotz ökologischer und ökonomischer Vorteile für 2050 eher unwahrscheinlich ist. Allerdings zeigt keine der möglichen Optionen für den Lkw-Fernverkehr in der Gesamtschau eindeutige Vorteile, so dass in weitere Detailuntersuchungen geklärt werden muss, welche der möglichen Energieversorgungsoption langfristig vorteilhaft ist (siehe Abbildung 1).

Die direkte Nutzung von Strom kommt für Flugzeuge und Schiffe, die auf Langstrecken bzw. im internationalen Verkehr eingesetzt werden, nicht in Frage. Zwar könnten beide Verkehrsträger für die Kurzstrecke PtG-Wasserstoff für Brennstoffzellenantriebe nutzen. Für längere Routen stehen im Flugverkehr aber nur die flüssigen Kraftstoffe BtL und PtL, für Schiffe zusätzlich die Flüssiggasoptionen Bio-SNG und PtG-Methan zur Auswahl, die auch zukünftig in konventionellen Turbinen bzw. in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Im direkten Vergleich schneiden Biokraftstoffe der 2. Generation und stromgenerierte Kraftstoffe ökologisch ähnlich ab,

Biokraftstoffe haben langfristig geringe Kostenvorteile. Gegenüber stromgenerierten Kraftstoffen können Biokraftstoffe der 2. Generation also Kosten senken, stehen aber langfristig nicht in den benötigten Mengen zur Verfügung. Um Luft- und Seeverkehr möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist daher der Einsatz von mittels regenerativem Strom hergestellten Kraftstoffen wie PtL (Luftfahrt) bzw. PtL oder PtG-Methan (Seefahrt) für das Erreichen einer Treibhausgasneutralität im Verkehr unumgänglich – unabhängig davon, dass die Herstellung stromgenerierter Kraftstoffe viel Energie verbraucht: Ein Megajoule (MJ) PtL verbraucht rund 2 MJ regenerativen Strom. Dies wirkt sich auch auf die Produktionskosten aus – stromgenerierte Kraftstoffe sind auch im Jahr 2050 tendenziell teurer als Biokraftstoffe der 2. Generation.

Abbildung 1 zeigt spezifisch für alle Verkehrsträger die vorteilhaftesten postfossilen Optionen als Ergebnis der Bewertung der ökologischen, ökonomischen, technischen, infrastrukturellen und systemischen Aspekte. Lediglich bei Fernverkehrs-Lkw als auch beim Schiff sind weitere Detailuntersuchungen notwendig, die möglichen Optionen weiter einzuschränken. Beim Schiffsverkehr stellt sich allerdings die Frage, ob die Kombination aus Biokraftstoffe und stromgenerierten Kraftstoffen flüssig oder gasförmig zum Einsatz kommen.

Die Untersuchung zeigt aber auch klar: Grundsätzlich ist das Ziel einer treibhausgasneutralen Mobilität im Jahr 2050 erreichbar. Die noch offene Frage ist, wie die Wege hin zu diesem Ziel ausgestaltet werden müssen und wie Hürden und Hemmnisse auf diesen Wegen abgebaut werden können. Für die Verkehrswende gilt wie für die Energiewende auch: Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft müssen sich auf ein gemeinsames Konzept verständigen, damit das anspruchsvolle Ziel einer treibhausgasneutralen Gesellschaft keine Vision bleibt.

Abbildung 1: Übersicht über die präferierten postfossilen Energieversorgungsoptionen für eine treibhausgasneutrale Mobilität im Jahr 2050 differenziert nach Verkehrsmittel

	Verkehrsmittel					
	Pkw	Lkw-Nahverkehr	Lkw-Fernverkehr	Linienbus	Flugzeug	Schiff
ICE: Ethanol (Holz/Stroh)						
ICE/JTE: BtL (Holz/Stroh)			○		○	○
ICE/JTE: PtL			●		●	●
ICE: Bio-SNG (Holz/Stroh)			○			○
ICE: PtG-Methan			●			●
ICE/JTE: PtG-Wasserstoff						
FC: PtG-Wasserstoff			●			
BEV: Regenerativer Strom	●	●		●		
PHEV: Regenerativer Strom + BtL	○	○				
PHEV: Regenerativer Strom + PtL	●	●				
Oberleitung: Regenerativer Strom			●	●		

● = präferierte Optionen; ○ = Option mit eingeschränktem Mengenpotential

ICE = Internal combustion engine; JTE = Jet turbine engine; FC = Fuel cell, BEV = Battery electric vehicle, PHEV = Plug-in hybrid electric vehicle.

[eigene Darstellung]

## 2 Energiewende im Verkehr für eine treibhausgasneutrale Mobilität 2050

Die Debatte um klimafreundliche Antriebe und Kraftstoffe hat schon Tradition – dabei wechseln Schwerpunkte und Strategien in recht hohem Tempo. Aktuell stehen in Deutschland Elektroautos hoch im Kurs, noch vor wenigen Jahren galten Biokraftstoffe als tragende Säule für einen klimaverträglichen Verkehr. Um die Jahrtausendwende wurde der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen als zukunftsweisend diskutiert. Die EU setzt in ihrer Strategie „Saubere Energie für den Verkehr“ dagegen auf einen Mix aus Biokraftstoffen, Gas, Wasserstoff und Strom [EK 2013]. Und außerhalb der EU zeigen die Zeichen teilweise in eine ganz andere Richtung, der Klimaschutz steht dabei nicht im Mittelpunkt: Länder mit großen Kohlevorkommen stellen beispielsweise bereits heute synthetische Kraftstoffe aus Kohle her.

Warum unterscheiden sich die Strategien für alternative Antriebe und Kraftstoffe so stark? Ein wichtiger Punkt ist der technologische Fortschritt, der den Debatten immer wieder eine neue Richtung gibt. Durch die Informations- und Kommunikationsbranche als Innovationstreiber sind heute beispielsweise Energiespeicherdichten von Batterien erreichbar, die Elektrofahrzeuge erst sinnvoll möglich machen. Wesentlicher aber ist, dass viele Länder auf Technologien und Energieträger setzen, die unabhängiger von Ölimporten machen und die national verfügbar sind: China setzt zwar heute noch auf aus Kohle hergestellte Kraftstoffe. Aufgrund seines technologischen Vorsprungs in der Batterietechnologie forciert China aber aktuell die Elektromobilität. Die USA haben durch Fracking als neu eingesetzte Fördermethode dem Erdgas als Kraftstoff für Lkw einen Boom beschert.

In Deutschland sollen alternative Antriebe und Kraftstoffe aber nicht nur langfristig die Versorgung sichern und Mobilität bezahlbar halten, sondern vor allem auch die Klimafolgen des Verkehrs deutlich mindern. Längst nicht alle Länder weisen dem Umwelt- und Klimaschutz ein solch großes Gewicht bei. Auch das erklärt die unterschiedliche Bedeutung, die alternativen Kraftstoffen und Fahrzeugantrieben für die Zukunft beigemessen wird.

Nicht zuletzt sind die Zeithorizonte unterschiedlich und verändern sich. Strategien für alternative Antriebe und Kraftstoffe werden in Deutschland mehr und mehr für einen Zeitraum bis zum Jahr 2050 entwickelt. Das war bis vor einigen Jahren nicht der Fall. Viele Studien bezogen sich damals auf einen mittelfristigen Zeitraum von zehn bis 20 Jahren. Auch die EU-Strategie „Saubere Energie für den Verkehr“ ist beispielsweise noch auf einen mittelfristigen Zeithorizont ausgerichtet.

### Ziel der Studie

Das Umweltbundesamt hat im vergangenen Jahr mögliche Wege in eine treibhausgasneutrale Gesellschaft im Jahr 2050 untersucht [UBA 2013a]. Demnach wäre eine Minderung der Treibhausgasemissionen in Deutschland um 95 % gegenüber 1990 möglich. Die Studie zeigt aber auch, dass die Minderungen einzelner Sektoren höchst unterschiedlich ausfallen. Aus Landwirtschaft und Industrie sind demnach Emissionen von rund 60 Mio. t Treibhausgase (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente) auch im Jahr 2050 unvermeidbar. Für eine klimaverträgliche Gesellschaft in Deutschland müssten daher vor allem alle energiebedingten Emissionen – zu deren Verursachern auch der Verkehr zählt – gegenüber heute nahezu treibhausgasneutral werden. Dieses ehrgeizige Ziel kann nicht allein durch Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung sowie steigender Energieeffizienz und damit sinkendem Energieverbrauch erreicht werden [Öko-Institut 2013a]. Um den Verkehr treibhausgasneutral zu gestalten, bedarf es neben diesen Elementen einer Verkehrswende auch einer Umstellung der Energieversorgung und damit einer Energiewende im Verkehr. Doch welche alternativen Antriebe und postfossile Kraftstoffe können dies erreichen?

Das Umweltbundesamt hat INFRAS und Quantis mit der Studie „Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung“ beauftragt. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung steht die Frage, welche Kombination aus Antriebssystem und Kraftstoff – im Folgenden auch als Energieversorgungsoption bezeichnet – einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050 möglich macht. Die Studie soll einen systematischen und umfassenden Überblick der verschiedenen Möglichkeiten geben und Empfehlungen aussprechen. Es gilt, diejenigen Energieversorgungsoptionen zu identifizieren, die langfristig die höchsten Minderungen der Treibhausgasemissionen erzielen und damit eine treibhausgasneutrale Mobilität in Deutschland ermöglichen können. Die Untersuchung konzentriert sich also auf das Ziel, dass idealerweise im Jahr 2050 erreicht werden sollte. Nicht betrachtet wird dagegen der Weg hin zu diesem klimaverträglichen Verkehrs-Szenario. Fragen dazu müssten in nachgelagerten Untersuchungen geklärt werden.

Kraftstoffe auf fossiler Basis sind keine Option, um bis 2050 eine Treibhausgasneutralität des Verkehrs zu erreichen.<sup>1</sup> In dieser Studie werden daher ausschließlich „postfossile“ Optionen betrachtet [Adlunger et al. 2013]:

- direkte Nutzung von regenerativem Strom in batterieelektrischen oder oberleitungsgebundenen Fahrzeugen,
- indirekte Nutzung von regenerativem Strom zur Herstellung von so genannten stromgenerierten Kraftstoffen (z. B. Wasserstoff durch Elektrolyse oder die Weiterverarbeitung des Wasserstoffs zu Methan oder synthetischen Kraftstoff – auch als Power-to-Gas und Power-to-Liquid bezeichnet),
- Kraftstoffe auf biogener Basis.

Jedes Verkehrsmittel, ob Pkw, Lkw, Bus, Flugzeug oder Schiff hat seine Spezifika. In dieser Untersuchung werden daher die Empfehlungen getrennt für die Verkehrsmittel erarbeitet. Auf den Einbezug der Bahn in die Untersuchung wurde verzichtet, da mit der Elektrifizierung derzeitiger Dieselstrecken und der damit verbundenen Nutzungsmöglichkeit von regenerativem Strom bereits eine postfossile Energieversorgungsoption zur Verfügung steht, die lediglich weiter umgesetzt werden muss.

Bei der Bewertung fokussiert die Studie auf Deutschland. Welche Treibhausgasreduzierung erzielt werden können, welche Kosten damit verbunden sind – diese Aspekte können nur im nationalen Kontext sinnvoll diskutiert werden. Dennoch gilt bei den Betrachtungen: Insellösungen für Deutschland sind nicht realisierbar und machen daher wenig Sinn. Beispielsweise müssen beim Flugzeug und Schiff als internationale Verkehrsmittel auch die globale Ebene mit einbezogen werden. Die ausgewählten postfossilen Energieträger müssen darüber hinaus ausreichende Mengenpotentiale besitzen, um den Verkehr weltweit zu versorgen. Daher bezieht diese Studie – wo immer nötig – die europäische oder internationale Ebene mit ein, auch wenn der Fokus auf Deutschland liegt.

---

<sup>1</sup> Durch eine CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung (im englischen als Carbon Dioxide Capture and Storage oder kurz als CCS bezeichnet) wäre Strom mit konventionellen Kraftwerken (z. B. Kohle oder Gas) treibhausgasneutral herstellbar und könnte theoretisch zur Produktion stromgenerierter Kraftstoffe genutzt werden. Aufgrund der damit verbundenen Umweltauswirkungen der CCS-Technologie und den begrenzten CO<sub>2</sub>-Lagerstätten hält das Umweltbundesamt dieses Verfahren für keinen geeigneten Baustein in einem nachhaltigen, treibhausgasneutralen Energiesystem, so dass diese Technologie in dieser Studie nicht für die Kraftstoffherstellung berücksichtigt wird [UBA 2014].

Auch welcher Weg international beim Klimaschutz eingeschlagen wird, hat Rückwirkungen auf Deutschland. Durch die Herstellung von Energie und Waren (z. B. Fahrzeuge) im Ausland werden „graue“ Emissionen dann importiert, wenn Deutschland selbst treibhausgasneutral wäre. Es kann nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden, dass global bis 2050 die Treibhausgasemissionen so gesenkt werden, dass die Produktionen in diesen Ländern ebenfalls treibhausgasneutral erfolgen. Die Studie geht daher zwar von einem treibhausgasneutralen Deutschland, aber in einer noch nicht treibhausgasneutralen Welt aus. Welche Auswirkungen mehr Klimaschutz weltweit auf die Bewertung der Energieversorgungsoptionen des Verkehrs in Deutschland hätte, wird allerdings ansatzweise in der Studie ebenfalls aufgezeigt.

Die Studie soll in erster Linie die postfossilen Energieversorgungsoptionen identifizieren, die langfristig eine treibhausgasneutrale Mobilität ermöglichen. Allein der Blick auf eine Treibhausgasminderung greift aber zu kurz. Daher werden in dieser Studie weitere ökologische Aspekte, aber auch ökonomische, technische, infrastrukturelle sowie systemische Aspekte in die Bewertung einbezogen. Nur die Kombination aus alternativem Antrieb und postfossilem Kraftstoff, die unter Berücksichtigung aller Aspekte Vorteile aufweist, sollte dann auch bei den einzelnen Verkehrsmitteln realisiert werden.

Nicht zuletzt: Bei dieser Studie handelt es sich um eine Synthese bereits veröffentlichter Studien und Untersuchungen, die um eigene Analysen ergänzt werden. Fragestellungen, die allerdings bisher in anderen Studien noch nie untersucht wurden, können daher auch nicht in dieser Untersuchung beantwortet werden. Schwerpunkt dieser Studie ist vielmehr, die möglichen Energieversorgungsoptionen für alle Verkehrsmittel zu identifizieren, systematisch darzustellen und aufgrund der vorliegenden Ergebnisse zu bewerten.

### **Aufbau der Studie**

Eine Bewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen ist nur möglich, wenn die Rahmenbedingungen und Festlegungen bekannt und vor allem vergleichbar sind. Welcher Rahmen für die Bewertung der Optionen im Jahr 2050 angenommen wurde, ist in Kapitel 3 dokumentiert. Im Kapitel 4 erfolgt eine Vorauswahl der postfossilen Energieversorgungsoptionen, die in dieser Studie vertieft untersucht werden. Hierzu werden klare Kriterien definiert.

Die Bewertung der ausgewählten Optionen erfolgt dann in zwei Schritten. Kapitel 5 dokumentiert den ersten Schritt: Die Bewertung anhand von Treibhausgasemissionen und Kosten. Die Berücksichtigung anderer Kriterien – aller weiteren ökologischen und ökonomischen, aber auch technologischen, infrastrukturellen und systemischen Aspekte – findet sich in Kapitel 6. Diese Zweiteilung macht Sinn, da für eine treibhausgasneutrale Mobilität vor allem interessiert, wie hoch der Beitrag künftiger Energieversorgungsoptionen zur Treibhausgasminderung ist und welche Kosten damit verbunden sind. Auf diese Aspekte wird – verkehrsmittelspezifisch – vertieft in Kapitel 5 eingegangen. Übergreifende Aspekte wie Ressourcen- und Flächenverbrauch können unabhängig vom Verkehrsmittel betrachtet werden und werden in Kapitel 6 separat dargestellt.

Kapitel 7 liefert schließlich die Gesamtschau unter Berücksichtigung aller Aspekte und gibt abschließende Empfehlungen, welche postfossile Energieversorgungsoptionen pro Verkehrsmittel am zielführendsten sind. Kapitel 8 widmet sich einem Ausblick und Überlegungen, welche Hürden und Stolperfallen auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen Mobilität bis zum Jahr 2050 lauern, wo eventuell Probleme auftreten können. Hier wird auch auf möglichen weiteren Forschungsbedarf eingegangen.

### 3 Rahmen und Annahmen für die Bewertung

Keine Bewertung ohne Annahmen. Dies gilt umso mehr, je weiter entfernt der Bewertungszeitraum liegt. Da in dieser Studie Aussagen für den Verkehr im Jahr 2050 getroffen werden, sind vielfältige Entwicklungsmöglichkeiten denkbar. Die Chancen der Elektromobilität hängen beispielsweise stark von der Entwicklung der Energiedichten und Kosten der Batterien ab. Für strombasierte Kraftstoffe ist die Produktionsweise des Stroms entscheidend und die Frage, mit welchem Wirkungsgrad die Kraftstoffe erzeugt werden. Vergleiche postfossiler Energieversorgungsoptionen fallen zudem ganz unterschiedlich aus, je nachdem, welche Annahmen zur Energieeffizienz der einzelnen Antriebskonzepte getroffen werden.

Diese wenigen Beispiele zeigen bereits, dass vielfältige Annahmen zur Entwicklung der Kraftstoffherstellung und der Fahrzeugtechnologien möglich sind. Grundsätzlich könnten alle Eingangsgrößen variiert werden, um den Einfluss von Annahmen auf das Ergebnis aufzuzeigen. Dies ist aber gar nicht notwendig. Zum einen zeigen aktuell vorliegende Untersuchungen und Studien eine hohe Übereinstimmung bei der Entwicklung wichtiger Annahmen bis zum Jahr 2050. Diese Annahmen werden auch dieser Studie zugrunde gelegt. Gibt es Unterschiede, die nennenswerten Einfluss auf die Bewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen haben – beispielsweise der Wirkungsgrad bei der Herstellung strombasierter Kraftstoffe – werden die Auswirkungen dieser Variationen dargestellt.

Zum anderen muss immer die Frage beantwortet werden: Würden veränderte Rahmenbedingungen die Grundaussage und damit die Schlussfolgerungen der Bewertung verändern? In vielen Fällen ist das nicht der Fall. Durch zusätzliche Variationen der Annahmen würden die Bewertungen unübersichtlicher, während die Aussagen unverändert bleiben. In dieser Studie werden daher nur wesentliche Annahmen variiert.

Zu guter Letzt ist ein Vergleich der verschiedenen Energieversorgungsoptionen nur dann sinnvoll, wenn die möglichen Alternativen gleich behandelt werden. Es kann nicht sinnvoll sein, beispielsweise für die Batterietechnologie optimistischere Annahmen festzulegen als für die Entwicklung von Brennstoffzellen. Wichtiges Ziel dieser Studie war es, für alle Technologien gleichermaßen „verhalten optimistische“ Annahmen zugrunde zu legen. Ob die tatsächlichen Entwicklungen den getroffenen Annahmen entsprechen, hängt nicht zuletzt von der Marktdurchdringung ab. Kostendegressionen können nur erreicht werden, wenn sich Technologien auf breiter Basis durchsetzen.

Welche Annahmen konkret verwendet wurden, ist in den folgenden Unterkapiteln dokumentiert. Zur besseren Lesbarkeit werden diese Annahmen in den folgenden Hauptkapiteln nicht nochmals wiederholt – dies geschieht nur dann, wenn es für das Verständnis der Aussagen zwingend notwendig ist.

#### 3.1 Energieeffizienz der Antriebstechnologien

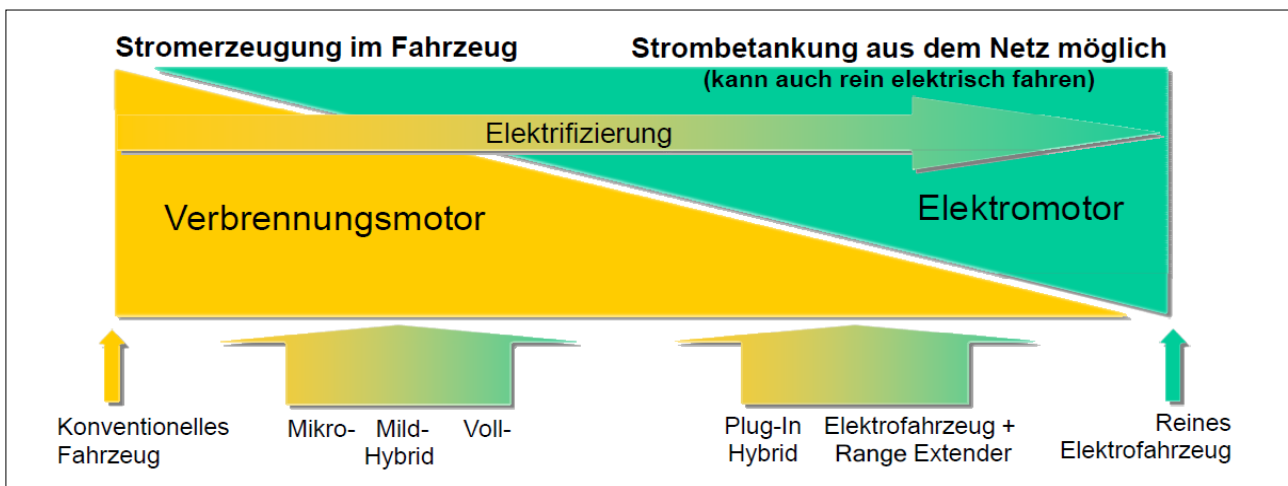
Lässt man die Herstellung der Kraftstoffe außen vor und betrachtet nur die Fahrzeuge selbst, gilt bereits heute: Elektrofahrzeuge haben eine höhere Energieeffizienz als konventionelle Verbrennungsmotoren. Während der Wirkungsgrad von Ottomotoren zwischen 25 und 35 % bzw. von Dieselmotoren zwischen 35 und 45 % liegt, erreichen Elektromotoren Wirkungsgrade von 85 bis 90 % [FHG-ISI/LBST 2010; IFEU 2009a].

Zurzeit kann das Elektrofahrzeug diese Vorteile aber noch nicht voll ausspielen. Zum einen sind die Akkumulatoren aufgrund der noch zu geringen Energiedichten so schwer, dass der Transport des zusätzlichen Gewichts viel Energie verbraucht. Elektrobusse, die ihren Strom per

Oberleitung beziehen und keine Batterie benötigen, sind daher klar im Vorteil [INFRAS 2014]. Darüber hinaus ist die Energieeffizienz heutiger Elektrofahrzeuge schlechter, als dies der Wirkungsgrad des Elektromotors erwarten lässt, da insbesondere Heizung und Klimatisierung zusätzliche Energie benötigen. Erst langfristig kann der Energieverbrauch von Klimatisierung, Beleuchtung und anderer elektrischer Verbraucher im Fahrzeug optimiert werden. Für Pkw wird beispielsweise angenommen, dass sich bis 2050 der Verbrauch von heute rund 4,5 kWh/Fahrzeug-km auf 2,3 kWh/Fahrzeug-km nahezu halbiert [Haan/Zah 2013].

Brennstoffzellen-Pkw werden zwar ebenfalls von Elektromotoren angetrieben, der Strom wird aber mit Hilfe von Wasserstoff „on-board“ in einer Brennstoffzelle erzeugt. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle (BZ) liegt zwischen 40 und 60 % [Pioch et al. 2008]. Der Gesamtwirkungsgrad von Zellen und Elektromotor ist bereits heute höher als der eines Verbrennungsmotors. Künftig sind Gesamtwirkungsgrade von rund 50 % möglich [Dena 2009]. Die Energieeffizienz von BZ-Fahrzeugen wird steigen, indem Bremsenergie in Batterien zwischengespeichert wird. Diese Technologie wird beispielsweise bereits heute bei Brennstoffzellenbussen eingesetzt [INFRAS 2014]. Damit sind Fahrzeuge mit Brennstoffzellen mittel- bis langfristig energieeffizienter als Verbrennungsmotoren, aber weniger effizient als batterieelektrische Fahrzeuge.

Abbildung 2: Stufen der Elektrifizierung des Antriebsstranges



[IFEU 2011]

Aber auch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren werden energieeffizienter. Es wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2050 eine Hybridisierung konventioneller Antriebstechnologien stattfindet (siehe Abbildung 2), also eine Elektrifizierung des herkömmlichen Antriebs. Der dominierende Teil bleibt der Verbrennungsmotor, während eine Batterie beispielsweise die Bremsenergie zwischenspeichert, um Teilstrecken elektrisch zurückzulegen [IFEU 2011]. Analysen zeigen, dass Gas- und Benzinmotoren stärker an der Hybridisierung partizipieren als Dieselmotoren [VTT 2012]. Vorteilhaft ist dies dann, wenn die Motoren wie bei Stadtbussen häufig im Teillastbereich arbeiten [IFEU et al 2013]. Aufgrund des höheren Hybridisierungspotentials gleichen sich langfristig die Energieverbräuche der beiden Verbrennungsmotorenkonzepte immer mehr an. Bei Nutzfahrzeugen ermöglicht es zudem die Dual-Fuel-Technologie, künftig auch Gas als Kraftstoff zu nutzen, so dass der Einsatz von Gas nahezu gleich effizient wird wie der von Diesel [IFEU et al. 2013].

Eine besondere Antriebstechnologie ist der so genannte Plug-In-Hybrid-Antrieb bzw. das Range-Extender-Fahrzeug (Fahrzeug mit Reichweitenverlängerung). In beiden Fällen handelt es sich um ein Elektrofahrzeug mit einem zusätzlichem Verbrennungsmotor, um auch bei leerer Bat-

terie ein Weiterkommen zu ermöglichen. Bei Plug-in-Hybriden wird der Verbrennungsmotor direkt zum Antrieb genutzt, während bei Range-Extender-Fahrzeugen der Verbrennungsmotor einen Generator antreibt, der den Akku nachlädt. In dieser Studie wird ausschließlich für diese Art von Elektrofahrzeugen der Begriff Plug-in-Hybrid verwendet; Range-Extender-Fahrzeuge sind hierbei subsumiert. Der Plug-In-Hybrid hat im Vergleich zum rein batterieelektrischen Fahrzeug eine etwas geringere Energieeffizienz [Öko-Institut 2013a und 2013b]. Wie die Analysen in dieser Studie zeigen, bietet dieses Konzept aber andere Vorteile.



Tabelle 1: Annahmen zur Entwicklung der Energieeffizienz der Verkehrsmittel

	Einheit	ICEV: Benzin	ICEV/JTE: Diesel/ Kerosin	ICEV: Gas	FCEV	PEHV <sup>1)</sup>	BEV <sup>1)</sup>	Ober- leitung
<b>Pkw: Mittelklasse (Neufahrzeuge)</b>								
2010	MJ/km	2,47	2,05	2,44	1,37	1,34	0,87	x
2050	MJ/km	1,39	1,38	1,39	0,91	0,80	0,56	x
Δ 2050/10	%	-43 %	-33 %	-43 %	-34 %	-41 %	-36 %	x
<b>Lkw-Nah: 10-t-Lkw (Neufahrzeuge)</b>								
2010	MJ/km	X	6,2	6,7	5,3	5,0	4,0	x
2050	MJ/km	X	4,5	4,7	3,8	3,3	2,6	x
Δ 2050/10	%	X	-28 %	-29 %	-28 %	-35 %	-35 %	x
<b>Lkw-Fern: 40-t-Lkw (Neufahrzeuge)</b>								
2010	MJ/km	X	10,9	13,5	10,5	x	x	8,1
2050	MJ/km	X	7,9	8,7	7,6	x	x	5,5
Δ 2050/10	%	X	-28 %	-36 %	-28 %	x	x	-32 %
<b>Standard-Linienbus 12 m (Neufahrzeuge, innerorts)</b>								
2010	MJ/km	X	14,7	18,8	14,40	x	7,70	6,73
2050	MJ/km	X	9,47	9,9	8,90	x	5,40	5,40
Δ 2050/10	%	X	-35 %	-47 %	-38 %	x	-30 %	-20 %
<b>Flugzeug-Kurzstrecke (Flottendurchschnitt)</b>								
2010	MJ/km	X	214	243 <sup>2)</sup>	192	x	x	x
2050	MJ/km	X	144	164 <sup>2)</sup>	130	x	x	x
Δ 2050/10	%	X	-48 %	-48 % <sup>2)</sup>	-48 %	x	x	x
<b>Flugzeug-Langstrecke (Flottendurchschnitt)</b>								
2010	MJ/km	X	498	x	x	x	x	x
2050	MJ/km	X	359	x	x	x	x	x
Δ 2050/10	%	X	-39 %	x	x	x	x	x
<b>Schiff: 800 TEU</b>								
2010	MJ/km	X	1.026	1.094	923	x	x	x
2050	MJ/km	X	646	689	582	x	x	x
Δ 2050/10	%	X	-37 %	-37 %	-37 %	x	x	x
<b>Schiff: 15.000 TEU</b>								
2010	MJ/km	X	5.998	6.373	x	x	x	x
2050	MJ/km	X	3.779	4.015	x	x	x	x
Δ 2050/10	%	X	-37 %	-37 %	x	x	x	x

<sup>1)</sup> Inklusive Verluste beim Laden der Batterie (siehe Text). - <sup>2)</sup> Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>).

[INFRAS 2014; Haan/Zah 2013; Öko-Institut 2013a und 2013b; IFEU et al. 2013; HC/Öko-Institut 2013; CE Delft/DLR 2013; Prognos/INFRAS 2012; IFEU 2012]

In der oben stehenden Tabelle 1 sind die angenommenen Steigerungen der Energieeffizienz differenziert für Pkw, Lkw, Linienbus, Flugzeug und Schiff dargestellt. Die Effizienzsteigerungen basieren auf Arbeiten und Studien für das Umweltbundesamt, darunter die Studie „Treibhausgasneutraler Verkehr 2050“ [Öko-Institut 2013a], die Dokumentation zum „Transport Emission Model (TREMOM, Version 5.3)“ [IFEU 2012], ergänzt um aktuelle Veröffentlichungen beider Institute für das Bundesumweltministerium [Öko-Institut 2013b] und das Bundesverkehrsministe-

rium [IFEU et al. 2013, HC/Öko-Institut 2013] sowie weitere vor allem eigene Untersuchungen [INFRAS 2014; Haan/Zah 2013; Prognos/INFRAS 2012; CE Delft/DLR 2013].

Bei Straßenverkehrsmitteln handelt es sich bei den Energieangaben der Tabelle 1 durchweg um Realverbräuche als Mittelwert für alle Straßen (Ausnahme Linienbus: Durchschnitt innerorts). Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen und Plug-In-Hybriden sind Ladeverluste in den Verbrauchsangaben berücksichtigt (2010: 10 %, 2050: 5 %) [Haan/Zah 2013]. Angegeben sind nur Antriebstechnologien, die für die einzelnen Verkehrsmittel auch tatsächlich in Frage kommen - die Auswahl dafür wird in Kapitel 4 erläutert.

Für die Antriebskonzepte haben sich englische Begriffe und Abkürzungen etabliert, die in der oben stehenden Tabelle, aber auch im Gesamtbericht verwendet werden:

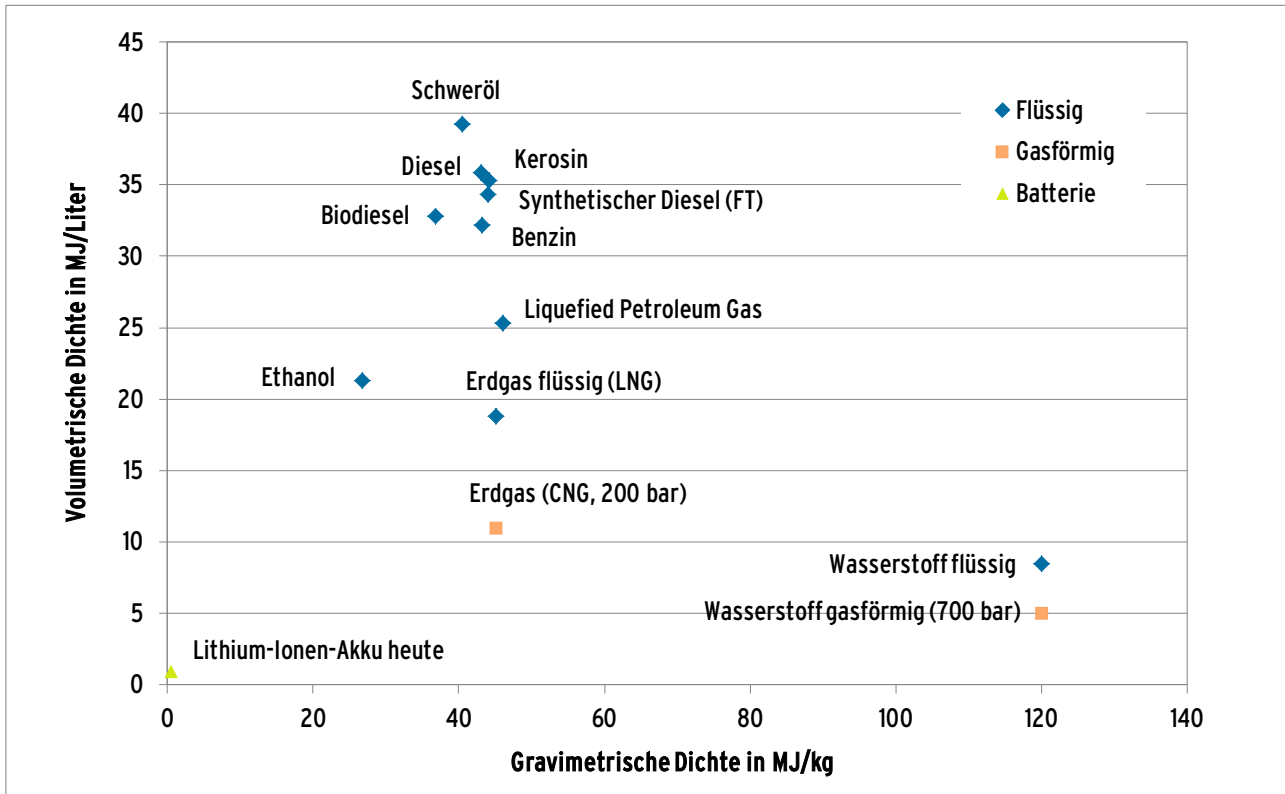
- Fahrzeug oder Schiff mit Verbrennungsmotor = Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV),
- Flugzeug mit Triebwerk = Jet Turbine Engine (JTE),
- Batterieelektrische Fahrzeug = Battery Electric Vehicle (BEV),
- Plug-In-Hybrid-Fahrzeug (einschließlich Range-Extender-Fahrzeug) = Plug-In-Electric Hybrid Vehicle (PEHV),
- Fahrzeug, Schiff oder Flugzeug mit Brennstoffzellen = Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV).

### 3.2 Speicherdichten der Kraftstoffe

Konventionelle Kraftstoffe wie Benzin, Diesel, Kerosin und Schweröl haben einen großen Vorteil gegenüber vielen Alternativen: Sie besitzen sowohl hohe gravimetrische wie auch volumetrische Energiedichten (siehe Abbildung 3). Dadurch kann der Tank klein und leicht sein. Ein typischer Tank für 400 l Dieselmotorkraftstoff bei einem Lkw wiegt gerade mal etwas mehr als 400 kg, ermöglicht aber eine Reichweite von rund 1.000 km [CE Delft/DLR 2013]. Vergleichbare Eigenschaften bieten lediglich Biokraftstoffe oder synthetisch hergestellte Kraftstoffe, beispielsweise synthetischer Diesel.

Ein anderes Bild ergibt sich bei Gasen. Die gravimetrischen Energiedichten von Erdgas sind zwar vergleichbar mit denen von Benzin und Diesel, Wasserstoff liegt gar um den Faktor 2,8 höher. Ohne Komprimierung oder Verflüssigung aber werden keine ausreichenden volumetrischen Energiedichten erzielt, um vertretbare Reichweiten zu gewährleisten. Selbst verflüssigtes Erdgas hat weniger als 60 % der auf das Volumen bezogenen Energiedichte von Benzin. Auf 200 bar komprimiertes Erdgas (Compressed Natural Gas = CNG) kommt gar nur auf ein Drittel des Benzinwertes. Hierbei ist es unerheblich, ob es sich um Erdgas, Biogas oder Power-to-Gas-Methan handelt, das mit Hilfe von Strom hergestellt wurde.

Abbildung 3: Gravimetrische und volumetrische Energiedichten ausgewählter flüssiger und gasförmiger Kraftstoffe sowie Batterien



[eigene Darstellung, Datenquellen: EN 16258, JRC 2011; Tübke 2010]

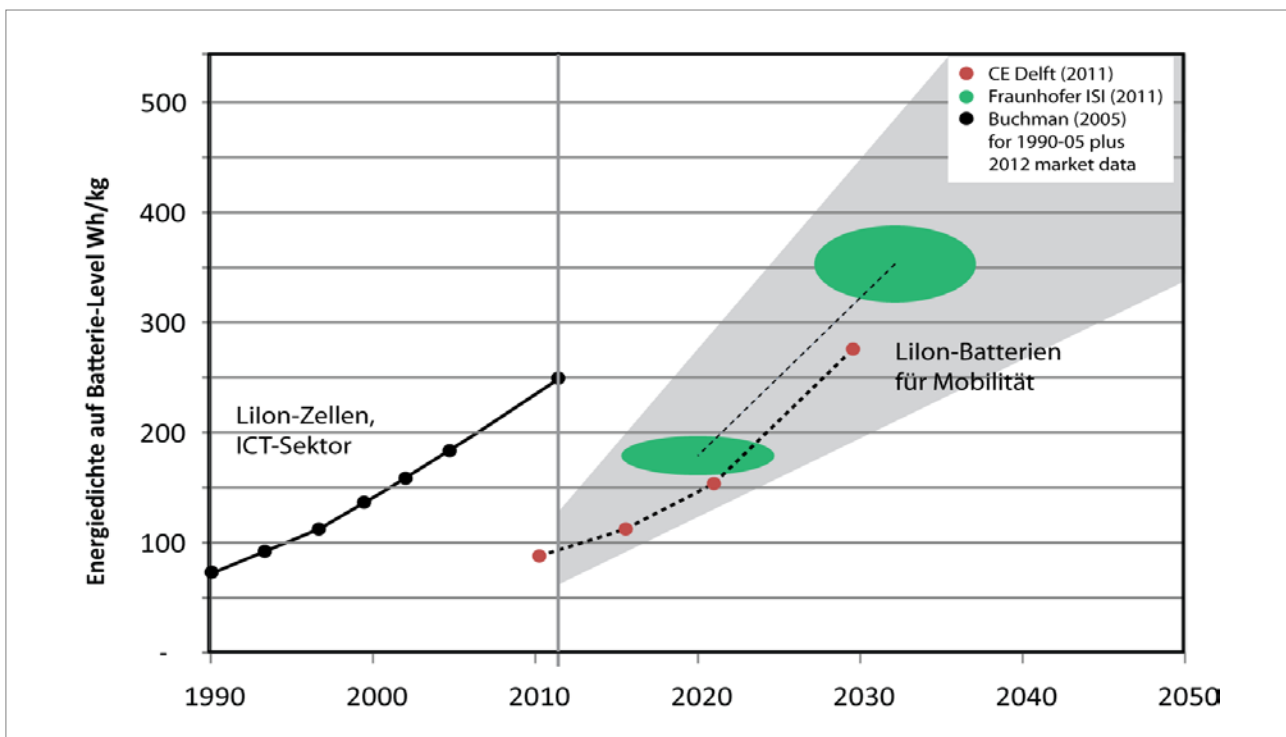
Zusätzlich ist das Gewicht der Drucktanks zu berücksichtigen. Herkömmliche Stahl tanks kommen auf 4 bis 5 kg pro kg Erdgas. Neue Kunststoff-Composite-Drucktanks dagegen sind mit rund 1,5 kg pro kg Erdgas wesentlich leichter [Audi 2013]. Grundsätzlich können damit CNG-Autos heute schon Reichweiten von 300 bis 400 km erreichen und zwar ohne wesentliche Einschränkung der Nutzungsmöglichkeiten. Mit steigender Energieeffizienz werden künftig auch 500 km möglich sein. Auch für Nahverkehrs-Lkw und Linienbusse ist die Speicherung des Gases in komprimierter Form ausreichend. Für den Fernverkehr, für Flugzeuge oder Schiffe dagegen bietet sich der Einsatz von verflüssigtem Erdgas an (Liquified Natural Gas – LNG). Nachteil dieser Variante: ein hoher Energieverbrauch zur Verflüssigung des Methans, der Energieverbrauch zur Kühlung des gelagerten LNG sowie Methan-Verluste bei Transport und Lagerung [TNO et al. 2013; IER 2009]. Dies gilt auch für Biomethan oder Methan, das mit Strom hergestellt wird (PtG-Methan).

Bei Wasserstoff ist die volumetrische Energiedichte nochmals niedriger als bei Erdgas. Für gasförmigen Wasserstoff, der – wie derzeit für Pkw angedacht – auf 700 bar komprimiert wird, liegt die Energiedichte pro Volumen bei lediglich 15 % verglichen zu Benzin, in flüssiger Form bei rund 25 %. Wie beim Erdgas benötigt die Verflüssigung von Wasserstoff erhebliche Energiemengen. Mit heute 0,30 und künftig 0,21 kWh Strom pro kWh Wasserstoff liegt der Energieverbrauch nochmals deutlich über der zur Verflüssigung von Erdgas (rund 0,04 kWh Strom pro kWh Methan) [JRC 2013; FHG-ISI/LBST 2010]. Vorteilhaft ist lediglich, dass Gasverluste bei Transport und Speicherung im Vergleich zum Methan weniger klimarelevant sind. Für den Gesamtwirkungsgrad des Prozesses sind sie aber sehr wohl bedeutend. Daher gilt ebenso wie

beim Erdgas: Flüssiger Wasserstoff sollte nur dort eingesetzt werden, wo die Reichweite von komprimiertem Wasserstoff nicht ausreicht.

Für Batterien gilt sogar: Heutige Akkumulatoren haben sowohl gravimetrische wie auch volumetrische Speicherdichten, die um Größenordnungen kleiner sind als konventionelle Kraftstoffe (Abbildung 3). Problematisch ist vor allem die gravimetrische Dichte. Heute eingesetzte Lithium-Ionen-Akkus erreichen Energiedichten von rund 100 Wh pro kg auf Ebene der Batterie (Batterie-Level) [Haan/Zah 2013; Tübke 2010]. Eine 30-kWh-Batterie wiegt somit 300 kg und ermöglicht eine Reichweite von rund 140 km [Haan/Zah 2013]. Für eine Reichweite von 500 km wäre eine Batterie mit einer Kapazität von rund 100 kWh nötig. Dieser Akku würde allerdings aktuell rund eine Tonne wiegen. Rein batterieelektrische Fahrzeuge werden sich also nur dann am Markt durchsetzen, wenn die Energiedichten der Batterien wesentlich steigen. Abschätzungen im Auftrag des Schweizer Zentrums für Technikfolgen-Abschätzung (TA Swiss) gehen davon aus, dass im optimistischen Fall bis 2050 Energiedichten von 500 Wh/kg Batterie erreicht werden könnten. Als realistisch wird aber ein Wert von 360 Wh/kg angenommen. Dieser Wert der TA-Swiss-Studie liegt um den Faktor 3,6 über dem heutigen Wert und wird auch in dieser Studie verwendet (siehe Abbildung 4) [Haan/Zah 2013].

Abbildung 4: Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte von Fahrzeug-Batterien bis zum Jahr 2050



[Haan/Zah 2013]

Für die ökologischen und ökonomischen Bewertungen in dieser Studie ist es zentral, die Kapazität der in den Fahrzeugen verbauten Batterien zu kennen. Die Batteriegröße stellt immer ein Kompromiss zwischen geforderter Reichweite und akzeptablem Zusatzgewicht dar. In der TA Swiss-Prognose beispielsweise wird für die Batterie ein maximales Mehrgewicht von 250 bis 300 kg festgelegt [Haan/Zah 2013]. Das erlaubt im Jahr 2050 – bei steigender Energiedichte – einen Akku mit rund 100 kWh. Geht man davon aus, dass nur 75 bis 80 % der Batteriekapazität genutzt werden können (maximale Ladetiefe) und unterstellt man die im vorangegangenen Unterkapitel beschriebene Steigerung der Energieeffizienz der Elektrofahrzeuge, wäre damit eine Reichweite von rund 500 km möglich – also durchaus vergleichbar mit heutigen Autos. In

Tabelle 2 sind die Batteriekapazitäten für andere Fahrzeugkonzepte aufgeführt, die auf Basis vorliegender Literatur analog abgeleitet wurden [INFRAS 2014; Haan/Zah 2013; CE Delft/DLR 2013].

Tabelle 2: Angenommene Kapazität der Batterien nach Verkehrsmittel und Antriebstechnologie (in Klammern: Angaben zur Reichweite)

	BEV	PEHV	Oberleitung
Pkw	40 kWh (200 km) 100 kWh (500 km)	16 kWh	x
Lkw Nahverkehr	180 kWh (200 km)	60 kWh	x
Lkw Fernverkehr	X	x	300 kWh (200 km oberleitungsfrei)
Linienbus	Standardladung: 400 kWh (200 km) Schnellladung: 60 kWh (30 km ohne Zwischenladung)	Nicht betrachtet	60 kWh (30 km oberleitungsfrei)

x = keine sinnvolle Option

[eigene Zusammenstellung auf Basis von INFRAS 2014; Haan/Zah 2013; CE Delft/DLR 2013]

Bei rein elektrischen Fahrzeugen hängt die Batteriegröße auch vom Ladekonzept ab. Wird der Akku nicht nur am Netz, sondern auch während der Fahrt per Schnellladung zwischengeladen, ist eine kleinere Batteriekapazität ausreichend. Das Konzept der Schnellladung ist eine Alternative zum Plug-In-Hybrid und wird in dieser Studie nur für den Busverkehr näher betrachtet. Durch die feststehende Linienführung können Zwischenladestellen an End- oder Unterweghaltestellen kosteneffizient aufgebaut werden [INFRAS 2014; Göhlich et al. 2013].

### 3.3 Wirkungsgrad der Herstellung stromgenerierter Kraftstoffe

Kraftstoffe, die mit regenerativem Strom erzeugt werden, verursachen bei der Herstellung kaum Treibhausgasemissionen – unabhängig vom Gesamtwirkungsgrad des Produktionsprozesses. Bei schlechtem Wirkungsgrad wird allerdings mehr Strom verbraucht, um die gleiche Mobilität zu gewährleisten. Dies führt zu wachsenden Kraftstoffkosten und zu mehr Emissionen, sollten noch fossile Energieträger zur Herstellung von Strom eingesetzt werden. Nur bei einem vollständig treibhausgasneutralen Strom würden niedrigere Wirkungsgrade nicht klimawirksam werden.

Als Herstellungswege für stromgenerierte Kraftstoffe kommen folgende Optionen in Frage [Öko-Institut 2013a und 2013b; LBST 2013; DVGW 2013; IWES 2011]:

- Wasserstoff, der durch Elektrolyse von Wasser hergestellt wird – im Folgenden als Power-to-Gas-Wasserstoff bezeichnet (kurz: PtG-Wasserstoff);
- Methan, das durch Methanisierung von Wasserstoff hergestellt wird, wobei der Wasserstoff durch Elektrolyse erzeugt wird – im Folgenden als Power-to-Gas-Methan bezeichnet (kurz: PtG-Methan);
- Synthetischer Kraftstoff, der über Fischer-Tropsch (FT)-Synthese hergestellt wird, bei der wiederum der benötigte Wasserstoff per Strom-Elektrolyse gewonnen wird – im Folgen-

den als Power-to-Liquid bezeichnet (kurz: PtL); die synthetischen Kraftstoffe können beispielsweise Diesel, Kerosin oder Schweröl bzw. Marine Gas Oil (MGO) ersetzen.

PtG-Methan und PtL benötigen damit im Vergleich zur PtG-Wasserstoff-Herstellung grundsätzlich mindestens einen Prozessschritt mehr, was einen zusätzlichen Energieverbrauch verursacht. Für die Methanisierung wird in den meisten Studien übereinstimmend künftig von einem energetischen Wirkungsgrad von 80 %, für die FT-Synthese von 70 % ausgegangen [Öko-Institut 2013b; DVGW 2013; Sunfire 2013; DLR et al. 2012; IWES 2011]. Dabei wird für die FT-Synthese zudem unterstellt, dass auch die Nebenprodukte, die zusätzlich zum Kraftstoff entstehen (rund 20 % bezogen auf den gesamten Energieinhalt aller Produkte), keinen Abfall darstellen und zumindest energetisch weiter genutzt werden können [Öko-Institut 2013b].

PtG-Methan und PtL benötigen neben Wasserstoff Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) als Kohlenstoffquelle. Bei idealen Reaktionsbedingungen werden pro t PtG-Methan rund 2,53 t CO<sub>2</sub> und pro t FT-Kraftstoff rund 3,16 t CO<sub>2</sub> benötigt.<sup>2</sup> Audi gibt beispielsweise für die PtG-Anlage in Werlte zur Produktion von 1.000 t Methan einen CO<sub>2</sub>-Bedarf von 2.800 t an [Otten 2013]. Als Quellen für konzentriertes CO<sub>2</sub> kommen verschiedene Wege in Betracht: fossiles, produktionsbedingtes CO<sub>2</sub> (zum Beispiel aus der Kalk- und Zementindustrie), biogenes-CO<sub>2</sub> sowie atmosphärisches CO<sub>2</sub>.

Alle Quellen sind mit zusätzlichen Energieverbräuchen für die CO<sub>2</sub>-Gewinnung verbunden. Dabei hätte fossiles CO<sub>2</sub> aus Verbrennungsprozessen den geringsten Aufwand, für eine treibhausgasneutrale Gesellschaft stellt diese Quelle aber keine Option dar. Aus Vergärung von Biomasse erzeugtes Biogas besteht zu 40 bis 60 Volumen-% aus CO<sub>2</sub>, für dessen Abtrennung der Stromverbrauch mit rund 100 kWh pro t CO<sub>2</sub> relativ niedrig wäre. Aufgrund der dezentralen Struktur der Biogaserzeugung und dem beschränkten Potential von nachhaltigem Biogas stünden aber nur begrenzte CO<sub>2</sub>-Mengen zur Verfügung [UBA 2013a]. Nach Berechnungen des Öko-Instituts könnten aus dieser Quelle maximal 120 PJ FT-Kraftstoff bzw. 200 PJ Methan hergestellt werden [Öko-Institut 2013b]. Nach Berechnungen des Umweltbundesamtes liegt das Biogas-Potential bei rund 115 PJ Methan [UBA 2014]. Zum Vergleich: Der Endenergieverbrauch des Verkehrs in Deutschland lag 2005 bei 2.300 PJ [IFEU/INFRAS 2013].

Bleibt als weitere Möglichkeit atmosphärisches CO<sub>2</sub>: Für die Gewinnung von 1 t Gas aus der Umgebungsluft mit Hilfe der sogenannte Air-Capture-Technik werden derzeit rund 2.000 kWh Strom benötigt, bei der Nutzung von thermischer Energie rund 500 kWh [Öko-Institut 2013b; IWES 2011]. Als realistisch wird angenommen, dass bis 2050 der Strombedarf halbiert werden kann, was 1.000 kWh pro t CO<sub>2</sub> entspricht. Dieser Wert wird den Berechnungen in dieser Studie zugrunde gelegt. Da der Stromverbrauch für die CO<sub>2</sub>-Gewinnung je nach Quelle und Technologie stark variiert, werden für die Analyse der Treibhausgase aber auch zusätzliche Varianten betrachtet. Dabei wird einerseits als günstige Variante die Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus Biogasanlagen mit einem Stromverbrauch von 100 kWh Strom pro t CO<sub>2</sub> angenommen, als ungünstige Variante die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Gewinnung mit 2.000 kWh Strom pro t (siehe nächstes Unterkapitel).

Für den Gesamtwirkungsgrad der Herstellung stromgenerierter Kraftstoffe ist nicht zuletzt der Wirkungsgrad der Elektrolyse entscheidend. Heutige Technologien wie die alkalische Elektrolyse oder die PEM-Elektrolyse (PEM = Proton Exchange Membrane) können langfristig maximale elektrische Wirkungsgrade von 70 % erzielen. Für die Hochtemperaturelektrolyse, die sich derzeit noch in der Entwicklung befindet, werden Wirkungsgrade von 90 % und mehr erwartet

---

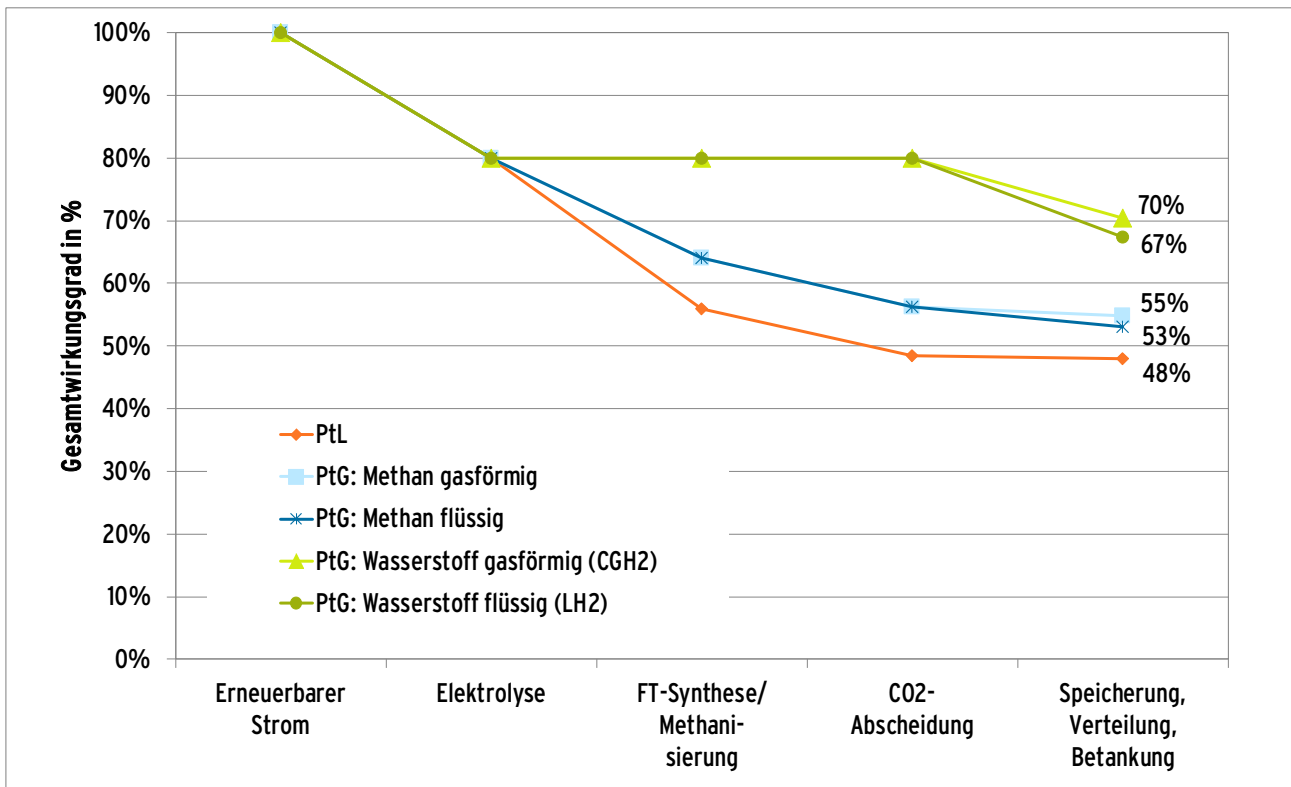
<sup>2</sup> Der CO<sub>2</sub>-Bedarf wurde mit Hilfe der stofflichen Kenndaten der Norm EN 16258 sowie den dazugehörigen Reaktionsgleichungen berechnet [EN 16258; Öko-Institut 2013b].

[Öko-Institut 2013b]. Hier kann die Reaktionswärme der Methanisierung und FT-Synthese genutzt werden, um wiederum den Strombedarf der Elektrolyse zu reduzieren [Sunfire 2013]. Der hohe Wirkungsgrad der Hochtemperaturelektrolyse kann allerdings nur dann erreicht werden, wenn die Anlage konstant betrieben werden kann, was die Nutzung von regenerativ erzeugtem Überschussstrom erschwert.

Die Untersuchung „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland“ im Auftrag des BMU sieht den Wirkungsgrad für die Elektrolyse im Jahr 2030 bei 72 %, im Jahr 2050 bei 77 % [DLR et al. 2012]. Als mittlerer Wirkungsgrad wird in dieser Studie 80 % zugrunde gelegt – ein Wert, der bereits die teilweise Realisierung einer Hochtemperaturelektrolyse voraussetzt. Für die Abschätzung der Treibhausgasemissionen werden in dieser Studie auch ungünstigere (70 % Wirkungsgrad) und günstigere Werte (90 % Wirkungsgrad) untersucht (siehe auch nächstes Unterkapitel).

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis aller Annahmen. Zusätzlich zum elektrischen Wirkungsgrad der Elektrolyse, der Methanisierung bzw. FT-Synthese sowie der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Abtrennung sind auch die Energieverbräuche der Verdichtung bzw. Verflüssigung der Kraftstoffe sowie deren Verteilung bis zur Tankstelle berücksichtigt [Öko-Institut 2013b; JRC 2013; LBST 2013; FHG-ISI/LBST 2010]. Von den stromgenerierten Kraftstoffen hat Wasserstoff den höchsten Gesamtwirkungsgrad. Rund 70 % des Energieinhaltes des Stroms ist in Form von Wasserstoff verfügbar. Den ungünstigsten Wirkungsgrad weist PtL auf: Nur rund 50 % des verbrauchten Stroms findet sich am Ende als nutzbare Energie im Kraftstoff. Hierbei wurde bereits berücksichtigt, dass die Nebenprodukte der FT-Synthese energetisch verwertet werden können und daher nicht als Verluste der PtL-Herstellung zugerechnet werden müssen. Die Abbildung zeigt zudem, dass trotz steigender Energieeffizienz im Jahr 2050 verflüssigte Gase energetisch ungünstiger abschneiden als komprimierte Gase.

Abbildung 5: In der Studie angenommene elektrische Wirkungsgrade bei der Herstellung stromgenerierter Kraftstoffe



[eigene Darstellung]

### 3.4 Treibhausgasemissionen postfossiler Optionen

Zur Beurteilung postfossiler Energieversorgungsoptionen würde es zu kurz greifen, nur die Treibhausgasemissionen der Kraftstoff- oder Stromherstellung (Well-to-Tank oder kurz WTT) und der Verbrennung der Kraftstoffe im Fahrzeug (Tank-to-Wheel oder kurz TTW) zu berücksichtigen [Kranke et al. 2011]. Ein Gesamtbild ergibt sich nur, wenn auch die Fahrzeugherstellung mit einbezogen wird. Batterieelektrische und Brennstoffzellen-Fahrzeuge verbrauchen für die Produktion von Batterien oder Brennstoffzellen zusätzliche Ressourcen und verursachen damit mehr Treibhausgasemissionen als Fahrzeuge mit konventionellen Verbrennungsmotoren [Haan/Zah 2013]. In dieser Studie werden daher nicht nur die direkten TTW-Emissionen der Kraftstoffnutzung entsprechend der nationalen Klimaberichterstattung an internationale UN-Gremien, sondern darüber hinaus auch die Emissionen aus der Kraftstoffherstellung sowie aus der Fahrzeugproduktion berücksichtigt.

Ein großer Anteil von Kraftstoffen und Fahrzeugen wird außerhalb Deutschlands produziert, das gilt auch für Anlagen, die zur Stromproduktion in Deutschland eingesetzt werden (z. B. Fotovoltaik-Anlagen). Da nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden kann, dass alle Länder der Welt bis 2050 umfassend ihre Treibhausgasemissionen reduzieren, bedeutet dies, dass auch ein treibhausgasneutrales Deutschland „graue Emissionen“ importiert. Daher müssen in dieser Studie auch Annahmen zur Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen getroffen werden. Das erfolgt auf Basis der „Energy Technology Perspectives 2012“ der Internationalen Energie Agentur [IEA 2012].

Darin wurden CO<sub>2</sub>-Emissionsentwicklungen für den Fall abgeleitet, dass der globale Temperaturanstieg auf 2 bzw. 4 Grad begrenzt wird. Wie Tabelle 3 zeigt, sinken die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro MJ Energie bei der Industrieproduktion und der Stromherstellung bis zum Jahr 2050 in beiden Fällen (siehe Tabelle 3) [IEA 2012]. Da aus heutiger Sicht nicht zwingend davon ausgegangen werden kann, dass das 2-Grad-Ziel weltweit erreicht wird, werden in dieser Studie die Energieversorgungsoptionen des Verkehrs unter der Annahme bewertet, dass global die Treibhausgasemissionen entsprechend dem 4-Grad-Szenario reduziert werden. Dies hat zudem den Vorteil, dass sich die verschiedenen postfossilen Energieversorgungsoptionen noch in ihren Treibhausgasemissionen unterscheiden. Mit zunehmender Treibhausgasminderung der globalen Wirtschaft sinken nämlich auch die Emissionen bei der Gewinnung der Energieträger bzw. beim Bau der Produktionsanlagen (z.B. Photovoltaik-Anlagen), so sich die herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen der postfossilen Energieversorgungsoptionen kaum mehr unterscheiden.

Gegenüber heute sinken die herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen im 4-Grad-Szenario um rund 40 %. Dies stellt somit den Referenzfall in dieser Studie dar. Diese Reduktion ist ein Durchschnittswert, in den die Industrieproduktion mit einem Drittel, die Stromherstellung mit zwei Dritteln eingeht. Zudem wird vereinfachend angenommen, dass die Treibhausgasemissionen analog zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen sinken. Würde bis 2050 weltweit das 2-Grad-Ziel erreicht, würde die Minderung der herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen gar bei 75 % liegen. Welche Auswirkungen diese Annahme auf die Bewertung der Energieversorgungsoptionen des Verkehrs in Deutschland hat, wird in dieser Studie in einer Sensitivitätsbetrachtung betrachtet.

CO<sub>2</sub> ist mit Abstand das bedeutendste Treibhausgas. Um alternative Kraftstoffe in Bezug auf deren Treibhausgaswirkung richtig beurteilen zu können, müssen daneben aber auch andere Treibhausgase wie Methan (CH<sub>4</sub>) oder Lachgas (N<sub>2</sub>O; Distickstoffoxid) in die Bewertung einbezogen werden. Beispielsweise entstehen Lachgasemissionen beim Anbau von Pflanzen für Biokraftstoffe. Diese zusätzlichen Treibhausgase werden mit Hilfe des so genannten Global Warming Potential (GWP) bezogen auf einen Wirkzeitraum von 100 Jahren in CO<sub>2</sub>-Äquivalent-



Emissionen umgerechnet und zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen addiert. Beispielsweise hat Lachgas ein GWP von 298. Das bedeutet, dass 1 kg Lachgas die gleiche Treibhausgaswirkung besitzt wie 298 kg CO<sub>2</sub> [Kranke et al. 2011]. Die Summe aller Treibhausgase wird als CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen (kurz: CO<sub>2</sub>e-Emissionen) ausgewiesen.

Tabelle 3: Ableitung der prozentualen Minderung der CO<sub>2</sub>- und Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) durch Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung im Jahr 2050 bezogen auf 2009

	4-Grad-Szenario (Referenzfall)	2-Grad-Szenario (Sensitivitätsbetrachtung)
<b>Minderung gegenüber 2009</b>		
Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der Stromproduktion pro kWh Strom	-47 %	-90 %
Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der Industrieherstellung pro MJ Energie	-23 %	-43 %
Minderung der THG-Emissionen der Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung <sup>1)</sup>	-40 %	-75 %

<sup>1)</sup> Gemittelter Wert: Zwei Drittel Stromproduktion und ein Drittel Industrieherstellung. [eigene Berechnung basierend auf IEA 2012]

Biokraftstoffe verursachen beim Verbrennen im Fahrzeug nahezu gleich viel CO<sub>2</sub> wie konventionelle Kraftstoffe – mit dem Unterschied, dass der Kohlenstoff beim Wachstum der Biomasse vorher der Atmosphäre entzogen wurde. Zur Vereinfachung werden daher in den Treibhausgasbilanzen die direkten TTW-Emissionen per Definition Null gesetzt (siehe z. B. EN 16258). Streng genommen entstehen zwar kleinste Mengen anderer verbrennungsbedingter Treibhausgase – diese bleiben aber unberücksichtigt. Bei Biokraftstoffen werden daher nur die herstellungsbedingten Emissionen (WTT-Treibhausgasemissionen) ausgewiesen [Kranke et al. 2011]. Das gilt auch für PtG-Methan und PtL. Wird das CO<sub>2</sub> aus Biogasanlagen oder aus der Luft gewonnen, sind die direkten TTW-Emissionen ebenfalls null.

Der Luftverkehr hat in Reiseflughöhe über 9.000 m erwiesenermaßen eine höhere Klimawirkung, da sich Wasserdampf und Luftschadstoffe in solchen Höhen in Treibhausgase umwandeln können. Die Klimawirkungen der Triebwerksemissionen können mit Hilfe des so genannten Emission Weighting Factors (EWF) auf diejenigen des CO<sub>2</sub> umgerechnet werden [Graßl/Brockhagen 2007]. Der EWF liegt zwischen 1,2 bis 2,7, für Mittel- und Langstreckenflüge im Mittel bei 2,0 [IFEU/Öko-Institut 2012]. Zusätzlich zu den reinen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung von Kerosin muss bei Mittel- und Langstreckenflügen also ein zusätzlicher Treibhausgaseffekt berücksichtigt werden, der in etwa zu einer Verdopplung der direkte TTW-CO<sub>2</sub>-Emissionen führt (EWF-Faktor 2). In dieser Studie wird im Rahmen einer Sensitivitätsbetrachtung für den Luftverkehr dieser höhere Treibhausgaseffekt berücksichtigt, dabei wird vereinfachend ein EWF-Faktor im Jahr 2050 von zwei angenommen (siehe Kapitel 5.4), auch wenn die Luftschadstoffemissionen bis 2050 voraussichtlich stärker reduzieren werden als die CO<sub>2</sub>-Emissionen und somit der EWF-Faktor niedriger ausfallen müsste als heute.

### Kraftstoffherstellung

Die Treibhausgasemissionen von Fahrzeugen, die direkt Strom oder stromgenerierte Kraftstoffe nutzen, hängen direkt von den Emissionen der Stromproduktion ab. Diese Untersuchung nutzt die Annahmen aus dem Hauptszenario der UBA-Studie „Treibhausgasneutraler Verkehr 2050“ [Öko-Institut 2013a]. Demnach sind die direkten Treibhausgasemissionen der Stromproduktion im Jahr 2050 in Deutschland Null. Allerdings verursacht die Herstellung der Fotovoltaik- oder

Windkraft-Anlagen im Ausland indirekte Emissionen, wenn – wie in dieser Studie – nicht weltweit eine vollständige treibhausgasneutrale Produktion der Stromerzeugungsanlagen unterstellt wird.

Wie bereits ausgeführt, wird im Referenzfall in dieser Studie unterstellt, dass weltweit die Treibhausgasemissionen so gemindert werden, dass der Temperaturanstieg auf 4 Grad begrenzt werden kann. Damit ergibt sich gegenüber heute eine Minderung von 40 % der herstellungsbedingten Emissionen bis zum Jahr 2050. Die indirekten, im Ausland anfallenden herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen der Stromproduktion liegen dann in Höhe von 25 g CO<sub>2</sub>e pro kWh Strom bzw. 6,8 g CO<sub>2</sub>e pro MJ Strom. Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade bei der Herstellung von stromgenerierten Kraftstoffen ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten spezifischen Emissionsfaktoren pro MJ Kraftstoff (siehe Referenz). Demnach sind – bezogen auf den Energieinhalt – die Treibhausgasemissionen von PtL doppelt so hoch wie bei direkter Stromnutzung.

Für Sensitivitätsbetrachtungen wird in dieser Studie das Erreichen des 2-Grad-Ziels unterstellt. Die dabei resultierenden Emissionsfaktoren für Strom und strombasierte Kraftstoffe können ebenfalls dieser Tabelle entnommen werden.

**Tabelle 4: Treibhausgasemissionsfaktoren für Strom und strombasierte Kraftstoffe in g CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e) pro MJ Strom bzw. MJ Kraftstoff im Jahr 2050**

	Einheit	Strom	PtG-Methan 200 bar	PtG-Methan verflüssigt	PtG- Wasserstoff 700 bar	PtG- Wasserstoff verflüssigt	PtL
<b>Referenz<sup>1)</sup></b>	g CO <sub>2</sub> e/MJ	6,8	12,4	12,7	9,7	10,1	14,2
<b>Sensitivität<sup>2)</sup></b>	g CO <sub>2</sub> e/MJ	2,9	5,3	5,5	4,1	4,3	6,0

<sup>1)</sup> Weltweit: Erreichung eines 4-Grad-Ziels. – <sup>2)</sup> Weltweit: Erreichung eines 2-Grad-Ziels.

[eigene Berechnungen]

Neben stromgenerierten Kraftstoffen gelten vor allem Biokraftstoffe als postfossile Option im Jahr 2050. Da die Treibhausgasemissionen der Biokraftstoffe in 4.1 näher betrachtet werden, werden an dieser Stelle die Emissionsfaktoren für Biokraftstoffe der 2. Generation nur exemplarisch dargestellt. Aus Gründen der Nachhaltigkeit darf für diese Biokraftstoffe auch nur Biomasse wie Holz und Stroh zum Einsatz kommen, die stofflich nicht genutzt werden kann und die nicht in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion stehen [Faist et al. 2012; Steubing et al. 2011; Zah et al. 2010]. Grundsätzlich sind folgende 2. Generationsbiokraftstoffe aus Restholz oder -stroh herstellbar:

- Ethanol (Zellulose-Ethanol),
- Biomass-to-Liquid-Diesel (BtL-Diesel),
- Synthetisches Naturgas aus Biomasse (Bio Synthetic Natural Gas – Bio-SNG).

Die für die Kraftstoffe angenommenen Emissionsfaktoren pro MJ Kraftstoff können der folgenden Tabelle 5 entnommen werden. Die Emissionen werden ausschließlich durch die Produktionsprozesse verursacht. Mit 13,2 bis 16,4 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro MJ Kraftstoff sind 2050 im Referenz- wie auch im Sensitivitätsfall Biokraftstoffe durchaus konkurrenzfähig mit strombasierten Kraftstoffen. Würde hingegen Anbaubiomasse verwendet, wären die erzielbaren Emissionsminderungen bis zum Jahr 2050 deutlich geringer, da sich landwirtschaftlich bedingte Emissionen nur bedingt reduzieren lassen.

Tabelle 5: Treibhausgasemissionsfaktoren für Biokraftstoffe der 2. Generation in g CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e) pro MJ Kraftstoff im Jahr 2050

	Einheit	Zellulose-Ethanol (Holz/Stroh)	BtL-Diesel (Holz/Stroh)	Bio-SNG: 200 bar (Holz/Stroh)
Heutige Situation	g CO <sub>2</sub> e/MJ	25,0	27,5	22,0
Referenz 2050 <sup>1)</sup>	g CO <sub>2</sub> e/MJ	15,0	16,4	13,2
Sensitivität 2050 <sup>2)</sup>	g CO <sub>2</sub> e/MJ	6,4	7,0	5,6

<sup>1)</sup> Weltweit: Erreichung eines 4-Grad-Ziels. – <sup>2)</sup> Weltweit: Erreichung eines 2-Grad-Ziels.

[IFEU et al. 2013; IEA 2012, Steubing et al. 2011; Müller-Langer 2011; Zah et al. 2010; Slade et al. 2009, Brauer et al. 2007]

Beim Vergleich künftiger Energieversorgungsoptionen sind fossile Kraftstoffe die Bezugsgröße. Für sie wird im Referenz- und Sensitivitätsfall prinzipiell die gleichen herstellungsbedingten Minderungen wie bei stromgenerierten Kraftstoffen bzw. bei Biokraftstoffen zugrunde gelegt (siehe Tabelle 3). Allerdings wird ergänzend angenommen, dass bis zum Jahr 2050 rund 50 % des Rohöls aus Ölschiefer gewonnen wird [Haan/Zah 2013]. Die Emissionen der Ölgewinnung aus Schiefer sind knapp 60 % höher als die einer konventionellen Rohölförderung [Ecoinvent 2.2]. Zwar werden auch sie künftig sinken, die Verschiebung hin zu Schieferölen bewirkt aber, dass die Gesamtminderung geringer ausfällt. Die produktionsbedingten Treibhausgasemissionen der konventionellen Kraftstoffe nehmen im Referenzfall lediglich um 23 % (statt 40 %), in der Sensitivitätsbetrachtung um 67 % (statt 75 %) ab. Zudem können bei den fossilen Optionen die direkten Emissionen aus der Verbrennung nicht weiter reduziert werden (z. B. 74,5 g CO<sub>2</sub>e/MJ Diesel) [EN 16258].

Tabelle 6: Variation der Annahmen für die Kraftstoffherstellung für das Jahr 2050 im Vergleich zum Referenzfall (optimistischer und pessimistischer Fall)

Energieversorgungs- option	Referenzfall	Optimistischer Fall (unter Grenze der THG-Emissionen)	Pessimistischer Fall (obere Grenze der THG-Emissionen)
PtL, PtG-Methan, PtG-Wasserstoff	Wirkungsgrad Elektrolyse: 80 %	Wirkungsgrad Elektrolyse: 90 % (Hochtemperatur-elektrolyse)	Wirkungsgrad Elektrolyse: 70 % (PEM-Elektrolyse)
PtL, PtG-Methan	Stromverbrauch CO <sub>2</sub> - Abtrennung: 1.000 kWh/t CO <sub>2</sub>	Stromverbrauch CO <sub>2</sub> -Abtrennung: 100 kWh/t CO <sub>2</sub> (Wert für Biogas)	Stromverbrauch CO <sub>2</sub> -Abtrennung: 2.000 kWh/t CO <sub>2</sub> (heutiger Wert für atmosphärisches CO <sub>2</sub> )
Biokraftstoffe	x	Annahme: -20 % der herstellungsbedingten THG- Emissionen gegenüber Referenzfall	Annahme: +20 % der herstellungsbedingten THG- Emissionen gegenüber Referenzfall
BEV und PHEV	Ladeverluste: 5 %	Ladeverluste: 0 %	Ladeverluste: 10 %
Benzin, Diesel, Kerosin, MGO	Anteil Schieferöl: 50 %	Anteil Schieferöl: 0 %	Anteil Schieferöl: 100 %

[eigene Annahmen]

Für die Entwicklung des Gesamtwirkungsgrades bei strombasierten Kraftstoffen gibt es unterschiedliche Prognosen. Beispielsweise variierten die Aussagen zur Entwicklung der Elektrolyse-technik und der Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung. In Kapitel 3.3 wurden hierzu Festlegungen getroffen, die dieser Studie zugrunde gelegt werden (siehe auch Spalte „Referenz“ in Tabelle 6). Um aber auch die Auswirkungen abweichender Festlegungen aufzuzeigen, werden die herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen der strombasierten Kraftstoffe auch unter Annahmen berechnet, die von diesen Festlegungen entweder in optimistische oder in pessimistische Richtung abweichen (siehe Tabelle 6). Daraus ergeben sich eine untere und eine obere Grenze für die herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen der strombasierten Kraftstoffe. In den Treibhausgasbilanzen der Energieversorgungsoptionen des Verkehrs werden diese Spannbreiten der Emissionen zusätzlich zum Referenzfall mit ausgewiesen (siehe Kapitel 5). Auch für Biokraftstoffe und für konventionelle Kraftstoffe wurden entsprechende optimistische und pessimistische Annahmen getroffen, was einen Gesamtvergleich erleichtert. Für batterieelektrische und Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge wurde der Ladungswirkungsgrad variiert (siehe Tabelle 6).

### Fahrzeugherstellung

Zur Menge der Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben liegen kaum umfassende, vergleichende Studien vor. Die meisten Arbeiten fokussieren auf einzelne Fahrzeugkonzepte oder Aggregate, in den letzten Jahren vor allem auf Elektrofahrzeuge und Batterien [z. B. Haan/Zah 2013; Flury/Frischknecht 2012; IFEU 2011; Öko-Institut 2011; Öko-Institut et al. 2011]. Daher wurden für diese Studie ausgehend von eigenen Analysen zum Pkw-Verkehr [Haan/Zah 2013; Althaus/Bauer 2011] mit Hilfe der Öko-Bilanzdatenbank Ecoinvent 2.2 Treibhausgasemissionen pro Fahrzeug-km für alle Antriebskonzepte und Verkehrsmittel ermittelt.

Grundsätzlich enthält Ecoinvent die herstellungsbedingten Emissionen konventioneller Antriebe für alle Verkehrsmittel. Diese Daten wurden im ersten Schritt übernommen und je nach Antriebskonzept modifiziert. Hierzu wurden die für Pkw erstellten detaillierteren Analysen zu Batterien, Brennstoffzellen und Elektromotoren herangezogen [Haan/Zah 2013]. Um diese Daten auf andere Fahrzeugkonzepte zu übertragen, wurden deren spezifische Fahrzeuggewichte, Motorleistungen, Lebensdauer und Fahrleistungen berücksichtigt (siehe hierzu auch Tabelle 7). Während für Pkw die Daten detailliert vorliegen, handelt es sich bei allen anderen Fahrzeugen daher nur um orientierende Werte. Da Lkw, Bus, Flugzeug und Schiff weit höhere Jahresfahrleistungen und damit pro Fahrzeug-Kilometer geringere herstellungsbedingte Emissionen haben als der Pkw, ist diese Vorgehensweise vertretbar.

Tabelle 7: Leergewicht, Lebensdauer und Jahresfahrleistungen für verschiedene Verkehrsmittel

	Pkw	10-t-Lkw: Nah- verkehr	40-t-Lkw: Fern- verkehr	Standard- linienbus (12 m)	Flugzeug: Kurz- strecke	Flugzeug: Lang- strecke	Container- schiff: 800 TEU	Container- schiff: 15.000 TEU
Leergewicht in t	1,4	5	14	11	31	178	15.000	200.000
Lebensdauer in Jahren	12	10	8	12	25	25	25	25
Jahresfahr- leistung in km/a	15.000	52.000	142.000	65.000	2,2 Mio.	3,2 Mio.	280.000	380.000

[eigene Festlegungen basierend auf Haan/Zah 2013, CE Delft/DLR 2013; TNO et al. 2013; IFEU 2009b]

Die Analysen zur Herstellung der Fahrzeuge beziehen sich in der Regel auf die heutige Situation. Künftige Minderungen sind darin nicht berücksichtigt. Daher wurden heutige Emissionswerte mit Hilfe der oben beschriebenen Minderungsfaktoren korrigiert (siehe Tabelle 3) [IEA 2012]. Diese Korrektur ist beispielhaft für einen Mittelklasse-Pkw (Golf-Klasse) in der folgenden Tabelle dargestellt. Alle in dieser Studie aufgeführten Treibhausgasemissionen für die Fahrzeugherstellung berücksichtigen für den Referenzfall bereits, dass global die spezifischen Treibhausgasemissionen der Produktion im Jahr 2050 um rund 40 % unter dem heutigen Niveau liegen werden. Dabei wird, wie oben beschrieben, das 4-Grad-Szenario der IEA als Referenzfall zugrunde gelegt. Für Sensitivitätsbetrachtungen wurden die entsprechenden Werte auch für das 2-Grad-Szenario ermittelt (Reduktion der Emissionen um 75 %). Die Werte in Tabelle 8 zeigen, dass in diesem Fall die Unterschiede bei den Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 für die verschiedenen Antriebskonzepte sehr gering ausfallen.

**Tabelle 8:** Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Fahrzeug-km für die Herstellung eines Mittelklasse-Pkw (Golf-Klasse) heute sowie im Jahr 2050

Antriebskonzept	Einheit	Ausgangswert 2050 (ohne Berücksichtigung der Emissionsminderungen der Tabelle 3) <sup>1)</sup>	Referenz 20502) (inkl. Emissionsminderungen der Tabelle 3)	Sensitivität 20503) (inkl. Emissionsminderungen der Tabelle 3)
ICEV: Benzin/Diesel	g CO <sub>2</sub> e/km	48,3	28,9	12,3
ICEV: Gas	g CO <sub>2</sub> e/km	55,0	32,9	14,0
FCEV	g CO <sub>2</sub> e/km	61,1	36,6	15,6
BEV: 200 km	g CO <sub>2</sub> e/km	54,9	32,8	14,0
BEV: 500 km	g CO <sub>2</sub> e/km	61,9	37,0	15,8
PHEV	g CO <sub>2</sub> e/km	55,8	33,4	14,2

<sup>1)</sup> Basierend auf heutigen Ecoinvent-Datenbasis für Fahrzeugkonfiguration des Jahres 2050 (siehe oben, inkl. Leichtbau) [Haan/Zah 2013]. – <sup>2)</sup> Weltweit: Erreichung eines 4-Grad-Ziels. – <sup>3)</sup> Weltweit: Erreichung eines 2-Grad-Ziels. [eigene Berechnungen basierend auf Haan/Zah 2013, Flury/Frischknecht 2012, Ecoinvent 2.2]

### 3.5 Kosten künftiger Fahrzeugkonzepte

Um verschiedene Fahrzeugkonzepte miteinander vergleichen zu können, sollten alle Kosten berücksichtigt werden, die auf den Fahrzeughalter zukommen (englisch Total Cost of Ownership, TCO). Dazu gehören neben den Kosten für Fahrzeuganschaffung und Kraftstoff bzw. Strom auch Versicherung und Kfz-Steuer und variable Kosten für Reparatur, Wartung und Pflege, Reifen oder Maut, bei Lkw und Bus auch die Lohnkosten der Fahrer [CE Delft/DLR 2013; ADAC 2013].

Abbildung 6 zeigt die heutigen Anteile der unterschiedlichen Kostenblöcke an den Gesamtkosten eines 40-t-Lkw. In diesem Beispiel entfallen mit den Kosten für Fahrer und Maut rund 50 % auf Bereiche, die weitgehend unabhängig von der eingesetzten Energieversorgungsoption sind. Rund ein Drittel der Kosten entfällt auf Fahrzeuganschaffung und Energiekosten für den Betrieb der Fahrzeuge. Diese Kosten sind klar vom genutzten Antriebskonzept und den genutzten Kraftstoffen bzw. Energieträgern abhängig. Fahrzeuge mit alternativen Antrieben sind teilweise in der Anschaffung teurer (z. B. Elektrofahrzeug), dafür sind die Energiekosten (z. B. Stromkosten) teilweise geringer. Sollen postfossile Energieversorgungsoptionen ökonomisch verglichen werden, sind diese beiden Kostenblöcke auf jeden Fall zu berücksichtigen. Dies erfolgt auch im Rahmen dieser Studie, während Personal- und Mautkosten nicht weiter betrachtet werden.

Die Kosten für Reparatur, Wartung, Pflege, Kfz-Steuer und Versicherung können teilweise vom Antriebskonzept und Kraftstoff abhängen (rund ein Sechstel der Kosten eines 40-t-Lkw). Da zum einen die Ermittlung der Kostenunterschiede zwischen den Versorgungsoptionen mit hohen Unsicherheiten verbunden ist, zum anderen die Kosten sich aufgrund politischer Festlegungen ergeben (z. B. Kfz-Steuer), werden im Rahmen dieser Studie diese Kosten bei der ökonomischen Bewertung der ausgewählten Energieversorgungsoptionen nicht weiter betrachtet. Dies ist vertretbar, da Wartungskosten oder Kfz-Steuern von Elektrofahrzeugen heute kaum verlässlich für 2050 vorhersagbar sind.

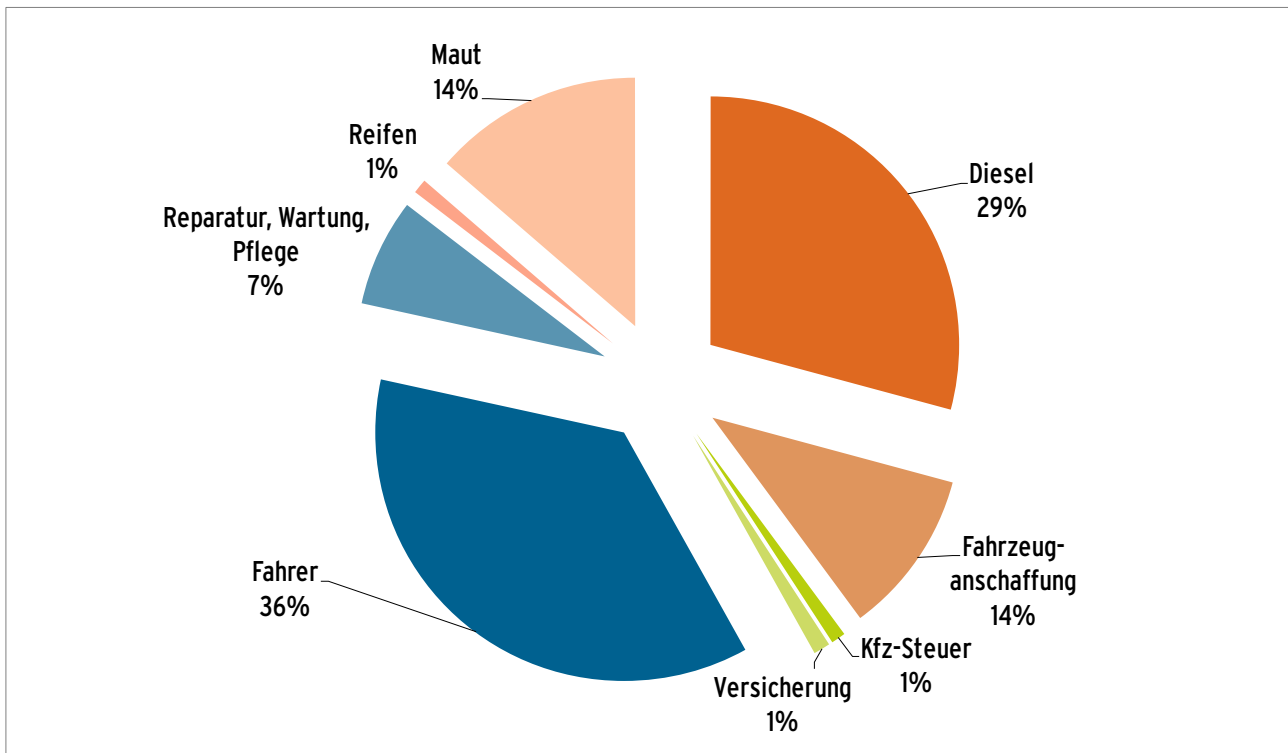
Die ökonomischen Analysen in dieser Studie sind somit stark vereinfachende ökonomische Analysen, die nur die beiden wichtigsten, von der Energieversorgungsoption abhängigen Kostenblöcke berücksichtigt: Die jährlichen Anschaffungskosten und die jährlichen Energiekosten und zwar spezifisch für alle Verkehrsmittel. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die jährlichen Kosten dabei auf einen Fahrzeug-km bezogen [FHG-ISI/LBST 2010; CE Delft/DLR 2013]. Die ökonomischen Analysen in dieser Studie sind also sehr stark vereinfachende TCO-Betrachtungen.

Um die jährlichen Kosten für die Fahrzeuganschaffung zu ermitteln, wird in dieser Studie die Annuitätenmethode verwendet. Hierzu wird unabhängig vom Verkehrsmittel ein mittlerer Zinssatz von 4 %<sup>3</sup> zugrunde gelegt, der in der Bandbreite der bei volkswirtschaftlichen Analysen verwendeten Zinssätze liegt (2,5-6.0 %) [DLR et al. 2012; Prognos/INFRAS 2012]. Bei einer Nutzungsdauer von zehn Jahren ergibt sich bei diesem Zinssatz ein so genannter Abzinsungsfaktor von 0,123. Damit müssen also 12,3 % der Anschaffungskosten bei der jährlichen Kostenanalyse berücksichtigt werden [CE Delft/DLR 2013]. Zudem wird für diese Studie festgelegt, dass der Restwert der Fahrzeuge am Ende der Nutzungsdauer Null beträgt, wobei die Nutzungsdauer der Lebensdauer entspricht (siehe Tabelle 7).

---

<sup>3</sup> Insbesondere Unternehmen im Aktienbesitz verwenden zum Teil deutlich höhere Zinssätze (z. B. 8-10%). Da die ökonomischen Analysen dieser Studie verallgemeinerbar sein sollen, wird grundsätzlich mit einem Zinssatz von 4 % gerechnet, der stärker die volkswirtschaftliche Sichtweise in Vordergrund stellt.

Abbildung 6: Anteile verschiedener Kostenblöcke an den jährlichen Gesamtkosten eines 40-t-Lkw im Jahr 2010



[eigene Darstellung auf Basis von CE Delft/DLR 2013]

In dieser Studie werden alle Kosten auf der Preisbasis von 2010 ermittelt. Das bedeutet, dass Preisanstiege z. B. von Kraftstoffen inflationsbereinigt sind. Bei postfossilen Kraftstoffen sind in der Regel nur die künftigen Produktionskosten bekannt, andere Einflüsse wie z. B. Kraftstoff- oder Stromsteuer sind schwer vorhersehbar. Daher werden für den Kostenvergleich mit konventionellen Kraftstoffen weder Steuern noch EEG-Umlage oder Netzentgelte berücksichtigt. Auch bleibt in der Ermittlung der Fahrzeug- und Energiekosten die Mehrwertsteuer außen vor. Wie beim Zinssatz wird damit eine volkswirtschaftliche Perspektive eingenommen. Steuern und Abgaben, die gesamtwirtschaftlich lediglich nur eine Umverteilung zwischen Verbrauchern und Staat darstellen, bleiben unberücksichtigt [Prognos/INFRAS 2012].

Kostenaussagen sind für 2050 grundsätzlich mit großen Unsicherheiten behaftet. Daher werden sowohl bei den Energie- als auch bei den Fahrzeugkosten einmal niedrige und einmal hohe Prognosewerte verwendet. Für die Fahrzeugkosten gilt, dass sie pauschal mit +/-10 % bezogen auf die mittleren Kosten ausgewiesen werden [CE Delft/DLR 2013]. Als Ergebnis ergeben sich Werte für die günstigste und für die ungünstigste Kostensituation im Jahr 2050.

### Energiekosten

Um die Energiekosten für postfossile Energieversorgungskosten einordnen zu können, müssen die Kosten für fossile Kraftstoffe im Jahr 2050 vorliegen. Für Benzin und Diesel wird dabei auf Szenarien des Bundesumweltministeriums zurückgegriffen [DLR et al. 2012], die moderate, aber auch bedeutende Preissteigerungen berücksichtigen (siehe Tabelle 9). Die dort ausgewiesenen Preise werden um Mineralöl- und Mehrwertsteuer bereinigt und für die Vergleiche mit den

postfossilen Energieversorgungsoptionen herangezogen.<sup>4</sup> Für Kerosin und Marine Gas Oil (MGO) wurden internationale Quellen herangezogen [TNO et al. 2013; Malina 2013; IEA 2012; DNV 2012; Lindfeldt 2011].

Auch für die Stromkosten wurde auf die BMU-Studie zurückgegriffen – dabei wurde nur die Preisentwicklung für regenerativ erzeugten Strom berücksichtigt [DLR et al. 2012]. Stromsteuer, Mehrwertsteuer, Netzentgelte, EEG-Umlage und sonstige Kostenkomponenten der Produzenten (z. B. für Marketing, Vertrieb, Gewinn) gingen nicht in die Kostenberechnungen ein. Dies begründet sich damit, dass viele dieser Kostenblöcke entweder politisch motiviert sind oder basierend auf strategischen Entscheidungen der Stromproduzenten verschieden festgelegt werden. Stromkosten können sich zwischen Privat-, Gewerbe- und Industriekunden gerade aufgrund dieser Kostenblöcke deutlich unterscheiden. Für den Vergleich der Energieversorgungsoptionen darf dies allerdings keine Rolle spielen. Daher werden sie in den Kostenvergleich in dieser Studie grundsätzlich nicht betrachtet. Sollen bestimmte Optionen gefördert werden, könnte dies zukünftig durch eine Differenzierung in diesen Kostenblöcken erfolgen.

Bei stromgenerierten Kraftstoffen wie PtG-Wasserstoff, PtG-Methan oder PtL sind neben den Stromkosten auch die Anlagenkosten entscheidend. Die Diskussion der letzten Jahre fokussiert stark auf die Option, Windstrom in chemischer Form als PtG oder PtL zwischen zu speichern [DLR et al. 2012; Steiner 2011; IWES 2011]. Dafür gibt es prinzipiell zwei sehr unterschiedliche Betriebsstrategien:

- 1. Strategie: Die Anlage wird vorrangig zur Speicherung von überschüssigem Windstroms genutzt. Der Windstrom ist zwar nahezu kostenlos, gleichzeitig läuft die Anlage aber nur rund 1.200 Stunden im Jahr. Damit sind die Abschreibungskosten hoch und die Nutzung der effizienteren Hochtemperaturelektrolyse nur begrenzt möglich, da diese weniger für viele An- und Abfahrprozesse geeignet ist.
- 2. Strategie: Die Anlage wird gezielt zur Produktion großer Mengen PtG und PtL gebaut. Sie ist mit rund 7.000 Betriebsstunden pro Jahr optimal ausgelastet. Der notwendige Strom muss aber zu „normalen“ Marktpreisen bezogen werden.

Beide Strategien werden derzeit untersucht [DVGW 2013]. Strategie 1 erzeugt demnach höhere Kosten als eine Betriebsweise mit 7.000 Betriebsstunden und Stromkosten zwischen 6 und 7 €/Cent/kWh. In dieser Studie wurde als Untergrenze der Kosten für stromgenerierte Kraftstoffe eine Produktionsanlage mit 7.000 Betriebsstunden und Stromkosten von 6 €/Cent(kWh, als Obergrenze 1.400 Betriebsstunden und kostenloser Windstrom zugrunde gelegt (siehe Tabelle 9). Unter Berücksichtigung des Stromverbrauchs für die Verflüssigung konnten die in der DVGW-Studie ermittelten Produktionskosten auch auf verflüssigen PtG-Wasserstoff und verflüssigtes PtG-Methan übertragen werden. Bei PtL wurden die schlechteren Wirkungsgrade und der damit höhere Stromverbrauch berücksichtigt. Für gasförmigen Wasserstoff ergeben sich Kosten zwischen 3 und 4 Euro pro kg – eine Größenordnung, die auch den Prognosen der IEA für 2050 entspricht [IEA 2012].

---

<sup>4</sup> Streng genommen müssten noch die Kosten für Marketing und Vertrieb sowie Gewinnmargen abgezogen werden. Hierzu liegen aber keine verlässlichen Daten vor. Da die Kosten für konventionelle Kraftstoffe lediglich zu Vergleichszwecken dargestellt werden, ist die Ungleichbehandlung mit den postfossilen Energieträgern vertretbar. Entscheidend sind die Kostenvergleich der postfossilen Energieversorgungsoptionen untereinander.



Tabelle 9: Weltmarktpreise für konventionelle Kraftstoffe sowie Produktionskosten ausgewählter postfossiler Kraftstoffe sowie Strom heute und im Jahr 2050 (günstigster und ungünstigster Fall, ohne MwSt., Energie- bzw. Mineralölsteuer)

Energieträger	Einheit	Kosten 2010	Kosten 2050 (günstiger Fall)	Kosten 2050 (ungünstiger Fall)
<b>Weltmarktpreise (ohne Steuern):</b>				
Benzin	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,017	0,033	0,044
Diesel	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,016	0,033	0,044
Kerosin	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,016	0,016	0,040
Marine Gas Oil (MGO)	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,018	0,028	0,044
<b>Produktionskosten:</b>				
Strom regenerativ	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,039	0,018	0,018
Wasserstoff: 700 bar	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,080	0,025	0,037
Wasserstoff: flüssig	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,086	0,027	0,038
PtG-Methan: 200 bar	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,103	0,038	0,058
PtG-Methan: flüssig	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,108	0,039	0,059
PtL	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,136	0,039	0,063
Ethanol Holz/Stroh	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,043	0,031	0,037
BtL: Holz/Stroh	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,039	0,025	0,036
Bio-SNG: Holz/Stroh	€ <sub>2010</sub> /MJ	0,022	0,015	0,022

x = keine Werte für heutige Situation

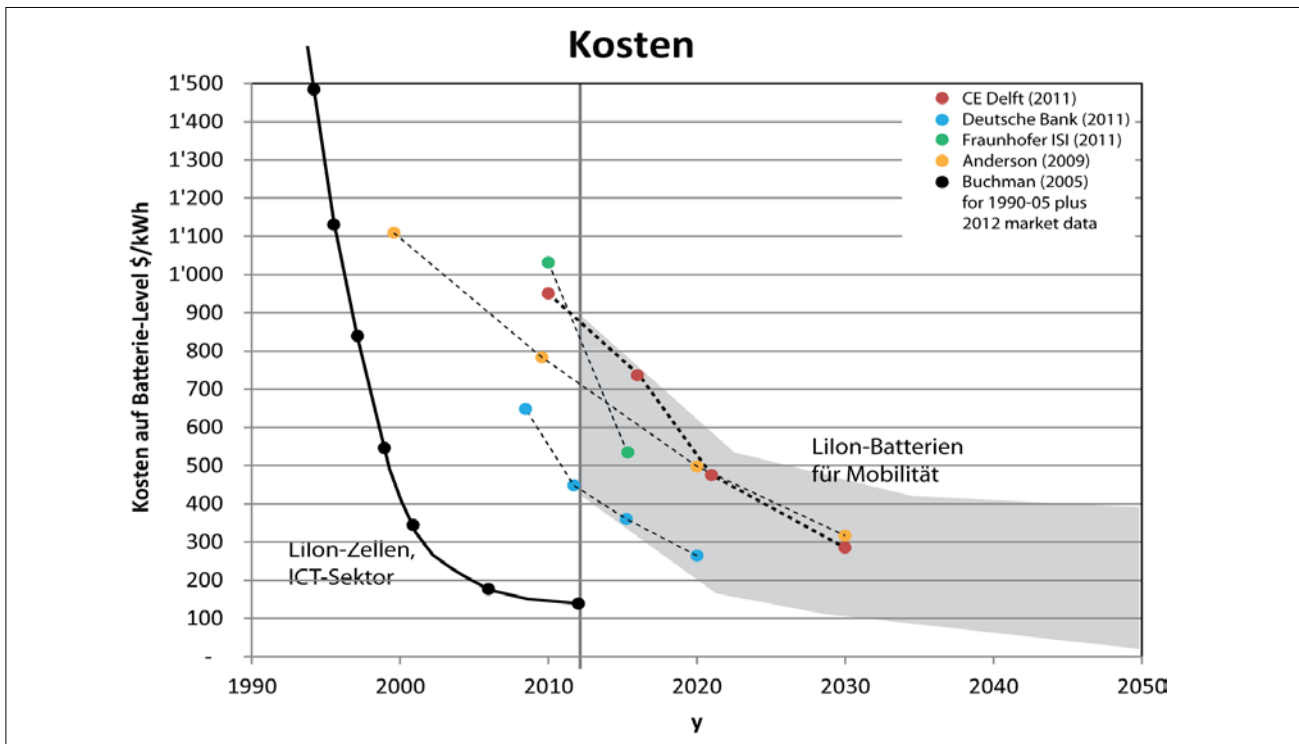
[DLR et al. 2012; DVGW 2013; TNO et al. 2013; Malina 2013; IEA 2012; DNV 2012; Müller-Langer 2011; Brauer et al. 2007; Leible et al. 2007]

Tabelle 9 zeigt die um Steuern bereinigten Weltmarktpreise für konventionelle Kraftstoffe und die reinen Produktionskosten für ausgewählte alternative Kraftstoffe heute und im Jahr 2050. Die Biokraftstoffe der 2. Generation umfassen Zellulose-Ethanol, BtL-Diesel und Bio-SNG aus Restholz bzw. -stroh [Müller-Langer 2011; Brauer et al. 2007; Leible et al. 2007]. Im Vergleich zu BtL liegen die Produktionskosten für PtL höher: So bewegen sich die erwarteten Kosten pro Liter BtL zwischen 0,90 und 1,40 €, bei PtL zwischen 1,40 und 2,10 € (rund 50-60 % höher). Bei allen postfossilen Optionen ist zu beachten, dass in dieser Studie sämtliche Kosten für die notwendigen zusätzlichen Infrastrukturen wie z. B. Wasserstofftankstellen oder Ladesäulen unberücksichtigt bleiben. Hinweise auf diese Investitionskosten gibt Kapitel 6.2.

### Kosten für Fahrzeuge

Fahrzeuge mit alternativen Antrieben sind in aller Regel deutlich teurer als konventionelle Diesel oder Benziner. Zwar sind Elektromotoren günstiger als Verbrennungsmotoren [FHG-ISI/LBST 2010], die Batteriekosten liegen aber derzeit bei rund 500 Euro pro kWh [Haan/Zah 2013]. Für ein Elektroauto mit einer Reichweite von 500 km würde die hierfür notwendige 100 kWh-Batterie rund 50.000 Euro kosten. Abbildung 7 zeigt, dass die meisten Studien (hier für TA Swiss ausgewertet) von deutlich sinkenden Batteriekosten ausgehen – bis 2050 unter günstigen Bedingungen auf rund 150 Euro pro kWh [Haan/Zah 2013]. Bei Brennstoffzellen könnten bis 2050 die Kosten von derzeit rund 1.000 Euro/kW [CE Delft/DLR 2013] auf rund 100 Euro pro kW Leistung sinken [FHG-ISI/LBST 2010].

Abbildung 7: Entwicklung der Fahrzeugbatterie-Kosten bis zum Jahr 2050



[Haan/Zah 2013]

Die verfügbaren Kostenprognosen für Batterien und Brennstoffzellen wurden im Rahmen dieser Studie übernommen, um die Fahrzeugkosten im Jahr 2050 zu ermitteln. Basierend auf den heutigen Preisen für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor wurden die Kosten für das Fahrge- stell ermittelt, dazu die Kosten für Elektromotor, Brennstoffzelle, Batterie und Tank addiert. Für diese Komponenten und für zusätzliche Systeme wie das Batteriemanagement wurde auf Kos- tensätze der Studien CE Delft/DLR (2013) und FHG-ISI/LBST (2010) zurückgegriffen.

Tabelle 10 zeigt das Ergebnis beispielhaft für einen Nahverkehrs- und Fernverkehrs-Lkw. Die Fahrzeugkosten sind sowohl für günstige wie auch ungünstige Rahmenbedingungen darge- stellt. Die Variation ergibt sich aus einem Auf- bzw. Abschlag von je 10 % auf die mittleren Kos- ten. Bei den Kosten handelt es sich um Fahrzeugkosten ohne Mehrwertsteuer auf 2010er Basis.<sup>5</sup> Das Beispiel zeigt, dass trotz einer Kostenreduktion für Batterien der batterieelektrische Lkw bzw. der Oberleitungs-Lkw (Reichweite 200 km) am teuersten sind. Die höheren Anschaffungs- kosten werden aber durch die geringeren Stromkosten weitgehend kompensiert (siehe Kapitel 4).

Bei der Berechnung der Fahrzeugkosten von batterieelektrischen Fahrzeugen wurde davon ausgegangen, dass die Batterie eine Lebensdauer hat, die der Nutzungsdauer des Fahrzeuges entspricht. Heute wird noch von rund 1,5 Batterien für einen Fahrzeuglebenszyklus ausgegan- gen [Haan/Zah 2013]. Für Busse, bei denen derzeit Schnellladesysteme getestet werden, wird

<sup>5</sup> Diese Kosten enthalten neben den reinen Produktionskosten auch Kosten der Hersteller für Garantie, For- schung und Entwicklung, Marketing und Vertrieb. In der Regel liegen die Gesamtkosten der Fahrzeuge unter Einbezug dieser Kosten rund 40 bis 50% über denen der reinen Fahrzeug-bezogenen Produktionskosten und entsprechen bei konventionellen Fahrzeugen weitgehend den um Steuern bereinigten Verkaufspreisen der Fahrzeuge [CE Delft/DLR 2013; Baum et al. 2010].

gar von 2 bis 3 Batterien pro Buslebensdauer ausgegangen [INFRAS 2014]. Zukünftig kann auch hier mit einer Batterie pro Bus-Lebensdauer ausgegangen werden. In dieser Studie wurde daher für das Jahr 2050 bei keiner der Optionen, die Batterien nutzen, ein Austausch der Batterie unterstellt. Müsste eine Batterie ersetzt werden, wären die Umweltauswirkungen und Kosten der Option deutlich höher als in dieser Studie ausgewiesen.

Tabelle 10: Kosten für die Fahrzeuganschaffung (Verkaufspreise ohne MwSt.) für Lkw mit unterschiedlichen Antriebskonzepten im Jahr 2050

	Einheit	Nahverkehrs-Lkw (10 t zGG): günstiger Fall	Nahverkehrs-Lkw (10 t zGG): ungünstiger Fall	Fernverkehrs-Lkw (40 t zGG): günstiger Fall	Fernverkehrs-Lkw (40 t zGG): ungünstiger Fall
<b>ICEV: Flüssigkraftstoff</b>	€ <sub>2010</sub>	77.000	94.000	133.000	163.000
<b>ICEV: Gas</b>	€ <sub>2010</sub>	80.000	98.000	140.000	171.000
<b>FCEV</b>	€ <sub>2010</sub>	85.000	104.000	173.000	212.000
<b>BEV</b>	€ <sub>2010</sub>	98.000	120.000	x	x
<b>O-Lkw + Batterie</b>	€ <sub>2010</sub>	x	x	165.000	201.000

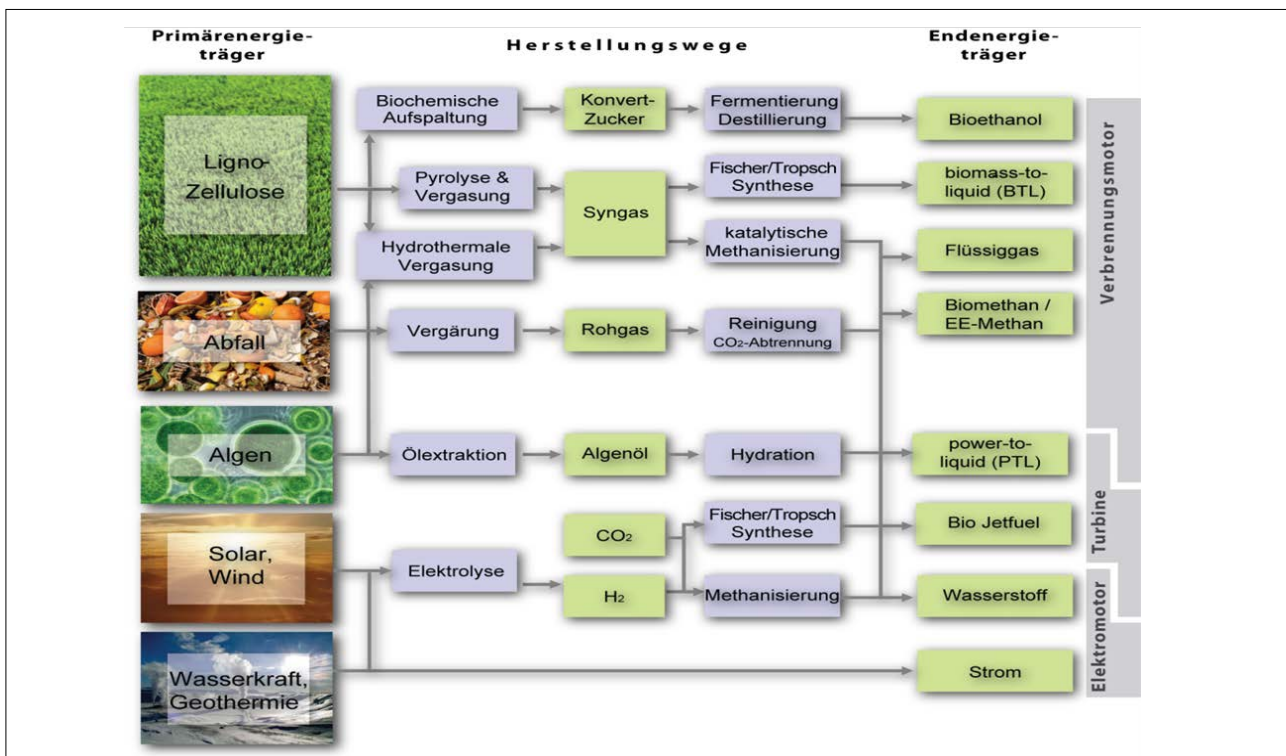
x = Option nicht betrachtet; O-Lkw = Oberleitungs-Lkw  
[eigene Berechnungen auf Basis von CE Delft/DLR 2013]

## 4 Vorauswahl postfossiler Energieversorgungsoptionen

Benzin, Diesel, Kerosin und Schweröl sind heute die wichtigsten Kraftstoffe für Pkw, Lkw, Busse, Flugzeuge und Schiffe. Lediglich Bahnen und Oberleitungsbusse nutzen Strom. Um die Schadstoffemissionen des Verkehrs zu senken und unabhängiger von Mineralölprodukten zu werden, wird seit Jahren die direkte Nutzung von Gas – komprimiert als Compressed Natural Gas (CNG) oder flüssig als Liquefied Natural Gas (LNG) – diskutiert.

Erdgas ist zwar ein alternativer Kraftstoff – allerdings aus fossiler Quelle. Auch die Umwandlung von Gas in Flüssigkraftstoffe (Gas-to-Liquid, GLT), die Dampfreformierung oder die Gasgewinnung aus Kohle sind prinzipiell Alternativen für heutige Kraftstoffe. Gemeinsam ist aber allen, dass sie zu den fossilen Energieträgern zählen. Und Kraftstoffe auf fossiler Basis verursachen Treibhausgasemissionen von 65 bis 100 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro MJ [Nitsch/Fischedick 2002]. Für eine treibhausgasneutrale Gesellschaft sind sie daher keine Option und wurden in den weiteren Betrachtungen dieser Studie ausgeschlossen.

Abbildung 8: Übersicht über Primärenergieträger, Herstellungswege und Endenergieträger verschiedener postfossiler Energieversorgungsoptionen



[eigene Darstellung]

Aber auch die Palette der postfossilen Energieversorgungsoptionen ist weit gespannt (siehe Abbildung 8). Neben der direkten Nutzung von regenerativem Strom und dem Einsatz von regenerativem Strom zur Herstellung stromgenerierter Kraftstoffe gibt es vor allem eine Vielzahl von Biokraftstoffen. Grundsätzlich können dabei drei Arten unterschieden werden [Zah et al. 2010; Faist et al. 2012]:

- Biokraftstoffe der 1. Generation, die entweder aus landwirtschaftlicher Anbau- oder Abfallbiomasse gewonnen und mit konventionellen Technologien (Vergärung, Ölextraktion) hergestellt werden.

- Biokraftstoffe der 2. Generation, die aus Waldholz oder schnell wachsender, zellstoffreicher Biomasse (z.B. Stroh) gewonnen und biochemisch oder physikalisch-chemisch in Kraftstoffe umgesetzt werden.
- Biokraftstoffe der 3. Generation, die aus Algen und damit unabhängig von Kulturflächen gewonnen werden.

Verschiedene Produktionswege gibt es vor allem für Biokraftstoffe der 1. Generation. Je nach Endprodukt unterscheiden sich die dabei eingesetzte Biomasse und der Herstellungsweg [FNR 2009]. Bioethanol als Ersatz von Benzin wird durch Fermentation aus stärke- oder zuckerhaltigen Pflanzen wie Zuckerrübe, Zuckerrohr, Weizen oder Mais gewonnen. Biodiesel (Fettsäuremethylester, FME) als Ersatz von Diesel wird aus Ölpflanzen wie Raps, Sonnenblumen oder Palmöl hergestellt, alternativ auch aus Altölen und Altfetten (Altspeisemethylester, AME). Pflanzenöl als Ersatz für Diesel ist die Vorstufe von Biodiesel und kann direkt in Verbrennungsmotoren verwendet werden, wenn diese technisch angepasst wurden. Und letztlich zählt dazu auch Biogas, das aus Abfällen oder Reststoffen, aber auch aus Feldfrüchten wie Silomais gewonnen wird. Für Biogas können im Gegensatz zu den anderen Biokraftstoffen der 1. Generation die Pflanzen als Ganzes verarbeitet werden, was zu höheren Flächenausbeuten und niedrigeren Treibhausgasemissionen führt.

Tabelle 11: Mögliche Kriterien für die Vorauswahl postfossiler Energieversorgungsoptionen

Ökologische Kriterien	Ökonomische Kriterien	Technische Kriterien	Infrastrukturelle Kriterien	Systemische Kriterien
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Treibhausgasemissionen</li> <li>• Primärenergieverbrauch</li> <li>• Mineralischer Ressourcenverbrauch</li> <li>• Flächenverbrauch</li> <li>• Verwendung von Anbaubiomasse</li> <li>• Wasserverbrauch</li> <li>• Emissionen in Luft, Wasser und Boden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamtkosten (Fahrzeuge, Kraftstoffe)</li> <li>• Kraftstoffkosten</li> <li>• Infrastrukturkosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklungsstadium der Technologie</li> <li>• Realisierungschancen bis 2050</li> <li>• Energiedichte (Masse, Volumen)</li> <li>• Reichweite</li> <li>• Wirkungsgrad</li> <li>• Kohlenstoffbedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengenverfügbarkeit der Kraftstoffe</li> <li>• Anpassungsbedarf Tankstellen</li> <li>• Anpassungsbedarf Verkehrsinfrastruktur</li> <li>• Anpassungsbedarf Versorgungsnetze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drop-in-Lösung</li> <li>• Nutzerfreundlichkeit</li> <li>• Sicherheitsrisiken</li> <li>• Zukunftsfähigkeit der Investition</li> <li>• Anschlussfähigkeit</li> </ul>

[eigene Darstellung]

Stellt sich die Frage, ob alle denkbaren, postfossilen Alternativen in eine detailliertere Bewertung, wie sie in dieser Studie erfolgen soll, einfließen sollten. Wenn bestimmte Optionen Mindestkriterien für eine treibhausgasneutrale und nachhaltige Energieversorgung des Verkehrs im Jahr 2050 nicht erfüllen, macht das keinen Sinn. Doch welche Kriterien sind das? Tabelle 11 zeigt eine Auswahl von Kriterien, die im Zusammenhang mit der Bewertung von alternativen Kraftstoffen gegenüber konventionellen Kraftstoffen immer wieder diskutiert werden. Dabei wurden ökologische, ökonomische, technische, infrastrukturelle sowie systemische Kriterien

berücksichtigt.<sup>6</sup> In enger Abstimmung mit dem Umweltbundesamt wurden diejenigen Kriterien identifiziert, die für eine nachhaltige postfossile Energieversorgung im Jahr 2050 erfüllt sein müssen. Nur wenn diese Kriterien von den postfossilen Energieversorgungsoptionen eingehalten werden, sollen sie auch detaillierter bewertet werden.

Zu den ausgewählten Kriterien gehört eine nennenswerte Minderung der Treibhausgasemissionen, um einen Betrag für eine treibhausgasneutrale Gesellschaft zu leisten. Dazu gehört auch der Verzicht auf Biokraftstoffe hergestellt aus Anbaubiomasse. Diese Art der Biokraftstoffe können zwar in Bezug auf Treibhausgasemissionen gegenüber fossilen Kraftstoffen Vorteile aufweisen, deren Herstellung ist aber, wie in diesem Kapitel noch gezeigt wird, mit ökologischen Nachteilen in anderen Bereichen verbunden [UBA 2012; Faist et al. 2012; Zah et al. 2010].

Diese Studie soll Hauptlösungen aufzeigen, die im Jahr 2050 einen treibhausgasneutralen Verkehr ermöglichen. Das setzt voraus, dass alternative Kraftstoffe ein ausreichendes Potential bieten, um den Energieverbrauch des Verkehrs in nennenswertem Umfang zu decken. Nischenlösungen werden daher für eine Detailauswertung ausgeschlossen. Ausgeschlossen werden auch Optionen, die im Labormaßstab zwar realisiert, von einer technischen Machbarkeit aber noch weit entfernt sind.

Für die Vorauswahl der postfossilen Energieversorgungsoptionen für den Verkehr im Jahr 2050, die später dann in dieser Studie detaillierter bewertet werden sollen, wurden damit folgende vier Kriterien festgelegt:

- **Treibhausgasreduzierung:** Die postfossilen Optionen müssen die Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der Kraftstoff- und Fahrzeugherstellung um mindestens 50 % gegenüber konventionell angetriebenen Verkehrsmitteln senken.
- **Keine Verwendung von Anbaubiomasse:** Postfossile Energieversorgungsoptionen dürfen nicht auf Anbaubiomasse basieren.
- **Ausreichendes Mengenpotential:** Der postfossile Kraftstoff muss in der Lage sein, mindestens zehn Prozent des weltweiten Endenergiebedarfs im Jahr 2050 abzudecken.
- **Entwicklungsstadium:** Die postfossile Energieversorgungsoption muss bereits heute soweit entwickelt sein, dass absehbar ist, dass sie 2050 großtechnisch realisiert werden kann.

Wird eines der Kriterien nicht erfüllt, ist die postfossile Energieversorgungsoption für eine treibhausgasneutrale Mobilität im Jahr 2050 nicht uneingeschränkt empfehlenswert und wird daher auch nicht in dieser Studie im Detail bewertet.

## 4.1 Treibhausgasreduzierung

Soll der Verkehr im Jahr 2050 so weit wie möglich treibhausgasneutral sein, setzt dies voraus, dass zumindest die direkten TTW-Emissionen in Deutschland nahezu Null sind. Im anderen Fall wären Treibhausgasreduzierungen über alle Emissionsquellen und Sektoren von 95 % bis 2050 gegenüber 1990 kaum möglich. Alle Optionen in der engeren Wahl – regenerativer Strom,

---

<sup>6</sup> Prinzipiell wäre auch der Einbezug sozialer Aspekte sinnvoll und denkbar. Dies war aber in den Anforderungen an diese Studie nicht vorgesehen, aber auch im Zeit- und Finanzrahmen nicht leistbar. Allerdings zeigen eigene Studien im Auftrag der TA Swiss, dass der in dieser Studie durchgeführte Auswahlprozess unter Einbezug sozialer Kriterien nicht zu wesentlich anderen Ergebnissen führen würde [Zah et al. 2010].

stromgenerierte Kraftstoffe hergestellt aus regenerativem Strom und Biokraftstoffe – erfüllen diese Anforderung.

Sollen die postfossilen Optionen die Treibhausgasemissionen aber – wie für dieses Kriterium gefordert – um mindestens 50 % senken, müssen auch die Emissionen aus Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung deutlich niedriger liegen als heute. Da diese Marge von Verkehrsmittel zu Verkehrsmittel variiert, wird folgendes Vorgehen gewählt: Der prozentuale Anteil der Emissionen aus der Fahrzeugherstellung ist aufgrund der im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln geringen Fahrleistung beim Pkw am höchsten. Hält damit eine Kombination aus postfossilem Kraftstoff (z. B. PtG-Wasserstoff) und Antrieb (z. B. Brennstoffzellenfahrzeug) beim Pkw die 50%ige Treibhausgasminderung ein, ist dies auch bei anderen Verkehrsmitteln der Fall. Ein Benzin- oder Diesel-Pkw emittiert – berücksichtigt man die direkten, verbrennungsbedingten Emissionen sowie die Emissionen der Herstellung der Kraftstoffe und Fahrzeuge – trotz der Verbesserungen bei Effizienz und Produktion im Jahr 2050 immer noch rund 150 g CO<sub>2</sub>e/km. Soll das 50 %-Minderungsziel erreicht werden, darf ein alternativer Pkw lediglich 75 g CO<sub>2</sub>e/km emittieren.

In Kapitel 3 wurde für den Pkw gezeigt, dass sich bei allen alternativen Antriebskonzepten die herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen pro Fahrzeug-km bis zum Jahr 2050 immer mehr angleichen – die Werte liegen dann gerundet zwischen 30 und 40 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e) pro Fahrzeug-km. Geht man im ungünstigsten Fall von Emissionen in Höhe von 40 g CO<sub>2</sub>e/km für die Fahrzeugproduktion aus, verbleiben damit 35 g CO<sub>2</sub>e/km für die Kraftstoffherstellung. Benzin- wie auch Diesel-Pkw verursachen ohne Fahrzeugherstellung im Jahr 2050 rund 120 g CO<sub>2</sub>e/km (WTW-Emissionen). Rechnerisch ergibt sich damit für die postfossilen Kraftstoffe pro Fahrzeug-km eine notwendige Minderung von mindestens 70 %.

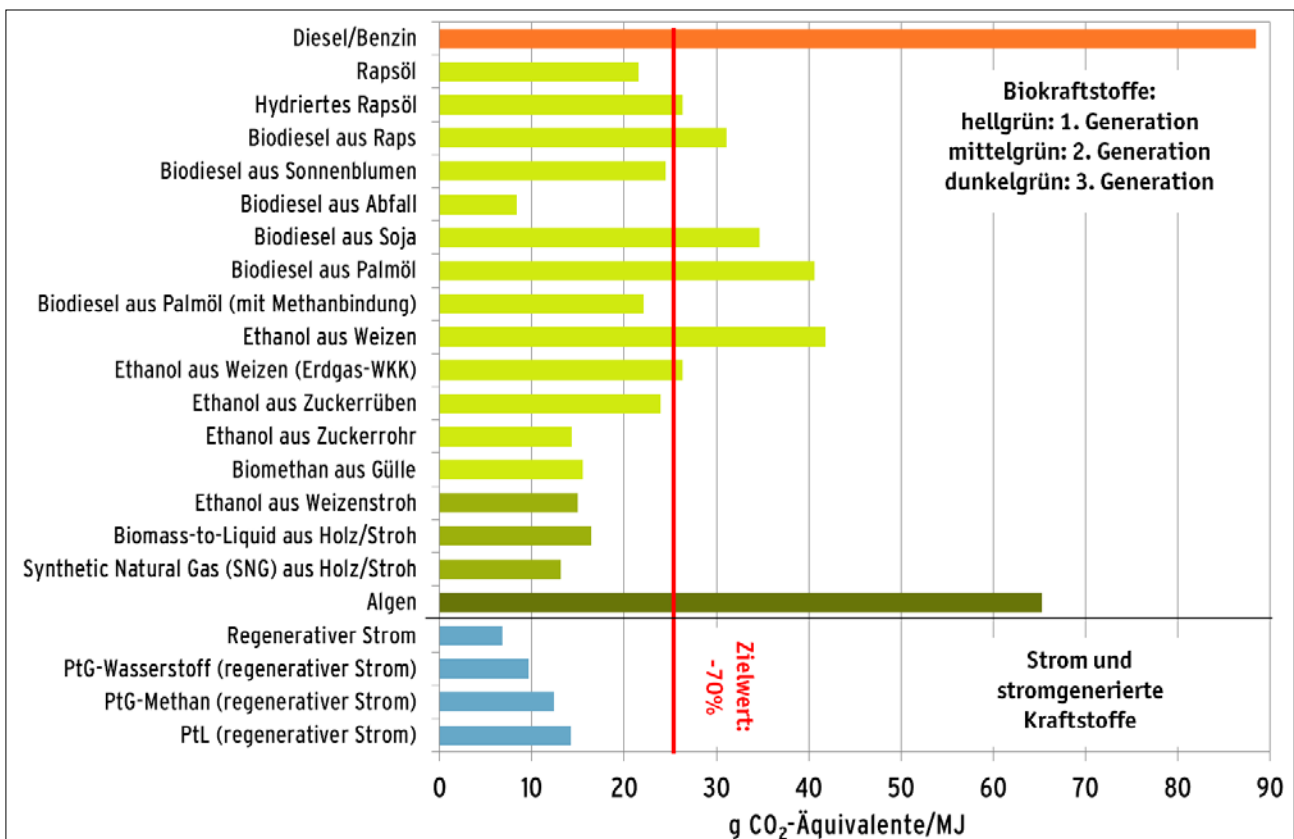
Werden postfossile Kraftstoffe wie Benzin und Diesel in Verbrennungsmotoren und damit in Fahrzeuge mit vergleichbarer Effizienz eingesetzt, dürfen sie somit pro MJ Kraftstoff lediglich 30 % der Emissionen von Benzin und Diesel verursachen. Das entspricht rund 27 g CO<sub>2</sub>e/MJ im Jahr 2050. Bei effizienteren Antrieben mit Elektromotor oder Brennstoffzelle dürfen die Emissionen der Energieträger Strom bzw. Wasserstoff pro MJ zwar etwas höher liegen. Zur Vereinfachung wird aber auch für diese Kraftstoffe eine 70 %-Minderung pro MJ unterstellt.

Abbildung 9 zeigt für das Jahr 2050 den Vergleich der spezifischen Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen, Strom bzw. stromgenerierten Kraftstoffen. Die Referenz ist Benzin bzw. Diesel. In diesen Zahlen unberücksichtigt sind mögliche zusätzliche Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen, die im Einzelfall bis zu 100 g CO<sub>2</sub>e pro MJ Biokraftstoff betragen können [Kretschmar et al. 2011]. Für Biokraftstoffe der 1. Generation wurden die Emissionsfaktoren der EU-Richtlinie 2008/28/EG entnommen, die Emissionsfaktoren für Biokraftstoffe der 3. Generation nach Angaben von Zah et al. (2010). Da die Emissionsfaktoren die heutige Situation reflektieren, wurden analog zu den Biokraftstoffen der 2. Generation (siehe Kapitel 3) zusätzliche Emissionsminderungen bis zum Jahr 2050 angenommen (-40 % unter der Annahme, dass die Treibhausgasemissionen weltweit so reduziert werden, dass der Temperaturanstieg auf 4 Grad beschränkt wird). Für Biokraftstoffe der 1. Generation werden die Emissionsminderungen dadurch aber deutlich überschätzt, da sich beim Anbau von Biomasse entsprechende Treibhausgasreduktionen nicht realisieren lassen werden. Für alle anderen postfossilen Kraftstoffe wurden die in Kapitel 3 vorgestellten Treibhausgas-Emissionsfaktoren direkt übernommen.

Die Analyse zeigt: Strom, stromgenerierte Kraftstoffe und Biokraftstoffe der 2. Generation erfüllen klar das geforderte 70 %-Minderungsziel. Wie ausgeführt, erreichen dann auch Kombinationen dieser Energieträger mit verschiedenen alternativen Antrieben die geforderte 50%ige

Gesamtinderung und zwar unabhängig vom Verkehrsmittel. Für Biokraftstoffe der 2. Generation setzt dies aber voraus, dass nur Restholz und -stroh genutzt wird, das stofflich nicht genutzt werden kann. Biokraftstoffe der 1. Generation aus Anbaubiomasse – mit Ausnahme von Ethanol aus Zuckerrohr – erfüllen das Ziel nicht oder nur sehr knapp – und dies trotz optimistischer Annahmen zur Emissionsminderung bis 2050. Positiv sind lediglich Biokraftstoffe der 1. Generation einzustufen, wenn sie aus Abfällen oder aus Reststoffen hergestellt werden (z. B. Biogas). Biokraftstoffe der 3. Generation dagegen verfehlen das Minderungsziel nach aktuellem Wissenstand.

Abbildung 9: Treibhausgasemissionen (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente, ohne Berücksichtigung von indirekten Landnutzungsänderungen/iLUC) pro MJ Kraftstoff bzw. Strom für ausgewählte postfossile Energieversorgungsoptionen im Jahr 2050 (inkl. Vergleichswert Benzin/Diesel)<sup>7</sup>



[Eigene Darstellung basierend auf Angaben von Kapitel 3 sowie 2009/28/EG]

<sup>7</sup> Die Treibhausgasemissionen für alle dargestellten Kraftstoffe, insbesondere für Strom und strombasierte Kraftstoffe beruhen auf der Annahme, dass die Produktionsanlagen zur Herstellung der Windkraft-, Wasserkraft- und Photovoltaikanlagen sowie der Umwandlungssektor im Ausland (Kraftwerke, Raffinerien) noch nicht vollständig dekarbonisiert sind. Die dieser Studie zugrunde liegenden Annahmen sind im Kapitel 3 ausführlich beschrieben. Die Ergebnisse beziehen sich somit auf ein treibhausgasneutrales Deutschland in einer noch nicht treibhausgasneutralen Welt. In allen folgenden Abbildungen, in denen Treibhausgasvergleiche für das Jahr 2050 dargestellt sind, gelten die gleichen Annahmen. Es wird aber auf weitere Verweise an den jeweiligen Abbildungen zur besseren Lesbarkeit des Berichtes verzichtet.



## 4.2 Verzicht auf Anbaubiomasse

Ein Verzicht auf die Verwendung von Anbaubiomasse betrifft in erster Linie Biokraftstoffe der 1. Generation. Biokraftstoffe der 2. Generation aus Restholz und -stroh zeichnen sich ja gerade dadurch aus, dass keine landwirtschaftliche Fläche zur Produktion von Anbaubiomasse benötigt wird. Gleiches gilt auch für Biokraftstoffe der 3. Generation. Warum sollte aber auf Anbaubiomasse überhaupt verzichtet werden?

Zum einen benötigt der Anbau von Energiepflanzen Flächen mit ökologisch unerwünschten Folgewirkungen. Das gilt zum einen für die Umwandlung von Regenwald in Ölpalm-Plantagen: Hierdurch wird so viel CO<sub>2</sub> frei, dass auf der gerodeten Fläche bis zu 400 Jahre lang Ölpalm-Biodiesel produziert werden müsste, um diese anfängliche CO<sub>2</sub>-Schuld zu kompensieren. Das gilt zum anderen auch für den Anbau auf bereits vorhandenen Landwirtschaftsflächen: Die Vorkultur wird verdrängt, was den Druck auf Waldflächen erhöht (indirekte Landnutzungsänderungen). Als vorteilhaft werden deshalb Energiepflanzen wie der ölhaltigen Jatropha-Nuss angesehen, die auf wenig fruchtbaren Böden gedeiht und damit nicht in Konkurrenz mit Nahrungsmittelanbau und wertvollen Naturflächen steht. Unter solch kargen Verhältnissen bleiben jedoch die Erträge gering, ein hoher Flächen- und Bewässerungsbedarf sind die Folge [UBA 2012; Zah et al. 2011; Zah et al. 2010].

Der Anbau von Biokraftstoffen der 1. Generation bewegt sich also in einem ständigen Spannungsfeld zwischen Verdrängung anderer Kulturen, Abholzung von Waldflächen und hohem Wasserbedarf. Bei weiter zunehmenden Nahrungsmittelbedarf durch wachsende Weltbevölkerung und wachsenden Wohlstand ist ein Anbau von Biomasse für große Mengen Kraftstoffe nicht zielführend. Das Spektrum der Umweltbelastungen ist bei Biokraftstoffen zudem generell größer als bei fossilen Kraftstoffen.

Abbildung 10 zeigt, dass Überdüngung, Boden-Versauerung, Süßwassertoxizität, Partikelemissionen und Wasserverbrauch bei Biodiesel und Ethanol um mehr als 50 % höher liegen als bei der fossilen Referenz [Faist et al. 2012]. Optimierte Energiepflanzen und verbesserter Anbau können Umweltauswirkungen mindern, es dürfte aber auch langfristig schwierig bleiben, alle Auswirkungen von Biokraftstoffen unter das Niveau der fossilen Referenz zu bringen. Ein Verzicht auf Anbaubiomasse zur Kraftstoffherstellung ist damit konsequent [Faist et al. 2012; Kretzschmar et al. 2011; Zah et al. 2010]. Bei Biokraftstoffen aus Reststoffen und Abfallmaterial dagegen gibt es keine landwirtschaftlichen Emissionen, daher liegen die Umweltauswirkungen in der Regel tiefer als bei fossilem Kraftstoff [Faist et al. 2012].

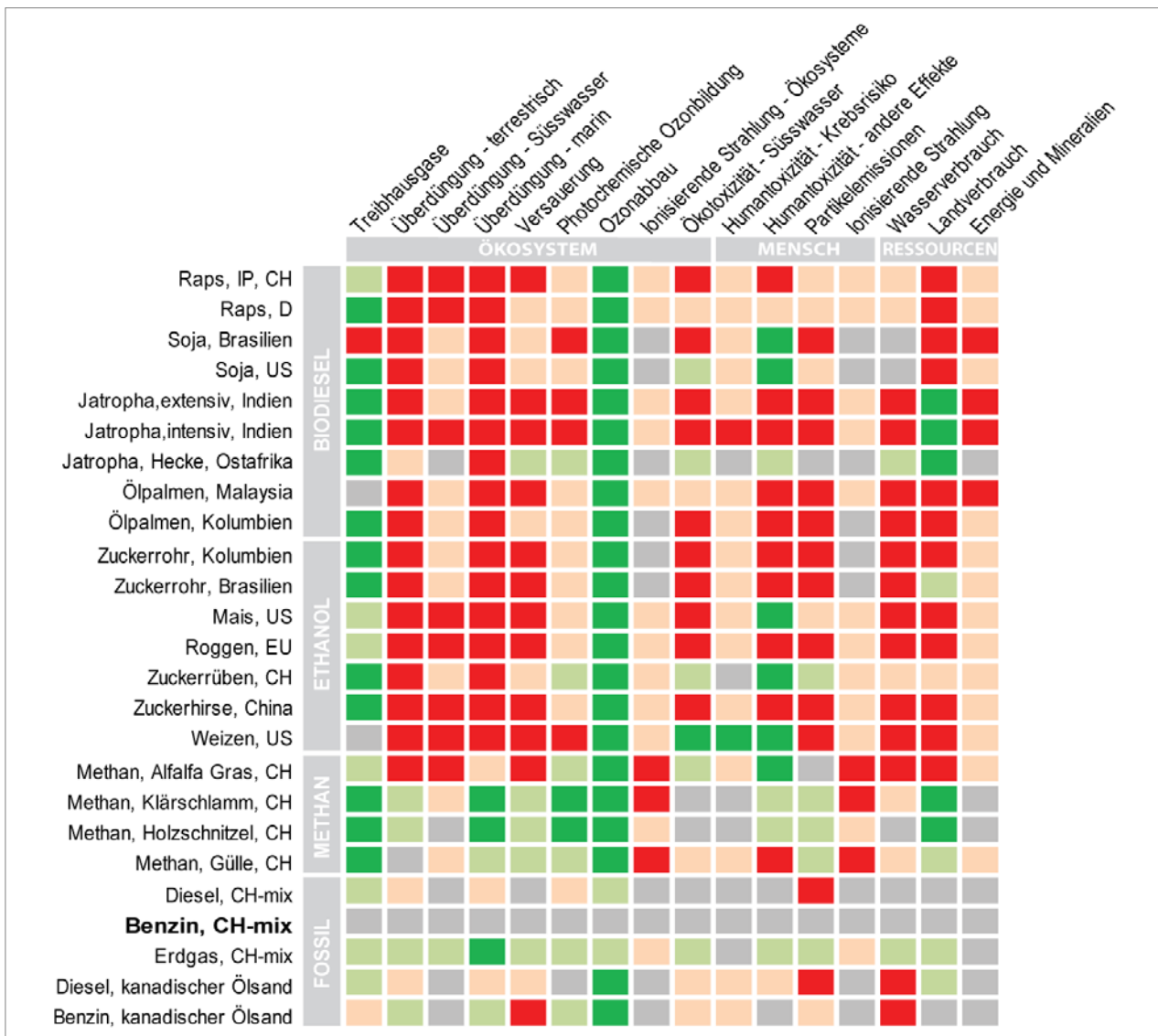
Bei Biokraftstoffen der 2. Generation entfällt die Landnutzungsproblematik bei Verwendung von Stroh, Abfall- bzw. Restholz oder Grünabfällen. Allerdings sind Abfallstoffe nur begrenzt verfügbar. Auch wenn bei der Nutzung von Restholz kein gezielter Holzanbau für Kraftstoffe stattfindet, muss auf nachhaltige Forstwirtschaft geachtet werden, um negative Wirkungen auf die Biodiversität zu vermeiden. Das Gleiche gilt bei der extensiven Nutzung z. B. von Prärie gras – hier darf der Biomasse-Entzug die Bodenfruchtbarkeit nicht schädigen. Diese Beispiele zeigen, dass auch bei Biokraftstoffen der 2. Generation ökologisch unerwünschte Folgewirkungen auftreten können, die allerdings durch eine nachhaltige Forst- und Landwirtschaft ausgeschlossen werden können [Zah et al. 2010]. Dies ist bei Biokraftstoffen der 1. Generation nicht möglich.

Die Herstellung von Biokraftstoffen der 3. Generation, Strom und stromgenerierte Kraftstoffen haben hingegen keine nennenswerten Auswirkungen auf die Landnutzung. Biotreibstoffe aus Algen ermöglichen im Grundsatz die Produktion flüssiger Kraftstoffe ohne Landnutzungs Konkurrenz, da die Algen-Primärproduktion höher sein kann als bei Landpflanzen und Bioreakto-

ren außerhalb fruchtbarer Flächen gebaut werden können. Auch die Produktion von erneuerbaren Strom kann prinzipiell auf unfruchtbarem Land erfolgen.

Durch den Ausschluss von Anbaubiomasse für langfristig erstrebenswerte, postfossile Energieversorgungsoptionen können negative Auswirkungen auf Landnutzung und unerwünschte ökologische Folgewirkungen vermieden werden. Dies bedeutet aber, dass Biokraftstoffe der 1. Generation, hergestellt aus Anbaubiomasse, keine Option für eine nachhaltige Energieversorgungsoption des Verkehrs im Jahr 2050 darstellt. Obige Beispiele zeigen aber auch, dass Biokraftstoffe der 2. Generation zwar keine direkten Auswirkungen auf die Landnutzung haben, dass aber durchaus negative Folgen für die Biodiversität möglich sind, die beachtet und ausgeschlossen werden müssen. Biokraftstoffe der 3. Generation und regenerativer Strom können zwar außerhalb von landwirtschaftlichen Flächen erzeugt werden, dennoch muss der verursachte Flächenverbrauch Berücksichtigung finden (siehe hierzu Kapitel 6.1).

Abbildung 10: Spezifische Umweltindikatoren für Biokraftstoffe der 1. Generation relativ zur fossilen Referenz Benzin



Dunkelgrün: <60 % Umweltbelastung, hellgrün: 60-95 % Umweltbelastung; grau: 95-105 % Umweltbelastung; rose: 105-165 % Umweltbelastung; rot: >165 % Umweltbelastung  
[Faist et al. 2012]

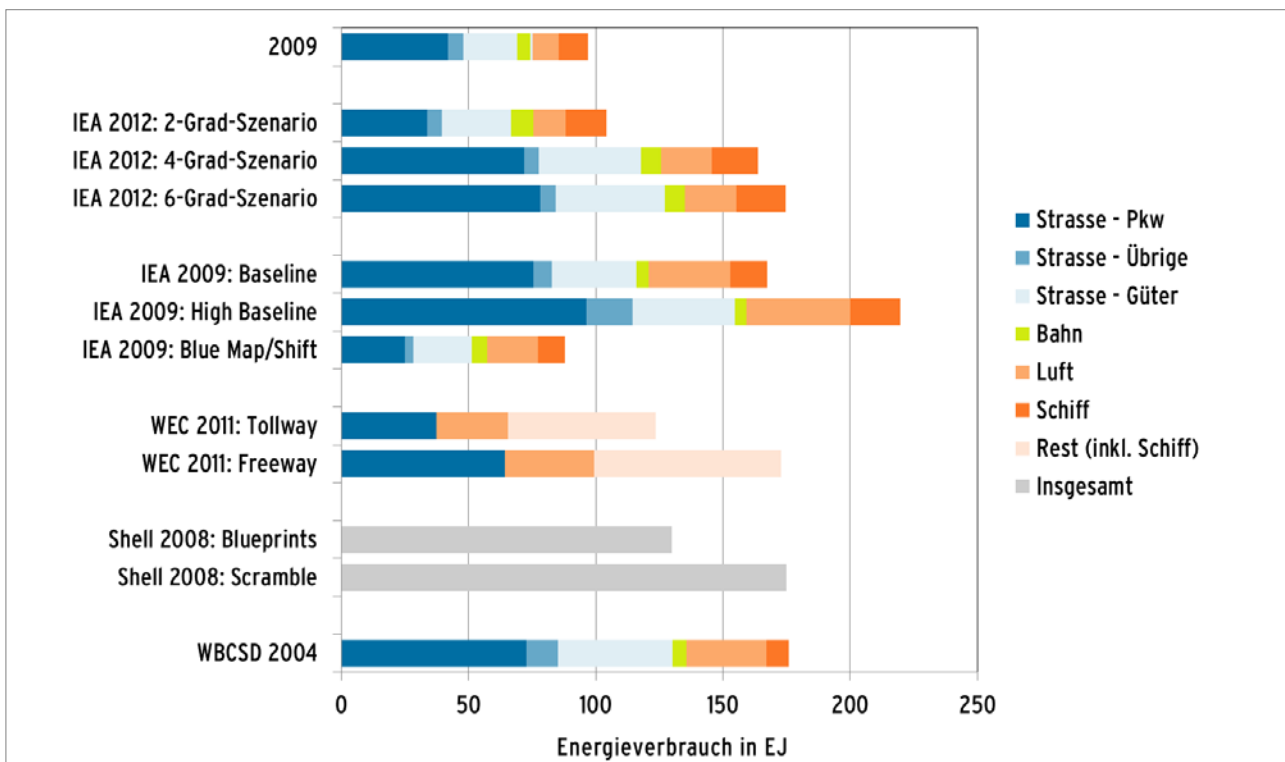
### 4.3 Mengenpotenziale

Ob die Mengenpotenziale der postfossilen Kraftstoffe ausreichend sind, hängt von zwei Aspekten ab. Erstens von der weltweiten Endenergienachfrage für den Verkehr im Jahr 2050; und zweitens davon, wie viel Energie der jeweilige Kraftstoff überhaupt zur Verfügung stellen kann.

Eine klare Prognose für den globalen Endenergieverbrauch des Verkehrs im Jahr 2050 gibt es nicht. Die verfügbaren Szenarien setzen unterschiedliche Randbedingungen, einige schreiben den aktuellen Trend fort, andere gehen von einem deutlichen Umsteuern der Verkehrspolitik aus (siehe Abbildung 11). Dennoch zeigt sich, dass als Untergrenze rund 100 EJ, als Obergrenze der meisten Studien rund 170 EJ gesetzt werden können.<sup>8</sup>

Der alternative Kraftstoff sollte entsprechend dem weiter oben aufgestellten Kriterium im Jahr 2050 mindestens 10 % des weltweiten Endenergieverbrauches des Verkehrs decken können. Dies entspricht einem Endenergieverbrauch von 10 bis 17 EJ. In aktuellen Szenarien der IEA benötigt bis dahin allein der Luftverkehr zwischen 12 und 20 EJ, der internationale Schiffsverkehr zwischen 16 und 20 EJ [IEA 2012]. Das bedeutet, dass ein verfügbares Potenzial von 10 bis 17 EJ in etwa den Flug- oder den Schiffsverkehr weitgehend versorgen könnte - der Schwellenwert von 10 % der globalen Endenergienachfrage ist daher als Trennlinie zwischen Nischenmarkt und breiterem Markt durchaus sinnvoll.

Abbildung 11: Globaler Endenergieverbrauch des Verkehrs 2009 und 2050



[eigene Darstellung auf Basis von IEA 2012 und 2009, WEC 2011; Shell 2008; WBCSD 2004]

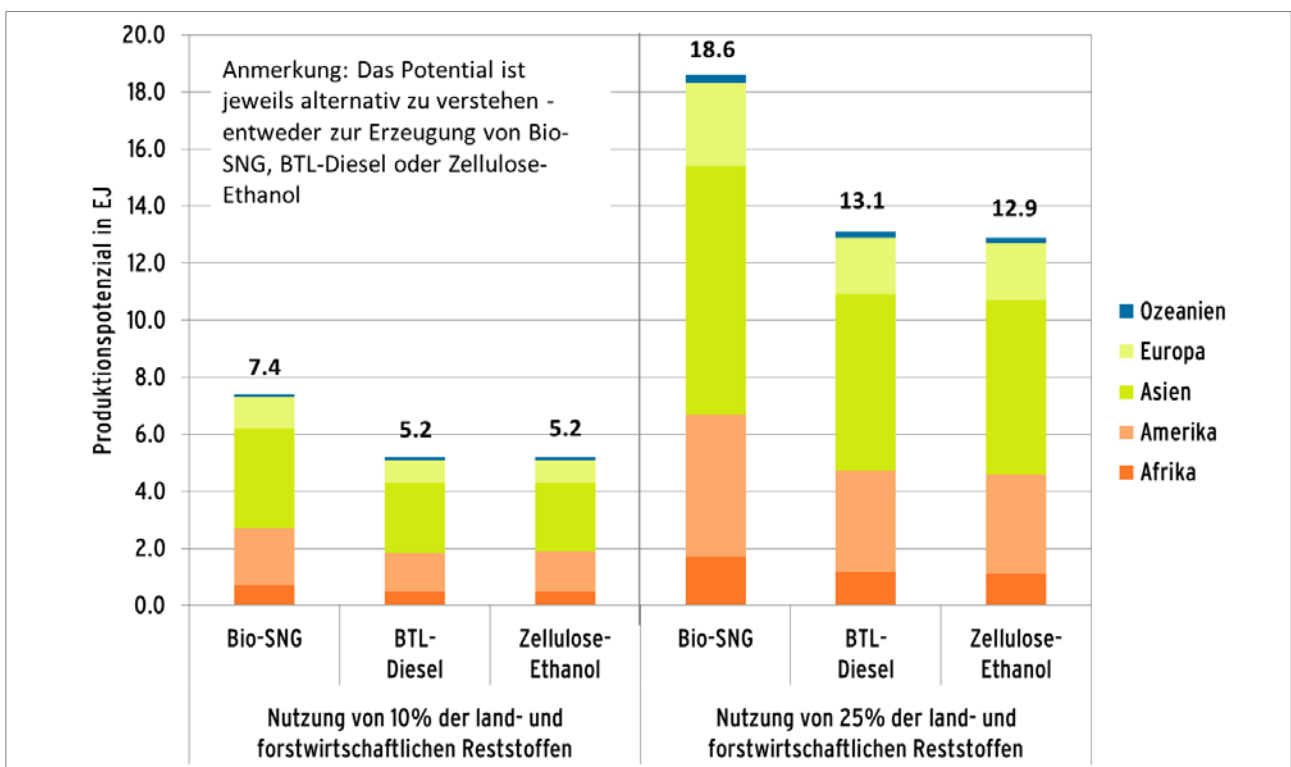
Die Mengenfrage ist insbesondere für Biokraftstoffe ein kritischer Punkt. Gibt es genügend Fläche, um ausreichend Energiepflanzen anzubauen? Nach Analysen des Umweltbundesamtes werden Energiepflanzen derzeit auf ca. 55 Mio. ha angebaut, hauptsächlich zur Herstellung

<sup>8</sup> Eine Studie prognostiziert in einem Worst-Case-Szenario gar 220 EJ als Obergrenze [IEA 2009].

von Biokraftstoffen der 1. Generation. Bei einem mittleren Energieertrag von rund 140 GJ/ha ergibt sich ein Wert von 7 bis 8 EJ pro Jahr [UBA 2012]. Diese Werte zeigen, dass Biokraftstoffe der 1. Generation heute noch deutlich von der Marktschwelle von 10 bis 17 EJ entfernt sind. Allerdings wären mit steigenden Erträgen sowie einer Ausweitung der Anbauflächen deutlich höhere Energiemengen erzeugbar [IEA 2011]. Auswertungen verschiedener Studien zeigen, dass Energiepflanzen ein Mengenpotential von 45 bis 110 EJ bergen – also Werte, die deutlich über der Marktschwelle liegen [Malins 2013].

Weit geringere Mengenpotenziale haben Biokraftstoffe der 1. Generation, die aus Reststoffen und Abfall gewonnen werden. Altöle und Altfette stehen nur in geringen Mengen zur Verfügung – bezogen auf die USA könnten sie Abschätzungen zufolge derzeit rund 3 % der US-amerikanischen Kerosinproduktion ersetzen [Malina 2013]. Biogas hat im Jahr 2050 ein Potential von rund 5 EJ – allerdings stammt der größte Teil davon aus der nicht nachhaltigen Nutzung von Anbaubiomasse [IEA 2011]. Diese Zahlen zeigen: Biokraftstoffe aus Reststoffen und Abfällen haben zwar Potentiale zur Treibhausgasminderung, sind aber in der Menge nur ausreichend für Nischenanwendungen.

Abbildung 12: Theoretisches globales Produktionspotential von Biotreibstoffen der 2. Generation hergestellt aus land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen im Jahr 2030 (aus 10 % bzw. 25 % der Reststoffe)



[eigene Darstellung nach IEA 2010]

Von Bedeutung ist daher die Frage nach den künftigen Mengen an Biokraftstoffen der 2. Generation, zu deren Herstellung ausschließlich Restholz und -stroh verwendet wird. Abbildung 12 zeigt das theoretische Produktionspotential für 2. Generations-Biokraftstoffe für den Fall, dass 10 bzw. 25 % der weltweit verfügbaren Reststoffe aus der Forst- und Landwirtschaft entweder für die Herstellung von Bio-SNG oder BtL-Diesel oder Zellulose-Ethanol genutzt würden [IEA 2010]. Im günstigen Fall (Nutzung von 25% Reststoffe, Produktion Bio-SNG) können zwischen 13 und 19 EJ Biokraftstoff erzeugt werden (siehe Abbildung 12). Dies zeigt, dass mit Biokraftstoffen der 2. Generation rund 10 % der weltweiten Endenergienachfrage des Verkehrs im Jahr 2050

gedeckt werden könnte. Sie sind damit eine Option für eine postfossile Energieversorgung der Zukunft – wenn auch mit begrenztem Potenzial. Wie bereits angedeutet, bestehen diese Einschränkungen für die Herstellung von Biokraftstoffen der 3. Generation aus Algen nicht. Die Algen-Primärproduktion kann auch auf nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen durchgeführt werden und ist deutlich höher als die von Energiepflanzen, weshalb theoretisch rund 10 % der weltweiten Endenergiemenge für den Verkehr zur Verfügung gestellt werden könnte.

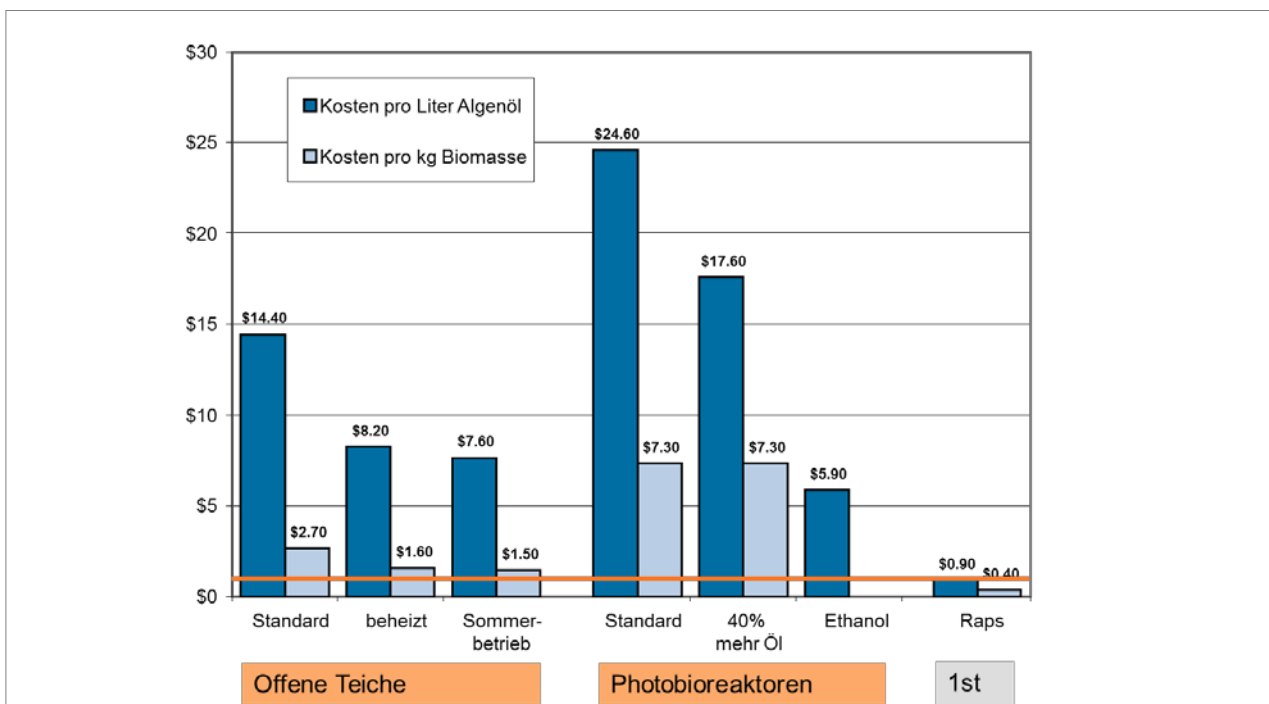
Wie Biokraftstoffe der 3. Generation ist die Erzeugung von regenerativem Strom nicht an landwirtschaftliche Flächen gebunden. Da die flächenspezifischen Energieerträge von Wind- und Photovoltaikanlagen deutlich höher sind als bei der Gewinnung von Bioenergie, ist unbestritten, dass 10 % des weltweiten Energieverbrauchs des Verkehrs mit regenerativ erzeugtem Strom oder mit stromgenerierten Kraftstoffen gedeckt werden könnten (siehe hierzu Kapitel 6.1) [DLR et al. 2012; LBST 2013]. Es stellt sich allerdings die Frage, ob der hierfür notwendige Ausbau an Windkraft und Photovoltaik gesellschaftlich und politisch akzeptiert wird.

#### 4.4 Entwicklungsstand

Biokraftstoffe der 1. Generation sind schon länger am Markt. Für Biokraftstoffe der 2. Generation existieren bislang Pilot- und Demonstrationsanlagen, beispielsweise zur Herstellung von Zellulose-Ethanol, BtL und Bio-SNG. Der Entwicklungsstand der Technologie ist so weit, dass Anlagen in den nächsten Jahrzehnten in großtechnischem Maßstab realisiert werden können [IEA 2011; IEA 2010].

Die Produktion aus Algen wird derzeit in kleinen Versuchsanlagen getestet. Anlagen im Großmaßstab werden voraussichtlich auch bis zum Jahr 2050 noch nicht möglich sein. Diese These unterstützen verschiedene Studien, die auch unter optimistischen Annahmen die Produktionskosten um eine Größenordnung höher sehen als bei Biokraftstoffen der 1. Generation (siehe Abbildung 13). Eine kommerziell erfolgreiche Produktion von Algen-Kraftstoffen erscheint daher auch längerfristig als unwahrscheinlich [Alabi et al. 2009].

Abbildung 13: Kosten pro kg Algenbiomasse und pro l Öl/Ethanol aus Algen unter verschiedenen Szenarien in Kanada



[eigene Darstellung nach Alabi et al. 2009]

Bei stromgenerierten Kraftstoffen ist die Herstellung von Wasserstoff via Elektrolyse eine erprobte Technologie, für die relativ viel Erfahrung vorhanden ist. Eine solare Wasserstoffherzeugung dagegen, bei der Sonnenenergie direkt zur thermochemischen Spaltung von Wasser genutzt wird [Roth 2013], ist allerdings weit von einer Marktrealisierung entfernt und wird daher in dieser Studie nicht weiter verfolgt. In den vergangenen Jahren wurden in Deutschland zudem erste PtG-Anlagen zur Methanherstellung in Betrieb genommen [Sternner 2011; LBST 2013]. PtL-Anlagen sind demgegenüber derzeit erst in der Projektierung [Sunfire 2013]. Da diese Anlagen eine Elektrolyseeinheit mit einer Fischer-Tropsch-Synthese koppeln, die auch zur Erzeugung von BTL-Diesel eingesetzt wird, steht grundsätzlich einer großtechnischen Realisierung nichts im Wege. Ob sich allerdings die in dieser Studie unterstellten Wirkungsgrade der PtG- und PtL-Anlagen erreichen lassen, wird sich erst in Zukunft zeigen. Dies gilt allerdings ebenfalls auch für die in dieser Studie unterstellten optimistischen Annahmen in allen anderen Technologiebereichen (bei Brennstoffzellen, Batterien, Fahrzeugeffizienz etc.).

Als Resümee kann festgestellt werden: Mit Ausnahme von Biokraftstoffen der 3. Generation ist für alle aufgezeigten Herstellungswege mindestens ein Verfahren weit genug entwickelt, dass es aus heutiger Sicht im Jahr 2050 großtechnisch zur Verfügung steht.

#### 4.5 Ergebnis der Vorauswahl

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis der Bewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen in Bezug auf die vier Kriterien Treibhausgasminderung, Verwendung von Anbaubiomasse, Mengenpotential sowie Entwicklungsstadium. In Bezug auf diese Kriterien durchweg positiv bewertet wurden

- die direkte Nutzung von regenerativem Strom,
- die indirekte Nutzung von regenerativem Strom zur Herstellung von stromgenerierten Kraftstoffen wie PtG-Wasserstoff, PtG-Methan und PtL,
- Biokraftstoffe der 2. Generation wie Zellulose-Ethanol, BtL und Bio-SNG.

Diese postfossilen Energieversorgungsoptionen kommen daher für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050 grundsätzlich in Frage und werden in den folgenden Kapiteln detaillierter bewertet. Allerdings muss angemerkt werden, dass die Biokraftstoffe der 2. Generation die Vorgabe einer 10%-igen Abdeckung der weltweiten Endenergienachfrage des Verkehrs im Jahr 2050 nur knapp erfüllen. Biokraftstoffe der 2. Generation haben somit nur ein beschränktes Mengenpotential und können nicht die alleinige Energieversorgungsoption der Zukunft darstellen.

Biokraftstoffe der 1. Generation aus Reststoffen oder Abfällen können zwar zur Treibhausgasminderung des Verkehrs beitragen, ihre Mengen können aber nur Nischen bedienen, so dass sie von der detaillierteren Betrachtung ausgeschlossen wurden. Ebenfalls klar ausgeschlossen für die vertiefende Bewertung wurden die übrigen Biokraftstoffe der 1. Generation, die Anbaubiomasse benötigen. Sie haben negative Umweltauswirkungen, stehen in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und sind daher nicht nachhaltig. Sie stellen keine sinnvolle Energieversorgungsoption für den Verkehr im Jahr 2050 dar. Für Biokraftstoffe der 3. Generation aus Algen stecken die Technologien noch in den Kinderschuhen, auch sie werden für eine detaillierte Bewertung in den nächsten Kapiteln nicht weiter berücksichtigt.

Abbildung 14: Ergebnis der Vorauswahl der postfossilen Energieversorgungsoptionen

	Treibhausgas- minderung > 50%	Keine Anbaubiomasse	Deckung der weitweiten End- energienachfrage des Verkehr: >10%	Realisierung in größtechnischem Maßstab bis 2050
Biokraftstoffe der 1. Generation - Anbaubiomasse	Ausnahme: Ethanol aus Zuckerrohr			
Biokraftstoffe der 1. Generation - Reststoffe/Abfall				
Biokraftstoffe der 2. Generation (Ethanol, BtL, Bio-SNG)				
Biokraftstoffe der 3. Generation (Algen)				
Regenerativer Strom - direkte Nutzung				
Stromgenerierte Kraftstoffstoffe				

	Kriterium wird erfüllt		Kriterium wird nicht erfüllt
--	---------------------------	--	---------------------------------

[eigene Darstellung]

## 5 Eine erste Bewertung: Treibhausgase und Kosten

Im Mittelpunkt dieses Kapitels steht eine vertiefte Bewertung der in Kapitel 4 ausgewählten postfossilen Energieversorgungsoptionen in Bezug auf Treibhausgasemissionen und Kosten und zwar spezifisch für jedes Verkehrsmittel. Diese Bewertung ist aber nur die halbe Wahrheit. Erst gekoppelt mit anderen ökologischen, ökonomischen und sonstigen Effekten ergibt sich ein Gesamtbild (siehe Kapitel 6). Die Analyse von Treibhausgasemissionen und Kosten gibt also die Tendenz vor, entspricht aber nicht dem Endresultat.

Die folgenden Analyseergebnisse basieren auf den Festlegungen aus Kapitel 3. Der Aspekt „Treibhausgasemissionen“ umfasst in dieser Studie sowohl die Emissionen aus Herstellung und Verbrennung der Kraftstoffe als auch aus Herstellung, Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge. Allerdings ist die Ermittlung der Emissionen aus der Herstellung künftiger Kraftstoffe mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Neben dem Referenzfall werden für jedes Verkehrsmittel daher in diesem Kapitel die Unter- (optimistische Annahmen) wie auch Obergrenze (pessimistische Annahmen) der Treibhausgasemissionen zusätzlich zum Referenzfall ausgewiesen. Die hierfür zugrunde gelegten optimistischen und pessimistischen Annahmen sind in Tabelle 6 in Kapitel 3 dokumentiert.

Den Analysen liegt die Annahme zugrunde, dass in Deutschland die Treibhausgasemissionen um 95 % gegenüber dem Jahr 1990 gesenkt werden und damit eine nahezu treibhausgasneutrale Gesellschaft erreicht wird [UBA 2014]. Es kann aber nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden, dass dies auch für die restlichen Länder dieser Welt zutrifft, in denen teilweise die Produktion der Stromerzeugungsanlagen (z. B. Fotovoltaik-Anlagen), Kraftstoffe (z.B. Biokraftstoffe) oder Fahrzeuge erfolgt. Wie in Kapitel 3 ausgeführt, wird im Referenzfall davon ausgegangen, dass die Treibhausgasemissionen weltweit so stark begrenzt werden, dass der anthropogen bedingte Temperaturanstieg auf 4 Grad begrenzt werden kann. Dies bedeutet gegenüber heute bereits eine Reduktion der produktionsbedingten Treibhausgasemissionen um rund 40 %. Die Herstellung der Kraftstoffe und Fahrzeuge ist damit aber noch nicht treibhausgasneutral, was sich in den Vergleichen der Treibhausgasemissionen der untersuchten postfossilen Kraftstoffoptionen widerspiegelt.

Würden sich auch die anderen Länder stärker in Richtung treibhausgasneutrale Gesellschaft entwickeln, würden sich die produktionsbedingten Emissionen immer stärker in Richtung Nullemissionen bewegen. Um diesen Effekt aufzuzeigen, wurde in einer Sensitivitätsrechnung für den Pkw dargestellt, wie der Emissionsvergleich der postfossilen Energieversorgungsoptionen ausfallen würde, wenn weltweit ein 2-Grad-Ziel erreicht würde. Die unterstellten Annahmen für diese Sensitivität sind ebenfalls in Kapitel 3 dokumentiert. In diesem Fall sind die Produktion von Kraftstoffen und Fahrzeugen mit noch deutlich geringeren Emissionen verbunden (-75 % gegenüber heute), aber auch noch nicht vollständig emissionsfrei. Die Gegenüberstellung der Treibhausgasemissionen der Energieversorgungsoptionen des Verkehrs erfolgt daher für ein nahezu treibhausgasneutrales Deutschland in einer noch nicht emissionsfreien Welt.

Die Kosten in den folgenden Bewertungen berücksichtigen – wie in Kapitel 3.5 ausgeführt – lediglich die Anschaffungskosten für das Fahrzeug (umgerechnet auf ein Jahr mit Hilfe der Annuitäten-Methode) und die Kosten für Kraftstoffe bzw. Strom. Um die Werte vergleichbar zu halten, bleiben alle Art der Steuern unberücksichtigt. Alle Kosten sind zu 2010er Preisen angegeben.

Die Vorauswahl der postfossilen Energieversorgungsmöglichkeiten zeigt, dass nur einige davon überhaupt zur Verfügung stehen:

- die direkte Nutzung von regenerativem Strom,



- die Nutzung von aus regenerativem Strom hergestellten Kraftstoffen (PtG-Wasserstoff, PtG-Methan und PtL auf Basis von erneuerbarem Strom),
- die Nutzung von ausgewählten Biokraftstoffen der 2. Generation unter Nutzung von Restholz- und -stroh (Zellulose-Ethanol, BtL-Diesel und Bio-SNG).

Welche dieser Optionen in Frage kommen, hängt von der technischen Realisierbarkeit sowie den erzielbaren Reichweiten ab. Daher wird vor der Bewertung der Emissionen und Kosten zu Beginn der folgenden Unterkapitel spezifisch für jedes Verkehrsmittel abgeleitet, welche Energieversorgungsoptionen überhaupt in die engere Auswahl kommen. Nur für sie werden dann die Analysen durchgeführt.

## 5.1 Pkw

### Die Optionen im Überblick

Für Pkw steht im Jahr 2050 eine breite Auswahl von treibhausgasarmen Optionen zur Verfügung (siehe Abbildung 15). Die anstehende Technologiewende muss dabei nicht unbedingt radikal ausfallen: Heutige Verbrennungsmotoren (ICE – Internal Combustion Engine) könnten auch zukünftig als Antriebe eine wichtige Rolle spielen, soweit sie durch Hybridisierung verbrauchoptimiert werden und die Verbrennungsmotoren ausschließlich postfossile Kraftstoffe nutzen. Dafür kommen flüssige und gasförmige strombasierte Kraftstoffe und Biokraftstoffe der 2. Generation in Frage. Bei letzteren ist die Verfügbarkeit allerdings beschränkt: Eine Versorgung des gesamten Pkw-Verkehrs mit diesen Biokraftstoffen wäre zwar unter Annahme von Importen für Deutschland denkbar, nicht jedoch weltweit. Da allen Ländern gleiche Entwicklungschancen zugestanden werden sollten, kommt daher aus Gerechtigkeitsgründen eine vollständige Umstellung der Energieversorgung des Pkw-Verkehrs auf Biokraftstoffe der 2. Generation in Deutschland nicht in Frage.

Abbildung 15: Postfossile Energieversorgungsoptionen für Pkw

	Verbrennungsmotor (ICEV = Internal Combustion Engine Vehicles)		Elektromotor (EV= Electric Vehicle)			Oberleitung
	ICEV-Benzin <sup>1)</sup> / ICEV-Diesel <sup>1)</sup>	ICEV-Gas <sup>1)</sup>	Brennstoffzelle (FCEV = Fuel Cell Electric vehicle)	Batterie-elektrisch (BEV = Battery electric vehicle)	Plug-in Hybrid (PHEV = Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	
Ethanol (Holz/Stroh)	○				○	
BtL (Holz/Stroh)	○				○	
PtL	●				●	
Bio-SNG (Holz/Stroh) - komprimiert		○				
PtG-Methan - komprimiert		●				
PtG-Wasserstoff - komprimiert			●			
Regenerativer Strom				●	●	

● = Ausreichende Mengenpotentiale; ○ = nur eingeschränkte Mengenpotentiale

<sup>1)</sup> Inkl. Hybridisierung.

[eigene Darstellung]

Pkw mit Elektromotor sind heute (noch) eine Randerscheinung. Im Jahr 2050 allerdings könnte diese Antriebsvariante eine wichtige Säule einer postfossilen Energieversorgung darstellen. Ne-

ben der direkten Nutzung von regenerativem Strom in batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) kann der Elektromotor auch mit Strom aus einer Brennstoffzelle angetrieben werden (FCEV). Der dafür notwendige Wasserstoff wird mit regenerativem Strom erzeugt.

Bei gasförmigen Kraftstoffen sowie bei batterieelektrischen Pkw wird die Reichweite des Fahrzeugs durch Gewicht und Volumen von Batterie bzw. Tank bestimmt. Durch die in Kapitel 3 beschriebenen Steigerungen der Energieeffizienz der Pkw sowie höhere Energiedichten der Batterien werden alle in Abbildung 15 beschriebenen Energieversorgungsoptionen in Zukunft Reichweiten von mindestens 500 km ermöglichen. Eine Speicherung der Kraftstoffe in gasförmiger Form ist für Pkw ausreichend, flüssige Kraftstoffe benötigen für ihre Herstellung deutlich mehr Energie.

Für eine Reichweite von 500 km wäre allerdings eine Batterie mit einer Kapazität von 100 kWh und einem Gewicht von rund 280 kg notwendig (siehe Annahmen in Kapitel 3). Sie wäre mit rund 15.000 Euro selbst 2050 aber sehr kostspielig (zu 2010er Preisen). Für die Kostenbetrachtung wird daher eine zweite Variante eines batterieelektrischen Pkw mit einer Reichweite von lediglich 200 km untersucht. Hierfür wäre eine 40-kWh-Batterie mit Zusatzkosten von rund 6.000 Euro ausreichend.

Ein Kompromiss zwischen herkömmlichen Fahrzeugen und teuren reinen Elektroautos sind die Plug-In-Hybride<sup>9</sup>, die Verbrennungs- und Elektromotor kombinieren und trotz kleiner Batterie quasi keine Reichweitenbeschränkungen haben. Geht man von einem rein batterieelektrischem Fahrbetrieb von 70 km aus, würde eine Batterie mit einer Kapazität von rund 16 kWh (Kosten: rund 2.500 Euro) ausreichen. Zukünftig könnte damit ein hoher Anteil der Fahrleistung rein batterieelektrisch zurückgelegt werden (in den folgenden Vergleichen 75 %), da die meisten Fahrten im Alltag Kurzfahrten sind. Für den nicht elektrischen Fahrbetrieb kämen die Flüssigkraftstoffe BtL und PtL als postfossile Optionen in Frage.<sup>10</sup> Da ihr Fahrleistungsanteil nur bei 25 % läge, wären die Mengenrestriktionen für BtL als Biokraftstoffe der 2. Generation kein grundlegendes Hindernis. In den folgenden Betrachtungen werden daher sowohl BtL als auch PtL als Energiequelle für den Verbrennungsmotor des Plug-In-Hybrid-Pkw betrachtet.

## Treibhausgasemissionen

Die Auswertungen der spezifischen klimarelevanten Emissionen pro Fahrzeug-Kilometer (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente) zeigen, dass im Jahr 2050 Treibhausgasminderungen von 65 bis 75 % möglich sind (bezogen auf einen Mittelklasse-Pkw der Golf-Klasse, siehe Abbildung 16).

Die höchste Minderung bringt dabei der Einsatz von rein batterieelektrischen Fahrzeugen. Allerdings fällt ihr Emissionsvorteil gegenüber anderen Optionen geringer aus als gemeinhin erwartet. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass die niedrigen Emissionen auf der Kraftstoffseite nahezu vollständig durch die Emissionen aus der Fahrzeugherstellung kompensiert werden. Die Gegenüberstellung der Optionen zeigt weiterhin, dass Plug-In-Hybride – unabhängig davon, ob sie mit BtL oder PtL betrieben werden – bei den Treibhausgasemissionen dem reinen Elektroauto kaum nachstehen. Hier werden die höheren Emissionen aus der Kraftstoffgewin-

---

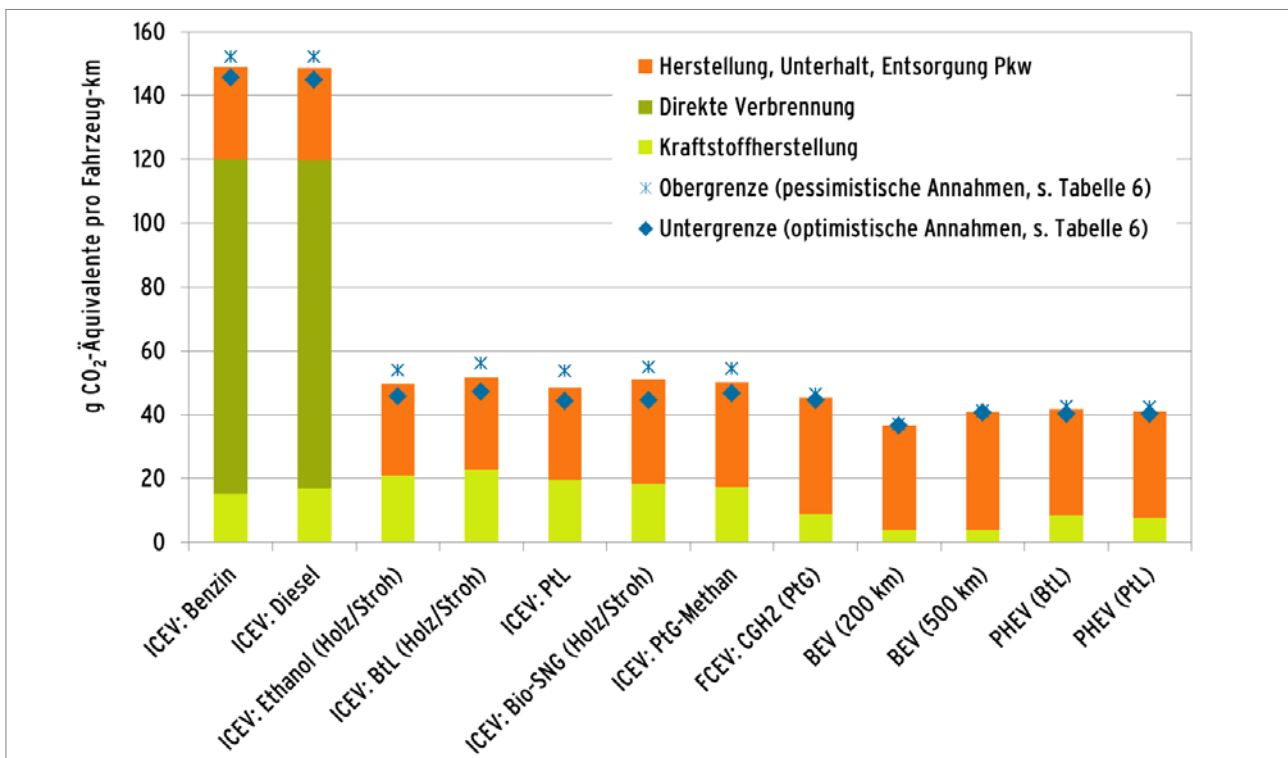
<sup>9</sup> Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass in dieser Studie unter Plug-in-Hybride auch Elektrofahrzeuge mit Range-Extender subsummiert werden.

<sup>10</sup> Prinzipiell kämen auch gasförmige Kraftstoffe in Frage. Bei der Speicherung des Kraftstoffs im Fahrzeug würde aber ein höherer Platzbedarf im Vergleich zu Flüssigkraftstoffen benötigt. Dieser zusätzliche Platzbedarf steht bei Hybridantrieben aber nur bedingt zur Verfügung, weshalb es zielführender ist, Flüssigkraftstoffe als Zweitkraftstoff einzusetzen.

nung durch die geringeren Emissionen der Fahrzeugherstellung ausgeglichen. Plug-In-Hybride sind daher eine echte Alternative zum reinen Elektroauto für alle Nutzer, die nicht mit einer Reichweite von 200 km auskommen.

Auch wenn Unterschiede zwischen den postfossilen Optionen deutlich werden – sie sind im Vergleich eher gering. Unter den stromgenerierten Kraftstoffen schneidet Wasserstoff als Energieträger für Brennstoffzellenfahrzeuge geringfügig günstigster ab als PtG-Methan und PtL. Biokraftstoffe der 2. Generation (BtL, Bio-SNG) haben gegenüber den stromgenerierten Kraftstoffen PtG-Methan und PtL keinen Klimavorteil. Zudem haben die Biokraftstoffe den Nachteil, dass sie ein kleines Mengenpotential haben und daher keine alleinige Alternative darstellen.

Abbildung 16: Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung eines Mittelklasse-Pkw im Jahr 2050



[eigene Darstellung]

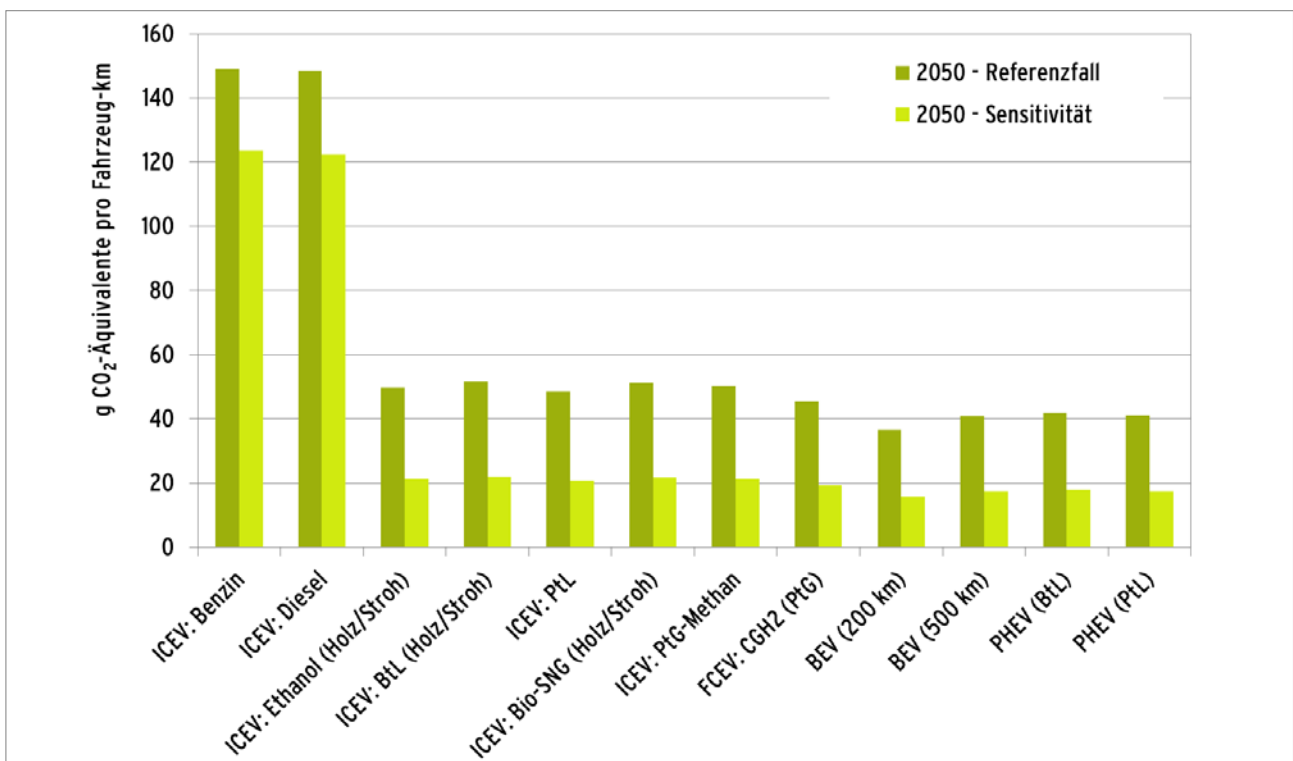
Ändern sich die Annahmen für die Herstellung der Kraftstoffe im Jahr 2050, ändern sich auch die Treibhausgasemissionen für die untersuchten Optionen (Unter- und Obergrenze der ausgewiesenen Emissionen in Abbildung 16). Allerdings wirkt sich das nicht wesentlich auf die Gesamtbewertung aus. Werden bei strombasierten Kraftstoffen wie PtL und PtG-Methan sowohl in Bezug auf den Wirkungsgrad der Elektrolyse als auch in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Abtrennung die pessimistischen Werte zugrunde gelegt (siehe Tabelle 6 in Kapitel 3.4), resultieren daraus zwar signifikant höhere Emissionen; im Vergleich mit Diesel und Benzin aber läge die Treibhausgasminderung immer noch bei rund der Hälfte. Im Vergleich zur direkten Stromnutzung in Elektrofahrzeugen oder Plug-in-Hybriden hätten diese Optionen dann allerdings im Jahr 2050 klar höhere Emissionen. Dies gilt aber in gleichem Masse auch für die Biokraftstoffe der 2. Generation.

### Sensitivitätsbetrachtung Treibhausgasemissionen

Wie in Kapitel 3 und einleitend ausgeführt, geht diese Untersuchung davon aus, dass weltweit durch Minderung der Emissionen die Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur auf 4 Grad begrenzt wird. Die produktionsbedingten Emissionen aus Herstellung von Kraftstoffen und Fahrzeugen sinken in diesem Fall um rund 40 % gegenüber 2010 [IEA 2012]. Welche Auswirkungen es auf den Vergleich der verschiedenen Energieversorgungsoptionen hat, wenn der globale Temperaturanstieg auf 2 Grad begrenzt werden könnte, zeigt Abbildung 17. In dieser Sensitivätsberechnung wird angenommen, dass die weltweiten produktionsbedingten Emissionen um rund 75 % gegenüber 2010 sinken [IEA 2012].

In diesem Fall ergeben sich für das Jahr 2050 Emissionsminderungen gegenüber Diesel und Benzin im Bereich von 83 bis 88 %. Die Energieversorgungsoptionen mit Nutzung von strombasierten Kraftstoffen unterscheiden sich dann kaum noch von der direkten Nutzung von regenerativem Strom in batterieelektrischen Pkw. In anderen Worten: Die postfossilen Alternativen für den Pkw liegen dann so nahe beieinander, dass keine der Optionen herausragt – vorausgesetzt, weltweit werden die Treibhausgasemissionen dramatisch gegenüber heute entsprechend dem 2-Grad-Szenario gesenkt [IEA 2012].

Abbildung 17: Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen eines Mittelklasse-Pkw im Jahr 2050: Referenzfall und Sensitivität



[eigene Darstellung]

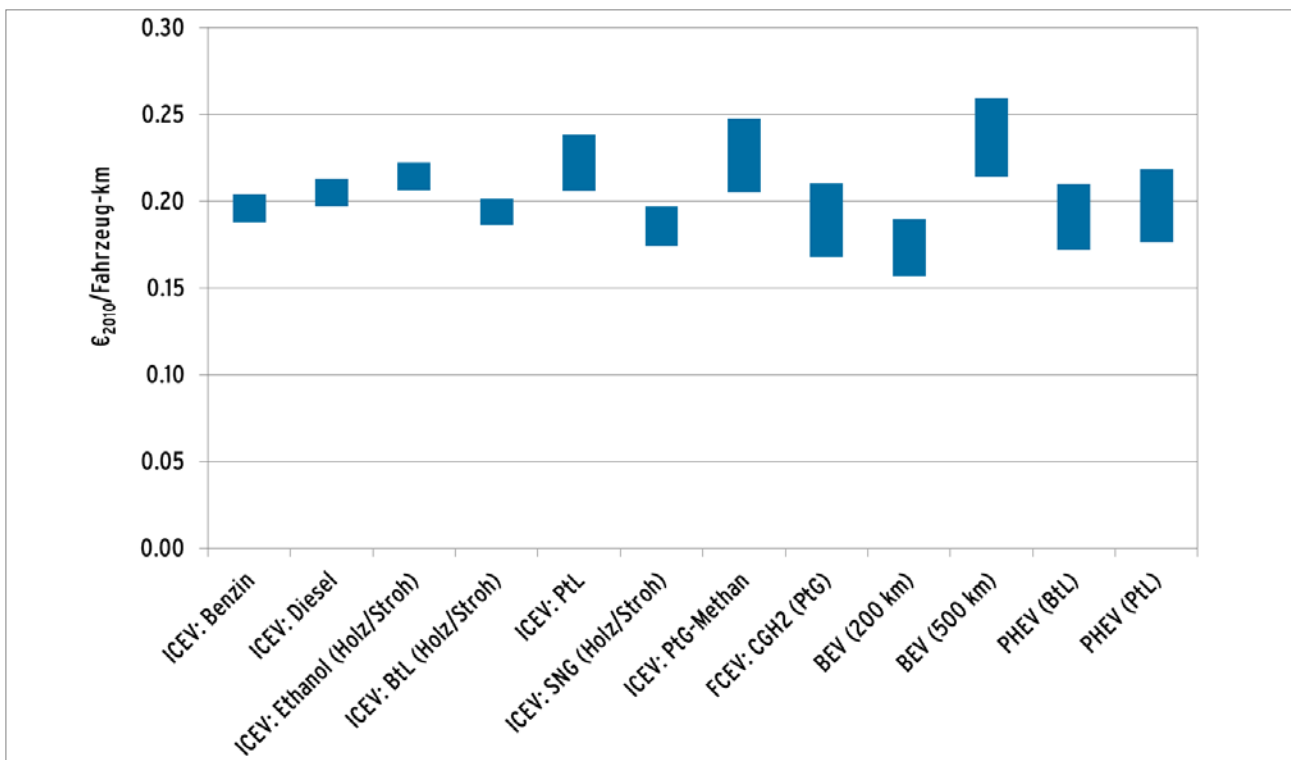
### Gesamtkosten

Die jährlichen Kosten für die Fahrzeuganschaffung (Annahmen: Lebensdauer 12 Jahre, Jahresfahrleistung 15.000 km) und für Kraftstoffe bzw. Strom zeigt Abbildung 18. Alle Angaben beziehen sich auf einen Fahrzeugkilometer, zurückgelegt mit einem Mittelklasse-Pkw (Golf-Klasse) und ohne Berücksichtigung von Steuern. Die dazugehörigen Festlegungen sind in Kapitel 3 beschrieben.

Von allen betrachteten Pkw-Optionen – unter Einbezug der konventionellen Antriebe mit Benzin und Diesel – schneidet der rein batterieelektrische Pkw mit einer Reichweite von 200 km am kostengünstigsten ab (siehe Abbildung 18). Bei einer Reichweite von mindestens 500 km liegen seine Kosten allerdings wegen der teuren Batterie deutlich über denen der anderen postfossilen Optionen. Die Gegenüberstellung zeigt auch, dass der Plug-In-Hybrid einen optimalen Kompromiss darstellt. Seine Mehrkosten, selbst bei Verwendung von PtL, fallen gegenüber dem Elektroauto mit einer Reichweite von 200 km kaum ins Gewicht; zugleich hat er keine Reichweitenbeschränkung.

Ähnlich günstige spezifische Kosten weisen Bio-SNG und BtL eingesetzt in konventionellen Verbrennungsmotoren und PtG-Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge ab. Demgegenüber schneiden PtL und PtG-Methan bezogen auf die spezifischen Kosten tendenziell ungünstiger ab: Zwar fallen für die Fahrzeuganschaffung keine Zusatzkosten an, dafür aber liegen die Kraftstoffkosten höher.

Abbildung 18: Bandbreite der spezifischen Kosten für Fahrzeuganschaffung und Energie für einen Mittelklasse-Pkw im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010)



[eigene Darstellung]

### Zwischenfazit

Sowohl die Betrachtung der Treibhausgasemissionen als auch der Kosten zeigt Vorteile für rein batterieelektrische Pkw – solange deren maximale Reichweite auf 200 km beschränkt werden kann. Ob diese Beschränkung akzeptabel ist, hängt auch davon ab, ob künftig Schnellladetechniken auch für Pkw auf breiter Basis verfügbar sind. Ein guter Kompromiss sind Plug-In-Hybride. Mit kombinierten Reichweiten von 500 km und mehr erfüllen sie heutige Anforderungen an ein Fahrzeug, können gleichzeitig aber im täglichen Betrieb nahezu 75 % der Strecken elektrisch zurücklegen. Zudem ist es unerheblich, ob der Verbrennungsmotor im Hybrid mit BtL oder PtL betrieben wird – aufgrund der begrenzten Fahrleistungsanteile hat dies kaum Einfluss auf die Gesamtbewertung.

An zweiter Stelle rangieren Brennstoffzellenfahrzeuge mit PtG-Wasserstoff. Diese Option liegt in Bezug auf Treibhausgasemissionen und Kosten knapp hinter reinen Elektroautos und Plug-In-Hybriden. Sie haben aber auch Nachteile: Derzeit existiert keine Wasserstoffinfrastruktur.

Der Einsatz von PtL und PtG für den Pkw-Verkehr ist verlockend, denn damit können bewährte Fahrzeugtechnologien weiterhin zum Einsatz kommen. Bei PtL wäre auch die bestehende Tankstelleninfrastruktur weiter nutzbar. Im Vergleich der Emissionen und Kosten schneiden beide Optionen aber tendenziell ungünstiger ab als andere postfossile Energieversorgungsoptionen. Biokraftstoffe der 2. Generation weisen zwar vergleichbare spezifische Treibhausgasemissionen pro Fahrzeug-km auf, aber sie würden zu geringeren Gesamtkosten führen. Allerdings sind Biokraftstoffe der 2. Generation, hergestellt aus Restholz und -stroh, im globalen Maßstab nur begrenzt verfügbar.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die Unterschiede zwischen den postfossilen Energieversorgungsvarianten für den Pkw-Verkehr sowohl in Hinblick auf Treibhausgase als auch auf Kosten pro Fahrzeugkilometer teilweise recht gering ausfallen. Die Sensitivitätsbetrachtung für Treibhausgasemissionen zeigt zudem, dass sich die Emissionen aus der Herstellung von Fahrzeugen und Kraftstoffen umso mehr angleichen, je ambitionierter Klimaschutzziele weltweit umgesetzt werden. Damit treten Kosten und andere Aspekte in den Vordergrund und müssen bei einer Gesamtbeurteilung der Optionen für den Pkw-Verkehr entsprechend berücksichtigt werden (siehe Kapitel 6).

## 5.2 Lkw

### Die Optionen im Überblick

Die postfossilen Energieversorgungsoptionen unterscheiden sich erheblich, ob Lkw im Nah- oder im Fernverkehr eingesetzt werden (siehe Abbildung 19). Lkw im Nahverkehr dienen meist zur Abholung oder Verteilung von Waren und haben in der Regel ein zulässiges Gesamtgewicht (zGG) von bis zu 12 t. Sie legen Tagesdistanzen von durchschnittlich rund 200 km zurück, weshalb neben Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellenantrieb auch rein batterieelektrische Fahrzeuge einsetzbar sind. Mit den für 2050 angenommenen Energiedichten der Batterien und Energieverbräuchen eines 10-t-Lkw wäre eine Batterie von rund 180 kWh und einem Gewicht von 500 kg notwendig (siehe Kapitel 2). Im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor tritt bei der elektrischen Variante ein Nutzlastverlust von rund 0,2 t auf – ein durchaus vertretbarer Faktor.

Im Fernverkehr dagegen legen Lkw tägliche Strecken von bis zu 1.000 km zurück. Selbst im Jahr 2050 sind die Speicherdichten der Batterien nicht ausreichend, um Lkw im Fernverkehr rein batterieelektrisch zu betreiben. Eine entsprechende Batterie müsste dann 5 bis 6 t wiegen und würde sowohl Nutzlast als auch wertvollen Stauraum belegen.

Alternativ wird daher seit einigen Jahren die Ausstattung der wichtigsten Autobahnen mit Oberleitungen diskutiert [SRU 2012]. Der Lkw würde ähnlich wie heutige O-Busse elektrisch via Oberleitung betrieben. Um allerdings Kunden oder Speditionen abseits der elektrifizierten Strecken beliefern zu können, ist zugleich ein oberleitungsfreier Betrieb notwendig. Hier sind zwei Konzepte denkbar. Zum einen kann der Lkw mit einer Batterie ausgestattet werden (z. B. 300 kWh), mit der er bis zu 150 km oberleitungsfrei elektrisch fahren kann. Alternativ könnte der Oberleitungs-Lkw (kurz O-Lkw) auch statt mit einer Batterie mit einem kleineren Verbrennungsmotor ausgestattet sein, der direkt zum Antrieb dient. Im Folgenden werden beide Varianten betrachtet.

Während im Nahverkehr die Speicherung von Gasen wie Bio-SNG, PtG-Methan und PtG-Wasserstoff in komprimierter Form ausreichend ist, müssen für den Fernverkehr die Gase flüssig gespeichert werden. Diese Verflüssigung benötigt mehr Energie und die Gasverluste in Tankstellen und Fahrzeugen sind höher. Auch diese Unterschiede werden im Folgenden berücksichtigt.

Neben batterieelektrischen und O-Lkw und dem Einsatz von Bio-SNG, PtG-Methan und PtG-Wasserstoff in Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen wird auch der Einsatz von flüssigen postfossilen Kraftstoffen im Nah- und Fernverkehr betrachtet. Zur Verfügung stehen wie beim Pkw-Verkehr BtL und PtL. Für den Nahverkehr kommt zusätzlich ein Plug-In-Hybrid in Betracht, der neben Strom BtL oder PtL nutzt.

Abbildung 19: Postfossile Energieversorgungsoptionen für Lkw

		Verbrennungsmotor (ICEV = Internal Combustion Engine Vehicles)		Elektromotor (EV= Electric Vehicle)			
		ICEV-Diesel <sup>1)</sup>	ICEV-Gas <sup>1)</sup>	Brennstoffzelle (FCEV = Fuel Cell Electric vehicle)	Batterie-elektrisch (BEV = Battery electric vehicle)	Plug-in Hybrid (PHEV = Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	Oberleitung
Nahverkehrs-Lkw (7.5-12 t zGG)	BtL (Holz/Stroh)	○				○	
	PtL	●				●	
	Bio-SNG (Holz/Stroh) - komprimiert		○				
	PtG-Methan - komprimiert		●				
	PtG-Wasserstoff - komprimiert			●			
	Regenerativer Strom				●	●	
Fernverkehrs-Lkw (40 t zGG)	BtL (Holz/Stroh)	○					○
	PtL	●					●
	Bio-SNG (Holz/Stroh) - verflüssigt		○				
	PtG-Methan - verflüssigt		●				
	PtG-Wasserstoff - verflüssigt			●			
	Regenerativer Strom						●

● = Ausreichende Mengenpotentiale; ○ = nur eingeschränkte Mengenpotentiale

<sup>1)</sup> Inkl. Hybridisierung.

[eigene Darstellung]

### Treibhausgasemissionen

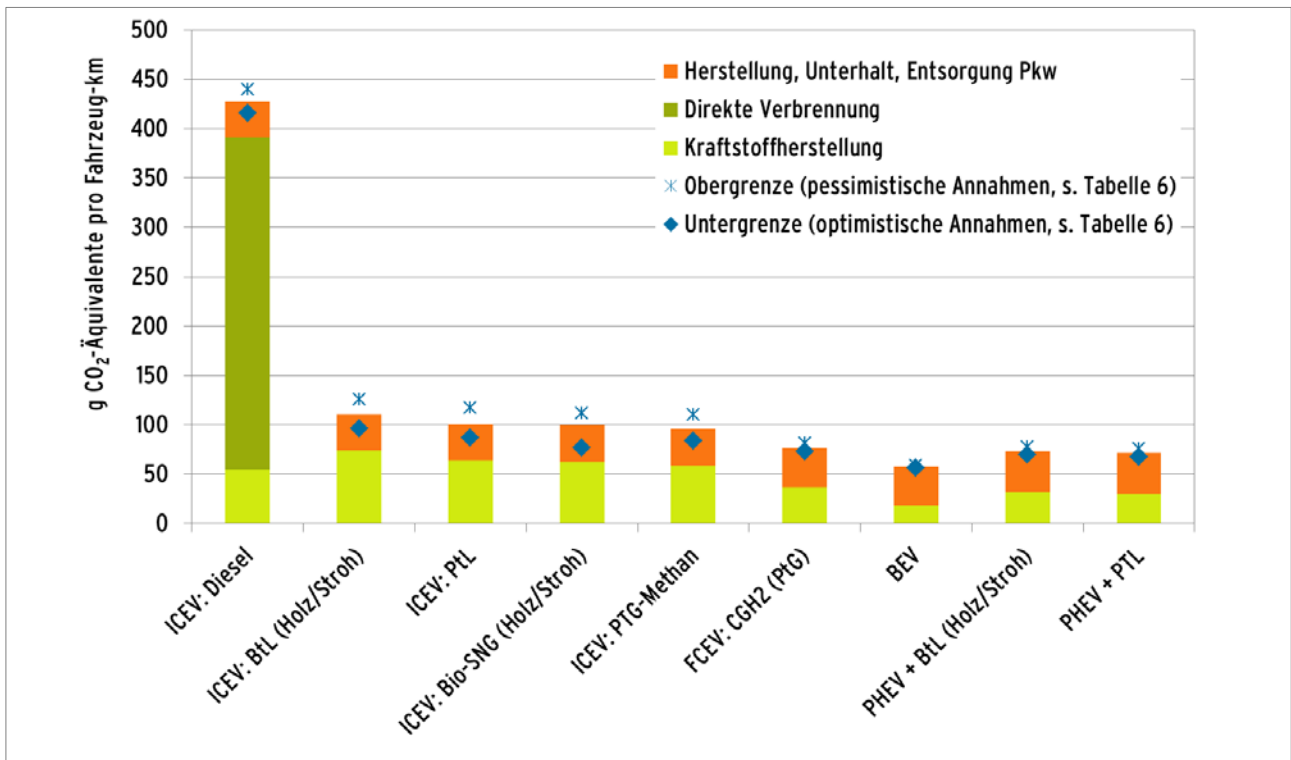
Abbildung 20 zeigt die spezifischen Treibhausgasemissionen (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente) für einen Nahverkehrs-Lkw mit einem zGG von 10 t. Ähnlich wie beim Pkw sind die Treibhausgasemissionen der postfossilen Energieversorgungsoptionen erheblich geringer als die eines vergleichbaren Diesel-Lkw (rund 75 % bis 85 %). Analog zum Pkw-Verkehr schneidet das rein batterieelektrische Fahrzeug bei den Emissionen günstiger ab als alle anderen Varianten. Der Unterschied fällt sogar deutlicher aus als beim Pkw, was der höheren jährlichen Fahrleistung der Lkw (56.000 km) bei ähnlicher Lebensdauer geschuldet ist. Emissionen aus der Fahrzeugherstellung sind damit pro Fahrzeug-km niedriger, die Emissionsvorteile auf der Kraftstoffseite der Elektrofahrzeuge kommen stärker zum Tragen.

Die Gegenüberstellung der Treibhausgasemissionen zeigt zudem: Für Nahverkehrs-Lkw ist der Plug-In-Hybrid eine Alternative zum reinen Elektrofahrzeug. Die höchsten Emissionen der postfossilen Energieversorgungsoptionen ergeben sich hingegen, wenn die strombasierten Kraft-

stoffe PtL oder PtG-Methan bzw. die Biokraftstoffe der 2. Generation wie BtL und Bio-SNG im Verbrennungsmotor eingesetzt werden.

In der Abbildung 20 sind analog zum Pkw-Verkehr neben den mittleren Emissionen auch die Unter- und Obergrenzen der Emissionen angegeben, die sich durch Variation der Annahmen der Kraftstoffherstellung ergeben. Insbesondere die oberen Werte zeigen, dass der Vergleich noch deutlicher zu Gunsten der direkten Stromnutzung ausfallen kann.

Abbildung 20: Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung für einen 10-t-Lkw im Nahverkehr im Jahr 2050



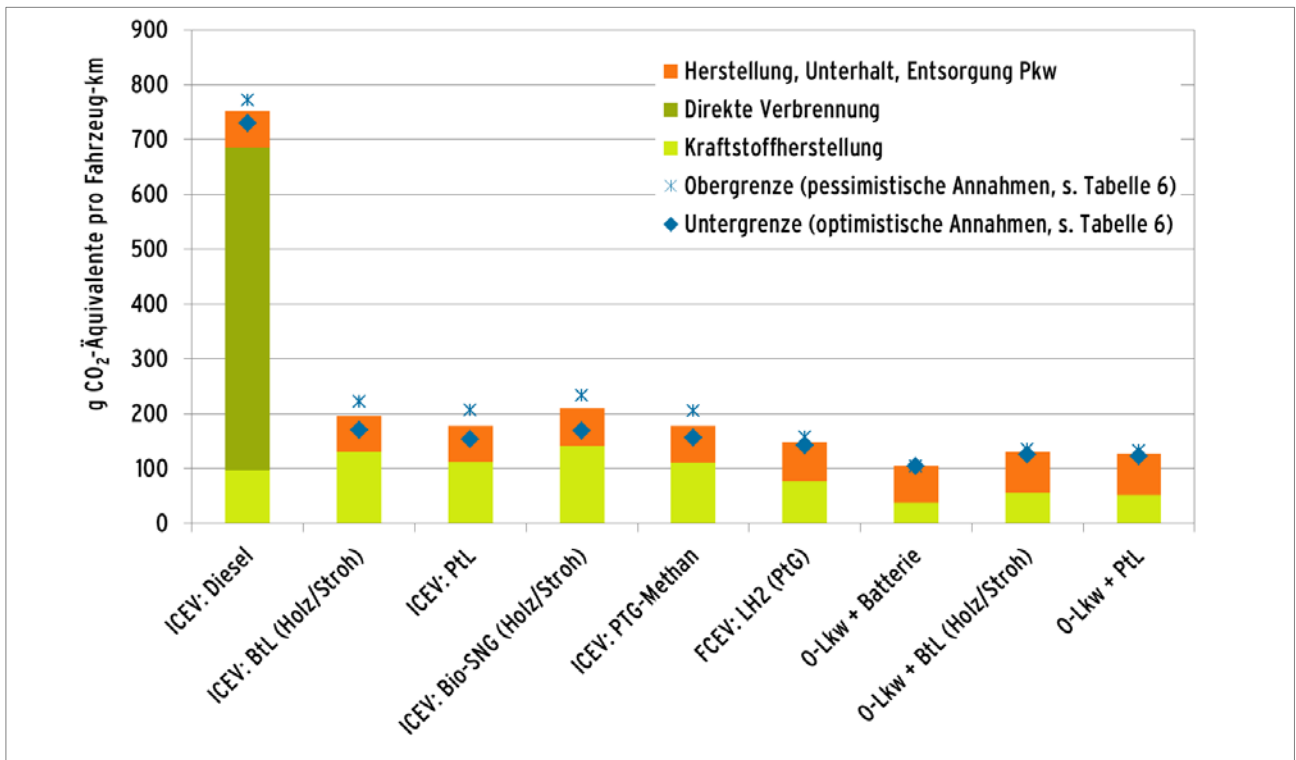
[eigene Darstellung]

Abbildung 21 zeigt die spezifischen Treibhausgasemissionen für einen Fernverkehrs-Lkw (40 t zGG). Prinzipiell ergibt sich das gleiche Bild wie beim Nahverkehrs-Lkw. Die direkte Nutzung von Strom – hier aus der Oberleitung – schneidet in Bezug auf die Treibhausgasemissionen am günstigsten ab. Auch hier sind aufgrund der hohen Fahrleistung (rund 120.000 km pro Jahr) die Emissionen der Fahrzeugherstellung weniger dominant als beim Pkw-Verkehr.

Ein oberleitungsgebundener Lkw ist allerdings nur möglich, wenn er in einem europäischen Rahmen umgesetzt wird und somit alle oder zumindest einige wichtige, benachbarte europäischen Länder am System teilnehmen (siehe auch Kapitel 5). Dies ist nicht zwangsläufig gegeben. Daher ist gerade beim Fernverkehrs-Lkw entscheidend, wie die Emissionen der anderen Optionen ausfallen. Der Vergleich zeigt, dass die Alternativen recht nahe beieinander liegen – mit kleinen Nachteilen für Biokraftstoffe der 2. Generation. Leichte Vorteile haben Brennstoffzellenfahrzeuge mit PtG-Wasserstoff. Allerdings lässt sich allein auf Basis der Treibhausgasemissionen keine klare Empfehlung aussprechen, ob Brennstoffzellenfahrzeuge für den Fall, dass oberleitungsgebundene Lkw nicht realisierbar sind, zu empfehlen sind. Hierzu müssen auch die in Kapitel 6 aufgeführten Aspekte mit einbezogen werden.



Abbildung 21: Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung für einen 40-t-Lkw im Fernverkehr im Jahr 2050



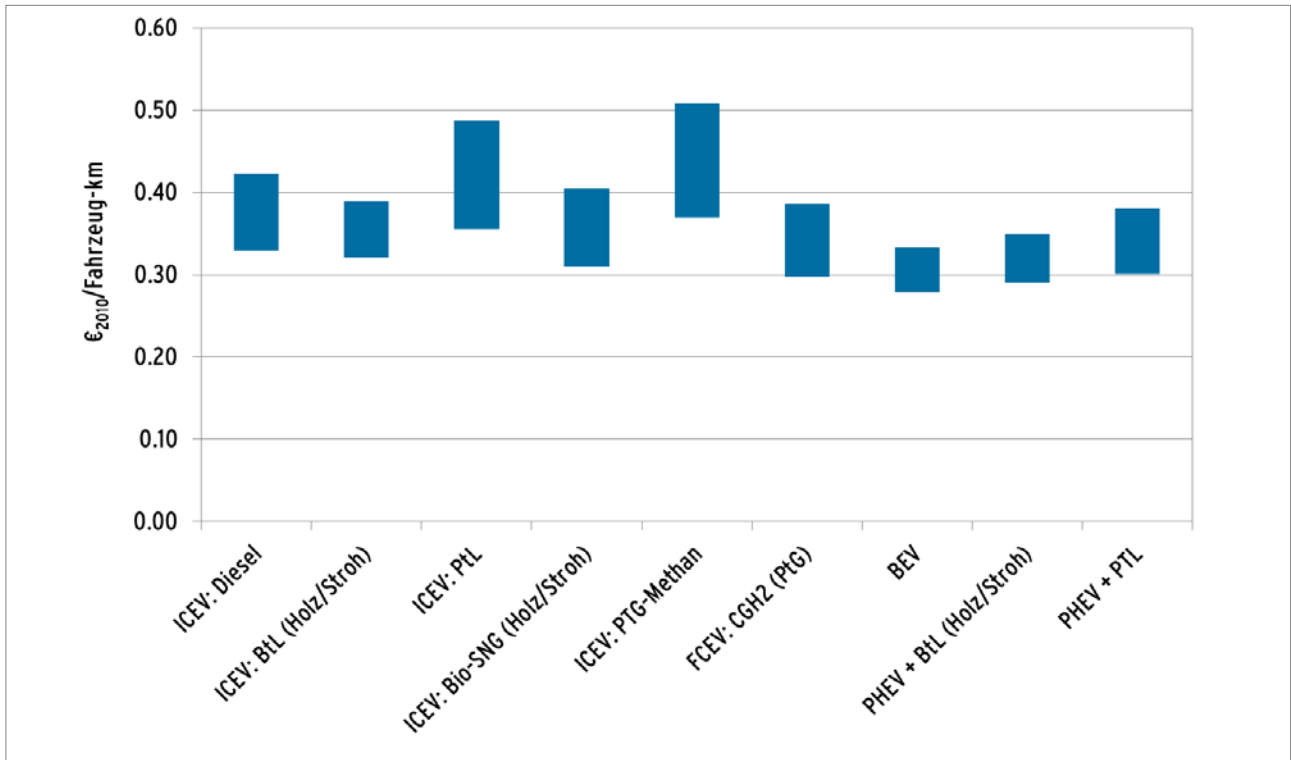
[eigene Darstellung]

## Kosten

Die spezifischen Kosten pro Fahrzeug-Kilometer im Jahr 2050 sind für einen Nahverkehrs-Lkw (zGG 10 t) in Abbildung 22 dargestellt. Wie beim Pkw sind nur jährliche Kosten für Fahrzeug und Kraftstoff bzw. Strom berücksichtigt (siehe hierzu auch Kapitel 3). Auch bezüglich der Kosten haben batterieelektrische Lkw und Plug-In-Hybrid-Lkw Vorteile gegenüber den anderen Energieversorgungsoptionen. Erfreulich an diesem Vergleich ist, dass postfossile Energieversorgungsoptionen im Jahr 2050 verfügbar sein werden, die kostenseitig mit konventionellen Diesel-Lkw konkurrieren können. Lediglich PtL und PtG-Methan dürften im Jahr 2050 höhere Kosten verursachen als der Dieselbetrieb.

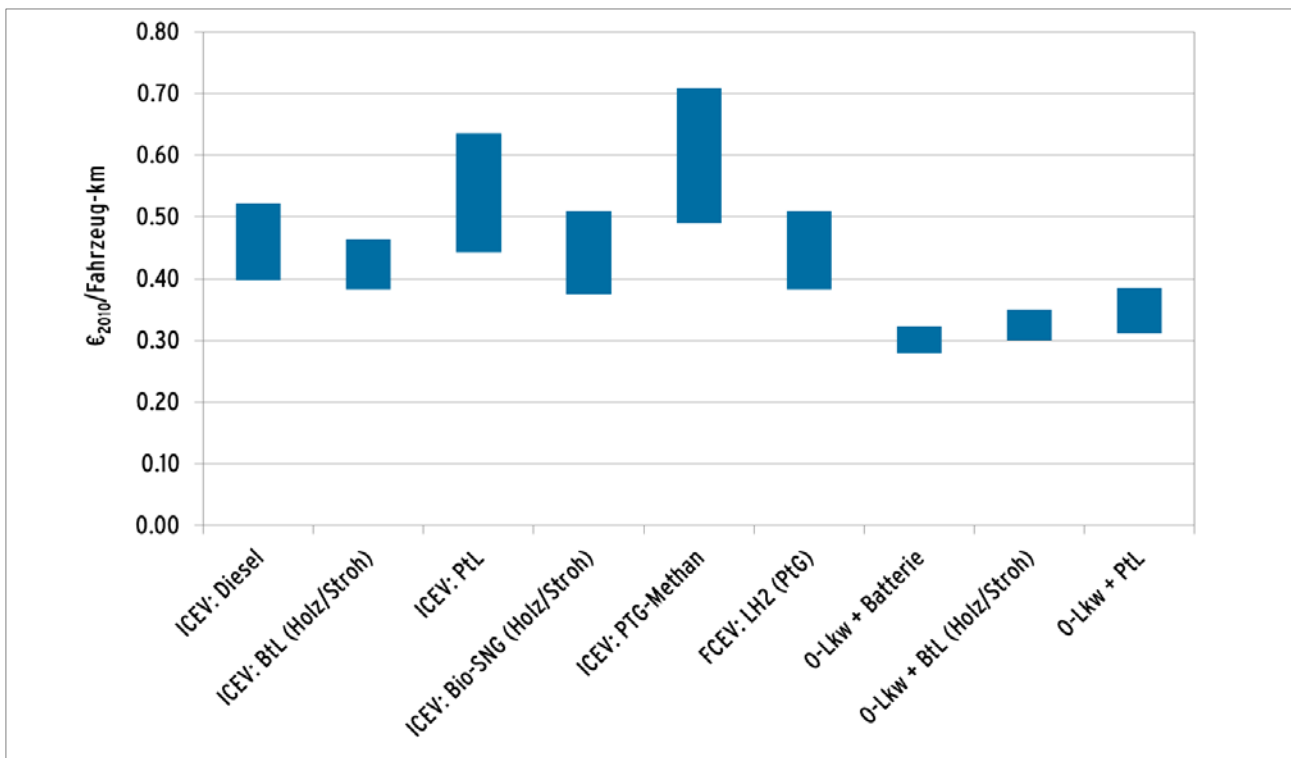
Abbildung 23 zeigt den Kostenvergleich für einen Fernverkehrs-Lkw mit 40 t zGG. Das Bild fällt analog zum Nahverkehrs-Lkw aus. Der oberleitungsgebundene Lkw schneidet kostenseitig am günstigsten ab. Allerdings ist zu beachten, dass die Ausstattung der Autobahnen mit Oberleitungen mit zusätzlichen Kosten verbunden wäre, die in dieser Kostengegenüberstellung nicht berücksichtigt sind (siehe Kapitel 6.2). Die Nutzung von PtG-Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen sowie die Nutzung von flüssigen und gasförmigen Biokraftstoffen in Verbrennungsmotoren werden im Jahr 2050 vergleichbare Kosten wie die Diesel-Lkw verursachen. Lediglich die stromgenerierten Kraftstoffe PtG-Methan und PtL führen wie beim Nahverkehrs-Lkw zu leicht höheren spezifischen Kosten pro Fahrzeug-km.

Abbildung 22: Bandbreite der spezifischen Kosten für Fahrzeuganschaffung und Energie für einen 10-t-Lkw im Nahverkehr im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010)



[eigene Darstellung]

Abbildung 23: Bandbreite der spezifischen Kosten für Fahrzeuganschaffung und Energie für einen 40-t-Lkw im Fernverkehr im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010, 0-Lkw ohne Kosten der Oberleitungsinfrastruktur)



[eigene Darstellung]

## Zwischenfazit

Beim Lkw muss zwischen Nah- und Fernverkehr unterschieden werden. Für Lkw im Nahverkehr mit Tagesdistanzen von durchschnittlich nur 200 km sind neben Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellenantrieb auch rein batterieelektrische Fahrzeuge technisch realisierbar. Für den Fernverkehr gilt das nicht. Selbst im Jahr 2050 sind die Speicherdichten der Batterien nicht ausreichend, um weite Strecken rein batterieelektrisch zurückzulegen. Für den Fernverkehr ist die Ausstattung von Autobahnen mit Oberleitungen eine mögliche Variante. Dabei könnte das Fahrzeug mit einer Batterie ausgestattet werden, die eine Reichweite von rund 150 km hat. Alternativ wäre ein kleinerer Verbrennungsmotor denkbar, um ebenfalls Strecken ohne Oberleitung zu bewältigen. Während im Nahverkehr die Speicherung von Gasen in komprimierter Form ausreichend ist, müssen sie für den Fernverkehr verflüssigt werden, was Energieverbrauch und Gasverluste erhöht.

Die Emissionen der postfossilen Energieversorgungsoptionen sind – unabhängig ob Nahverkehrs- oder Fernverkehrs-Lkw – erheblich geringer als die konventioneller Diesel-Lkw. Analog zum Pkw-Verkehr schneidet im Nahverkehr sowohl in Bezug auf Treibhausgasemissionen als auch auf Kosten der rein batterieelektrische Lkw günstiger ab als alle anderen Varianten. Für den Nahverkehr sind zudem Plug-In-Hybride eine Alternative. Beim Fernverkehr schneidet die direkte Nutzung von Strom aus der Oberleitung in Bezug auf die Treibhausgasemissionen und Kosten am günstigsten ab. Ein oberleitungsgebundener Lkw ist allerdings nur möglich, wenn alle europäischen Länder dieses Konzept umsetzen. Zudem fallen Zusatzkosten für die Ausstattung der Autobahnen mit Oberleitungen an, die in diesen Kostenvergleichen noch nicht berücksichtigt sind (siehe Kapitel 6.2).

Der Vergleich der anderen Optionen beim Fernverkehr zeigt, dass diese Alternativen recht nahe beieinander liegen – mit kleinen Kostennachteilen der strombasierten Kraftstoffe PtL und PtG-Methan. Im Fernverkehr schneidet der Einsatz von PtG-Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen sowohl hinsichtlich Treibhausgasemissionen als auch Kosten günstiger ab als andere strombasierte Kraftstoffe oder Biokraftstoffe der 2. Generation.

Auch bezüglich der Kosten haben batterieelektrische Lkw und Plug-In-Hybride im Nahverkehr Vorteile gegenüber den anderen Energieversorgungsoptionen. Lediglich Gas-Lkw, die Bio-SNG einsetzen, schneiden gleichwertig oder sogar etwas günstiger ab. Ein erfreuliches Ergebnis ist, dass es postfossile Optionen gibt, die zu geringeren Kosten führen als konventionelle Diesel-Lkw. Im Fernverkehr hat der oberleitungsgebundene Lkw ohne Berücksichtigung der Kosten für Bau und Unterhalt von Oberleitungen zusammen mit dem Bio-SNG-Lkw die geringsten Kosten.

## 5.3 Linienbus

### Die Optionen im Überblick

Heute sind Linienbusse überwiegend reine Dieselbusse. Einige Städte haben zwar auf Erd- oder Biogas als alternativen Kraftstoff umgestellt – dies ist aber eher die Ausnahme. Für Linienlängen von rund 250 bis 350 km ist komprimiertes Gas als Kraftstoff ausreichend. Auch im Jahr 2050 sind Busse mit Diesel- und Gasmotoren eine mögliche Option, durch Hybridisierung können sie zusätzlich Bremsenergie speichern und nutzen und werden auf diese Weise gegenüber heute deutlich verbrauchsoptimiert. Als postfossile Energieversorgungsoptionen für Busse ste-

hen daher konventionelle Antriebe mit den Flüssigkraftstoffen BtL und PtL sowie gasförmigem Bio-SNG und PtG-Methan zur Verfügung (siehe Abbildung 24).

Oberleitungsbusse (kurz O-Busse oder Trolleybusse) als spezielle Form der Elektromobilität sind auch für Busse möglich und wird außerhalb Deutschlands bereits in größerem Stile umgesetzt [INFRAS 2014]. Da für O-Busse aber zusätzliche Infrastrukturkosten für die Oberleitungen anfallen und diese durch die Fahrdrababhängigkeit in ihrer Einsatz-Flexibilität stark eingeschränkt sind, hat sich diese Technologie bisher in Deutschland nicht durchgesetzt – nur drei deutsche Städte nutzen diese Technologie [HC/Öko-Institut 2013]. O-Busse können künftig zusätzlich mit Li-Ionen-Akkus ausgestattet werden, so dass sie Teilstrecken oberleitungsfrei zurücklegen. In Eberswalde wird derzeit ein entsprechender Bus mit 30 km freier Fahrt getestet. Seine Batterie wird im Betrieb über die Oberleitung geladen, so dass der Akku deutlich kleiner ausfallen kann als bei rein batterieelektrischen Bussen [INFRAS 2014].

Abbildung 24: Postfossile Energieversorgungsoptionen für Linienbus

	Verbrennungsmotor (ICEV = Internal Combustion Engine Vehicles)		Elektromotor (EV= Electric Vehicle)			
	ICEV-Diesel <sup>1)</sup>	ICEV-Gas <sup>1)</sup>	Brennstoffzelle (FCEV = Fuel Cell Electric vehicle)	Batterie-elektrisch (BEV = Battery electric vehicle)	Plug-in Hybrid (PHEV = Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	Oberleitung
BtL (Holz/Stroh)	○				○	
PtL	●				●	
Bio-SNG (Holz/Stroh) - komprimiert		○				
PtG-Methan - komprimiert		●				
PtG-Wasserstoff - komprimiert			●			
Regenerativer Strom				●	●	●

● = Ausreichende Mengenpotentiale; ○ = nur eingeschränkte Mengenpotentiale

<sup>1)</sup> Inkl. Hybridisierung.

[eigene Darstellung]

Aber auch rein batterieelektrische Linienbusse sind möglich. In China sind bereits heute rund 1.000 solcher Fahrzeuge unterwegs, einige davon werden in Europa zum Kauf angeboten. Auch europäische Anbieter (z. B. Solaris, SOR) haben entsprechende Fahrzeuge im Angebot [INFRAS 2014]. Der chinesische Hersteller BYD bietet beispielsweise seinen Elektro-Standardbus (12 m) in Europa mit einer Reichweite von 150 bis 200 km an. Der Bus benötigt hierfür eine Batterie mit einer Kapazität von 324 kWh und einem Gewicht von rund 3 t. Die Batterie reduziert die Anzahl der Sitzplätze im Bus von 85 auf 60. Nachteil dieser Fahrzeuge ist zudem, dass ihr Akku nur über Nacht geladen werden kann (als Standardlader bezeichnet). Für Gelenkbusse müsste bei ausschließlicher Nachtladung die Batterie noch größer sein, weshalb derzeit nur ein Hersteller (Solaris) ein solches Fahrzeug in Planung hat [INFRAS 2014]. Auch so genannte Supercaps (Doppelschicht-Kondensatoren) können Strom speichern. Aufgrund ihrer geringen Kapazität reicht die Strommenge für einen rein elektrischen Busbetrieb aber nicht aus. Supercaps werden in der Regel bei Hybrid- und O-Bussen genutzt, um Bremsenergie aufzunehmen. Durch die Erhöhung der Speicherdichten aber werden künftig batterieelektrische Busse mit einer Reichweite von 200 bis 250 km und einem mit heute vergleichbaren Sitzplatzangebot verfügbar sein – sie sind daher eine postfossile Energieversorgungsoption für das Jahr 2050.

Busse folgen festgelegten Linien. Eine Zwischenladung der Batterie kann daher an Endhaltestellen, aber auch unterwegs an Haltestellen erfolgen. An den Endhaltestellen darf der Lade-

prozess problemlos mehrere Minuten dauern; an den Haltestellen dagegen sind nur (sekunden-)kurze Ladevorgänge möglich. Der Bus muss daher während der Tour an mehreren Haltestellen laden. Vorteil dieser Zwischenladung ist, dass Reichweitenbeschränkungen entfallen. Zudem kann die Batterie deutlich kleiner ausfallen (60 statt 450 kWh für einen Standardbus im Jahr 2050), was die Kosten der Fahrzeuge senkt. Die Schnellladung ermöglicht dem Busverkehr bereits mittelfristig einen rein batterieelektrischen Fahrbetrieb.

Zusätzlich sind aber für Schnellladeprozesse spezielle Li-Ionen-Batterien notwendig, die derzeit noch um den Faktor fünf teurer sind als herkömmliche Batterien zur Übernacht-Ladung [INFRAS 2014]. Zudem ist eine aufwändigere Ladeinfrastruktur nötig. Derzeit werden hierfür drei verschiedene Systeme getestet:

- **Konduktives Laden:** Hierbei handelt es sich um ein leitungsgebundenes Laden der Elektrobusse mit Hilfe einer Kabel- und Steckerverbindung. Bei Bussen werden derzeit Systeme erprobt, bei denen die Verbindung über das Dach oder von unten erfolgt [Rohlfis 2012; Knotte 2013].
- **Laden über Oberleitung (Pantograph):** Das System ist eine Spezialform des konduktiven Ladens; die vorhandene Oberleitung von Straßenbahnen wird zum Laden genutzt [Siemens 2013].
- **Induktives Laden:** Beim induktiven Laden wird unter Nutzung elektromagnetischer Felder die Batterie kontaktlos geladen. Allerdings treten hier die höchsten Übertragungsverluste (rund 10 %) auf [Bombardier 2013].

Welches System sich bis 2050 durchsetzt, ist offen. Induktives Laden hat aus heutiger Sicht höhere Infrastrukturkosten und eine geringere Energieeffizienz.

Um die Batterie im Bus möglichst klein halten zu können, ist neben einem rein batterieelektrischen Bus mit Schnellladung auch ein Plug-In-Hybrid-Bus möglich (siehe Abbildung 24). Dieser Bus bietet sich vor allem dann an, wenn Schnellladesysteme nicht umsetzbar sind. Dies ist beispielsweise außerhalb von Städten der Fall, wo sich Schnellladesysteme aufgrund der geringen Anzahl an Bussen pro Haltestelle schlicht nicht mehr rechnen. In dieser Studie wird auf Linienbusse im Stadtverkehr fokussiert, weshalb die Plug-in-Hybrid-Varianten nicht explizit untersucht werden. In Bezug auf Treibhausgasemissionen und Kosten dürften Plug-in-Hybride aber vergleichbar mit Batteriebussen, die Schnellladesysteme nutzen sein, sein – mit einem wichtigen Vorteil: Sie benötigen keine so aufwändige Ladeinfrastruktur.

Neben einem batterieelektrischen Bus, Plug-in-Hybrid oder O-Bus gibt es mit dem Brennstoffzellenbus (aktuell z. B. von Mercedes angeboten) eine weitere Möglichkeit des elektrischen Fahrbetriebs. Auch diese Option wurde in dieser Untersuchung mit betrachtet. Streng genommen ermöglicht diese Option hohe Reichweiten und bietet sich daher ebenfalls vor allem für den Überlandverkehr an.

Die folgenden Vergleiche der postfossilen Energieversorgungsoptionen beziehen sich auf Standardbusse (12 m) im Stadtverkehr. Grundsätzlich können die Ergebnisse aber auch auf Midi- und Gelenkbusse sowie auf Überlandverkehre übertragen werden.

### **Treibhausgasemissionen**

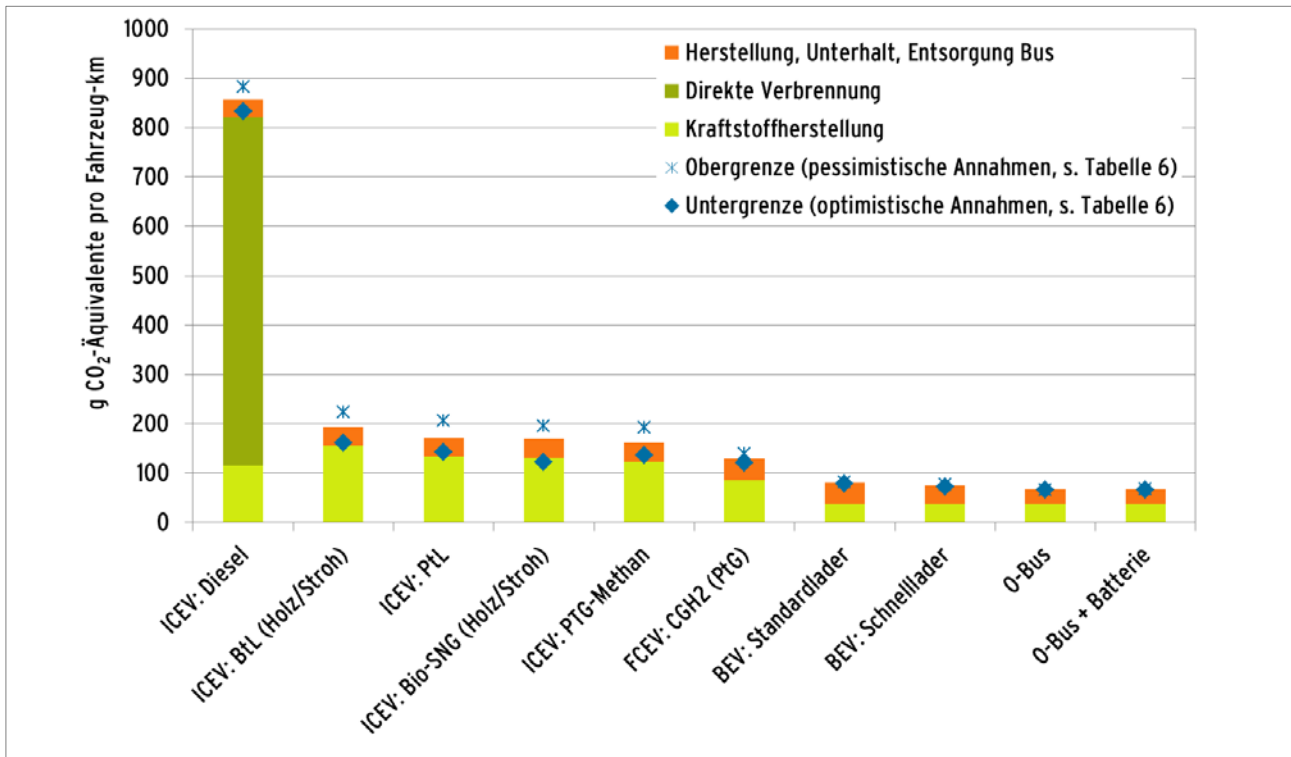
Die Resultate aus dem Emissionsvergleich sind bei Bussen noch eindeutiger als bei Pkw und Lkw (siehe Abbildung 25): Batterieelektrische Fahrzeuge und O-Busse haben deutlich geringere spezifische Treibhausgasemissionen pro Bus-km als alle anderen Optionen. Ursache dafür sind die geringen herstellungsbedingten Emissionen pro Bus-km aufgrund der hohen Fahrleistungen. Demgegenüber fallen die Emissionen der Kraftstoffe stärker ins Gewicht, da Busse vielfach

nur innerorts unterwegs sind – was zu relativ hohen Energieverbräuchen führt. Damit kommt der Vorteil von Elektroantrieben voll zum Tragen: Der spezifische Energieverbrauch ist geringer als der der anderen Varianten; zusätzlich entstehen bei der Herstellung von regenerativem Strom weniger Emissionen als bei anderen postfossilen Energieträgern.

Das Ergebnis zeigt auch, dass O-Busse geringere Emissionen haben als batterieelektrische Busse, die Unterschiede fallen allerdings gering aus. Auch unter den Elektro-Varianten sind die Abstände klein: Busse zur Schnellladung schneiden nur geringfügig besser ab als batterieelektrische, reine O-Busse leicht besser als O-Busse mit Batterie. Unberücksichtigt bleiben hierbei allerdings Treibhausgasemissionen aus Bau und Unterhalt der Oberleitung oder der Schnellladensysteme. Hierzu gibt es bisher keine verlässlichen Literaturangaben. Würden diese Emissionen mit einberechnet, dürften sich die Emissionen der O-Busse und die der batterieelektrischen Busse angleichen – der klare Vorteil gegenüber den anderen Varianten würde aber bestehen bleiben. Der in Abbildung 25 nicht berücksichtigte Plug-in-Hybrid hätte ebenso wie die dargestellten Elektroantriebe klare Vorteile gegenüber den anderen postfossilen Optionen.

Außerdem zeigt der Vergleich: Der Brennstoffzellenbus liegt vor allen Varianten mit konventionellem Antrieb – wenn auch nur leicht. Ob allerdings Btl, PtL, Bio-SNG oder PtG-Methan verbrannt wird, ändert die Bewertung nur unwesentlich. Egal, welche postfossile Option realisiert wird, beträgt die Treibhausgasemissionen gegenüber einem hybridisierten, verbrauchsoptimierten Dieselbus im Jahr 2050 mindestens 80 %. Im günstigsten Fall können die spezifischen Treibhausgasemissionen sogar um mehr als 90 % reduziert werden.

Abbildung 25: Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung für einen 12-m-Standardbus im Stadtverkehr im Jahr 2050



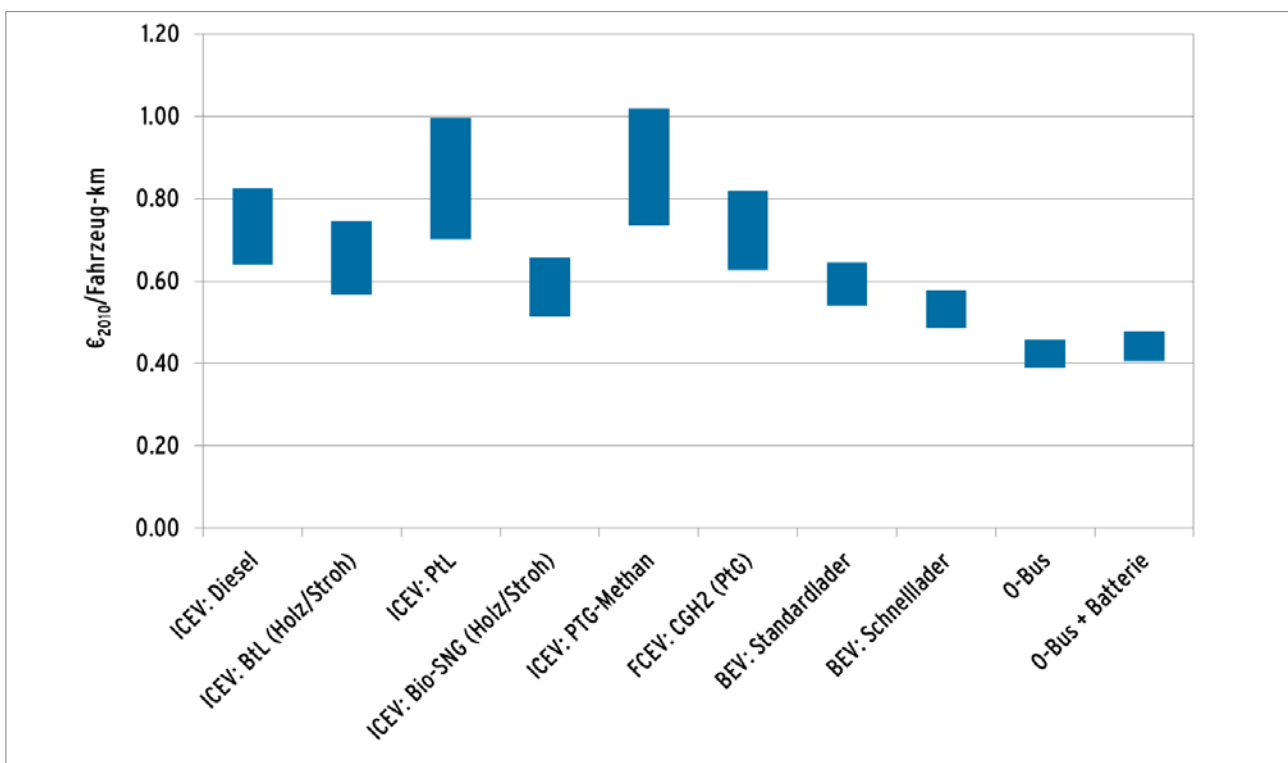
[eigene Darstellung]

## Kosten

Der bei den Emissionen festgestellte Vorteil von batterieelektrischen Bussen relativiert sich bei Betrachtung der jährlichen Kosten für Fahrzeuganschaffung und Energie (siehe Abbildung 26). Eine Batterie mit 200 bis 250 km Reichweite und Übernacht-Ladung verursacht auch 2050 noch hohe Kosten. Busse mit Schnellladesystem schneiden hier besser ab – auch wenn für 2050 angenommen wird, dass die eingesetzten Batterien zwar kleiner, aber doppelt so teuer sind als die Batterien für Langsamladung. Für die Schnellladung sind allerdings aufwändigere Ladestationen notwendig, die in dieser Kostenbetrachtung nicht berücksichtigt sind. Werden nur Fahrzeuganschaffung und Energiekosten berücksichtigt, verursachen O-Busse die mit Abstand niedrigsten spezifischen Kosten pro Bus-km. Auf die zusätzlichen Kosten für Oberleitungen, aber auch für Schnellladestationen wird in Kapitel 6.2 eingegangen.

Ähnlich hohe spezifische Kosten wie rein batterieelektrische Busse verursachen Busse mit Verbrennungsmotoren, die Bio-SNG oder BtL einsetzen. Sie haben im Jahr 2050 Vorteile gegenüber konventionellem Dieselbetrieb, was für Brennstoffzellenbusse nicht gilt, obwohl für dieses Konzept ebenfalls eine deutliche Kostensenkung unterstellt wurde (siehe Kapitel 3.5). Kostenseitig schlechter als Brennstoffzellenbusse sind Fahrzeuge, die PtL und PtG-Methan nutzen. Sie verursachen mit Abstand die höchsten spezifischen Kosten pro Bus-km, nur im günstigsten Fall werden im Jahr 2050 vergleichbare Kosten wie für den Dieselbetrieb erreicht. Allerdings kann für PtL die heutige Tankstelleninfrastruktur genutzt werden.

Abbildung 26: Bandbreite der spezifischen Kosten für Fahrzeuganschaffung und Energie für einen 12-m-Standardbus im Stadtverkehr im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010)



[eigene Darstellung]

### Zwischenfazit

Für Busse gibt es spezifische postfossile Lösungen, die für Pkw und Lkw in dieser Form nicht existieren. Dank feststehender Linienführung können batterieelektrische Fahrzeuge während des Betriebs an Haltestellen ihre Akkus wieder laden. Die benötigte Batterie ist dann deutlich kleiner als bei Bussen mit Übernacht-Ladung. Fahrzeuge mit Zwischenladung haben keine

Reichweiteneinschränkungen und mit die niedrigsten Treibhausgasemissionen und geringsten Kosten pro Bus-km. Ähnlich würden auch Plug-In-Hybride abschneiden, die in diesem Kapitel aber nicht explizit betrachtet wurden.

Günstiger bei Treibhausgasemissionen und Kosten schneiden nur noch O-Busse ab. Um die Busse unabhängiger von Oberleitungen zu machen, können die Fahrzeuge zusätzlich mit einer Batterie ausgestattet werden, die über 30 bis 50 km freie Fahrt ermöglicht. Entlang den Strecken mit Oberleitung wird die Batterie dann erneut aufgeladen. Charmant an dieser Option ist, dass in Stadtzentren mit hohen Busfrequenzen Oberleitungen genutzt werden können, an Stadträndern hingegen eine teure, neue Leitungsinfrastruktur verzichtbar ist. Werden ausschließlich Treibhausgasemissionen und Kosten für Fahrzeug und Energie betrachtet, erweisen sich O-Busse mit zusätzlicher Batterie neben batterieelektrischen Fahrzeugen an Schnelladesystemen als die vorteilhaftesten Optionen.

## 5.4 Flugzeug

### Die Optionen im Überblick

Heute sind Flugzeuge in der Regel mit Triebwerken ausgestattet, kleinere Maschinen besitzen eine Kombination aus Triebwerk und Propeller. Entwicklungszeiten von Flugzeugen sind sehr lang und bewährte Technologie wird über Jahrzehnte eher modifiziert als von Grund auf neu konzipiert. Daher werden in den kommenden zehn bis 20 Jahren keine neuen Antriebskonzepte auf den Markt kommen [Gollnick 2013, Jeanvré 2013]. Das bedeutet, dass selbst neue Konzepte, die zwischen 2030 und 2040 marktreif werden, den Flugzeugmarkt im Jahr 2050 nicht nachhaltig prägen werden. Zu lang sind die Nutzungsdauern heutiger Flugzeuge.

Flugzeuge werden zwar bis 2050 weiter verbrauchsoptimiert, fliegen aber auch in den kommenden Jahrzehnten in aller Regel mit Triebwerken. Flugzeuge werden also effizienter (siehe Kapitel 3.1), die Effizienzverbesserungen und damit die Treibhausgasminderungen fallen aber deutlich geringer aus als bei Pkw, Lkw oder Bus [Öko-Institut 2013a].

Als postfossile Energieversorgungsoptionen können BtL und PtL das Kerosin ersetzen.<sup>11</sup> Daneben können Triebwerke auch Wasserstoff verbrennen. Airbus hat beispielsweise im Projekt Cryoplane entsprechende Konzeptstudien für Wasserstoffflugzeuge entwickelt [Westenberger 2003]. Um ausreichende Energiedichten zu erreichen, wird der Wasserstoff im Flugzeug flüssig gespeichert. Dennoch benötigt verflüssigter Wasserstoff (LH<sub>2</sub>), wie in Kapitel 3.2 gezeigt, ein vierfaches Raumvolumen für die gleiche Energiemenge wie Kerosin. In derzeitigen Flugzeugen ist dafür nicht ausreichend Platz, so dass Neukonstruktionen notwendig sind. Da bis heute die Entwicklung von LH<sub>2</sub>-Flugzeugen nicht konkret stattfindet, ist es unwahrscheinlich, dass sie im

---

<sup>11</sup> Prinzipiell könnten auch SNG und PtG-Methan in verflüssigter Form im Flugzeug eingesetzt werden. Im Vergleich zu BtL und PtL würde der Einsatz dieser gasförmigen Kraftstoffe eine Neukonstruktion der Flugzeuge sowie eine Umstellung der Kraftstoffversorgungsinfrastruktur nach sich ziehen. Die hierfür notwendigen Investitionen in neue Flugzeuge und Tankstelleninfrastrukturen erscheinen aber wenig wahrscheinlich, da die Klimavorteile von PtG-Methan und SNG gegenüber BtL und PtL dies kaum rechtfertigen würden [Sieber 2011]. In dieser Studie werden daher PtG-Methan und SNG nicht weiter betrachtet. Ähnlich stellt sich zwar auch die Situation bei der Nutzung von PtG-Wasserstoff dar. Als klimafreundlichste Variante der drei gasförmigen postfossilen Kraftstoffe wird diese Option aber weiter untersucht, obwohl es ebenfalls unwahrscheinlich ist, dass diese Option bis 2050 – zudem nur für den Kurzstreckenverkehr – realisiert wird.



Jahr 2050 in nennenswerten Umfang fliegen werden. Dennoch stellen sie eine Möglichkeit der postfossilen Energieversorgung dar und werden im Folgenden betrachtet.

Eine ganz andere Variante ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Die Herausforderung besteht darin, dass bei Start und Steigphase eine hohe Leistung des Motors benötigt wird, gleichzeitig muss ausreichend Energie für lange Distanzen an Bord sein. Grundsätzlich könnte ein Elektromotor für die Startphase ausreichend Leistung liefern und Batterien wären grundsätzlich geeignet, kurzfristig die benötigte Leistung bereitzustellen. Wie in Kapitel 3.2 aber gezeigt, werden Batterien auch im Jahr 2050 keine ausreichenden Energiedichten für lange Flugstrecken erreichen. Alternativ könnte eine Brennstoffzelle an Bord den notwendigen Strom erzeugen, der dafür nötige Wasserstoff würde mehr Energie liefern und höhere Reichweiten ermöglichen. Der Nachteil einer Brennstoffzelle aber ist, dass sie für die Startphase keine ausreichende Leistung bringt [Kuhn et al. 2013].

Daher hat das Bauhaus Luftfahrt die Konzeptstudie für ein Flugzeug mit dem Namen „Ce-Liners“ entwickelt, die beide Systeme kombiniert: Eine Batterie liefert die hohe Leistung für den Start, eine Brennstoffzelle liefert den Strom für einen rund 1.600 km langen Flug [Kuhn 2013]. Aufgrund der langen Entwicklungs- und Markteinführungszeiten wird auch dieser Kombi-Antrieb kaum eine Chance auf eine signifikante Verbreitung bis zum Jahr 2050 haben. Dennoch wird diese Option für den Kurzstreckenverkehr als mögliche postfossile Energieversorgungsoption mit aufgenommen. Für den erwarteten Verbrauch des neuen Flugzeugtyps liegen noch keine Angaben vor, daher wurde angenommen, dass der Verbrauch des „Ce-Liners“ rund 10 % unter dem konventioneller Triebwerke liegt.

Abbildung 27 zeigt einen Überblick über alle möglichen postfossilen Optionen für Flugzeuge. Die Übersicht macht deutlich, dass für den Langstreckenverkehr lediglich BtL und PtL in Frage kommen. Bei alleiniger Versorgung des Luftverkehrs mit BtL könnte der Bedarf zu großen Teilen damit gedeckt werden. Da dieser Biokraftstoff der 2. Generation aber auch für andere Verkehrsträger genutzt werden kann, ist ein treibhausgasneutraler Luftverkehr somit auch zwangsläufig auf PtL angewiesen.

Abbildung 27: Postfossile Energieversorgungsoptionen für Flugzeuge

	Flugzeugturbine		Elektroantrieb			
	Flüssigkraftstoff	Gas	Brennstoffzelle	Batterieelektrisch	Plug-in Hybrid	Oberleitung
BtL (Holz/Stroh)	○					
PtL	●					
PtG-Wasserstoff - verflüssigt		● nur Kurzstrecke	● Kombination nur Kurzstrecke			

● = Ausreichende Mengenpotentiale; ○ = nur eingeschränkte Mengenpotentiale

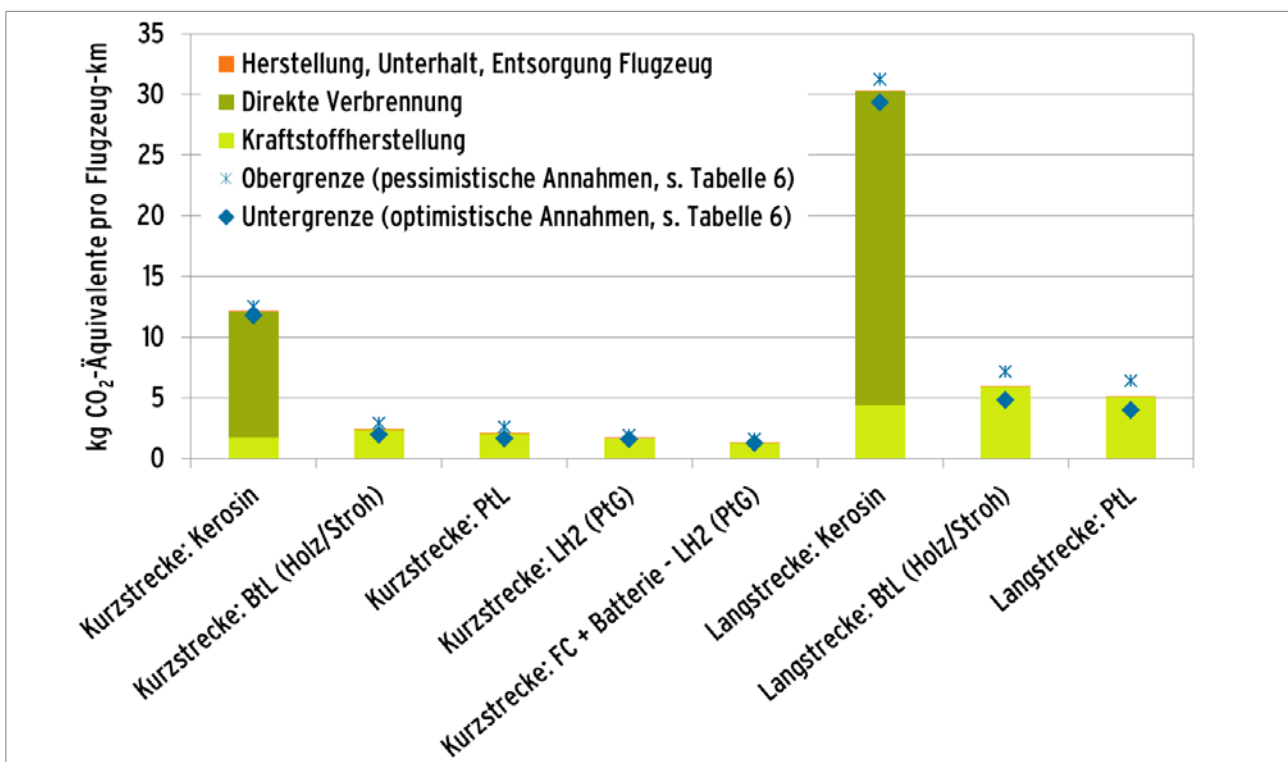
[eigene Darstellung]

### Treibhausgasemissionen

Abbildung 28 zeigt für das Jahr 2050 die spezifischen Treibhausgasemissionen für Kurzstreckenflugzeuge mit Reichweiten von 1.000 bis 1.500 km und Langstreckenflugzeuge mit Reichweiten von 8.000 bis 10.000 km. In dieser Darstellung unberücksichtigt bleibt die Treibhausgaswirkung von Wasserdampf und Luftschadstoffen in Reiseflughöhe. Da die Emissionen aus dem Flugzeugbau aufgrund der hohen Jahresflugleistungen vernachlässigbar sind, sind für eine Bewertung die Emissionen aus der Kraftstoffherstellung entscheidend. Beim Kurzstreckenverkehr schneidet das Flugzeug mit Hochgeschwindigkeits-Elektromotor, der seine Energie aus

einer Batterie bzw. einer mit LH<sub>2</sub> betriebenen Brennstoffzelle erhält, am günstigsten ab, gefolgt vom reinen LH<sub>2</sub>-Flugzeug mit konventionellem Triebwerk. Die Unterschiede der Wasserstoff-Flugzeuge zu Flugzeugen mit PtL und BtL sind bei den Treibhausgasemissionen aber so gering, dass es fraglich scheint, ob dies eine völlige Neukonstruktion von Flugzeugen rechtfertigt. Zudem ist die Realisierung von Elektro- und LH<sub>2</sub>-Flugzeugen bis 2050 eher unwahrscheinlich. Im Langstreckenverkehr, der die Höhe der Gesamtreibhausgasemissionen des Luftverkehrs maßgeblich dominiert, stehen lediglich BtL und PtL als postfossile Optionen zur Verfügung. PtL weist leichte Emissionsvorteile auf; die Unterschiede sind allerdings so klein, dass beide Optionen nahezu gleichwertig sind.

Abbildung 28: Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung für Kurz- und Langstreckenflugzeuge im Jahr 2050 - ohne Treibhausgaswirkung von Wasserdampf und Luftschadstoffen in Reiseflughöhe



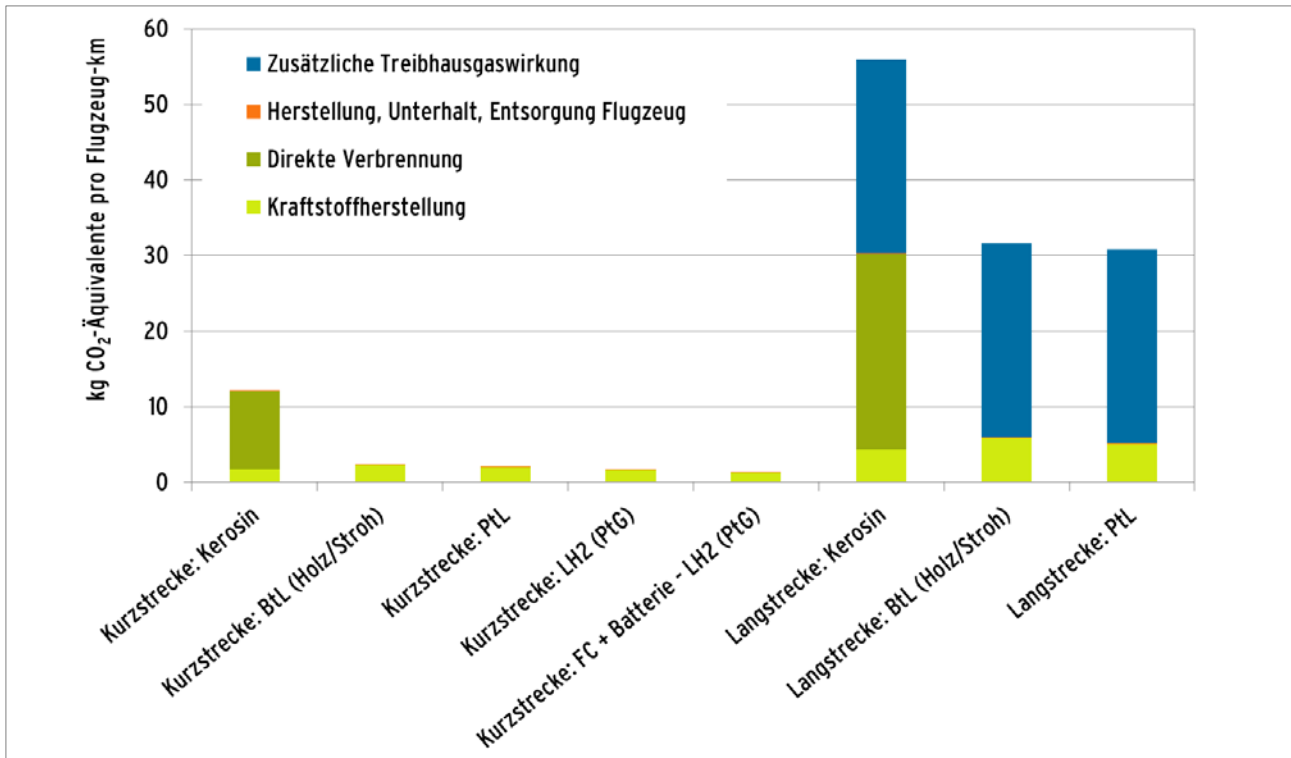
[eigene Darstellung]

Die Treibhausgaswirkung von Wasserdampf und Luftschadstoffen in Reiseflughöhe wird mit Hilfe des Emission Weighting Factor (EWF) angegeben (siehe Kapitel 3.4). Dieser EWF wird in dieser Studie mit 2 angenommen. Das bedeutet, dass sich die Treibhausgaswirkung der direkten TTW-CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Mittel- und Langstreckenflügen rein rechnerisch verdoppelt. Da diese Emissionen unabhängig von Kerosin, BtL oder PtL sind, muss der EWF bei allen Kraftstoffen berücksichtigt werden.

Abbildung 29 zeigt den Emissionsvergleich unter Berücksichtigung des EWF. Sie macht deutlich, dass sich im Langstreckenverkehr die Treibhausgaswirkung im Vergleich zum Kerosin nur etwa halbiert. Außerdem relativiert der Vergleich erneut die Bedeutung alternativer Antriebskonzepte für den Kurzstreckenverkehr. Elektroantrieb und LH<sub>2</sub> sind demnach nur zielführend, wenn sie langfristig in Konzepte für den Langstreckenverkehr münden. Hier besteht der große Handlungsbedarf, soll der Luftverkehr klimaneutral werden. Deutlich wird auch, dass Maßnahmen unabhängig vom gewählten alternativen Treibstoff notwendig sind, um die zusätzli-

che Treibhausgaswirkung von Wasserdampf und Luftschadstoffen zu senken (z. B. durch Auswahl von Flugrouten, die die Bildung von Wolken verhindern).

Abbildung 29: Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung für Kurz- und Langstreckenflugzeuge im Jahr 2050 - mit Treibhausgaswirkung von Wasserdampf und Luftschadstoffen in Reiseflughöhe



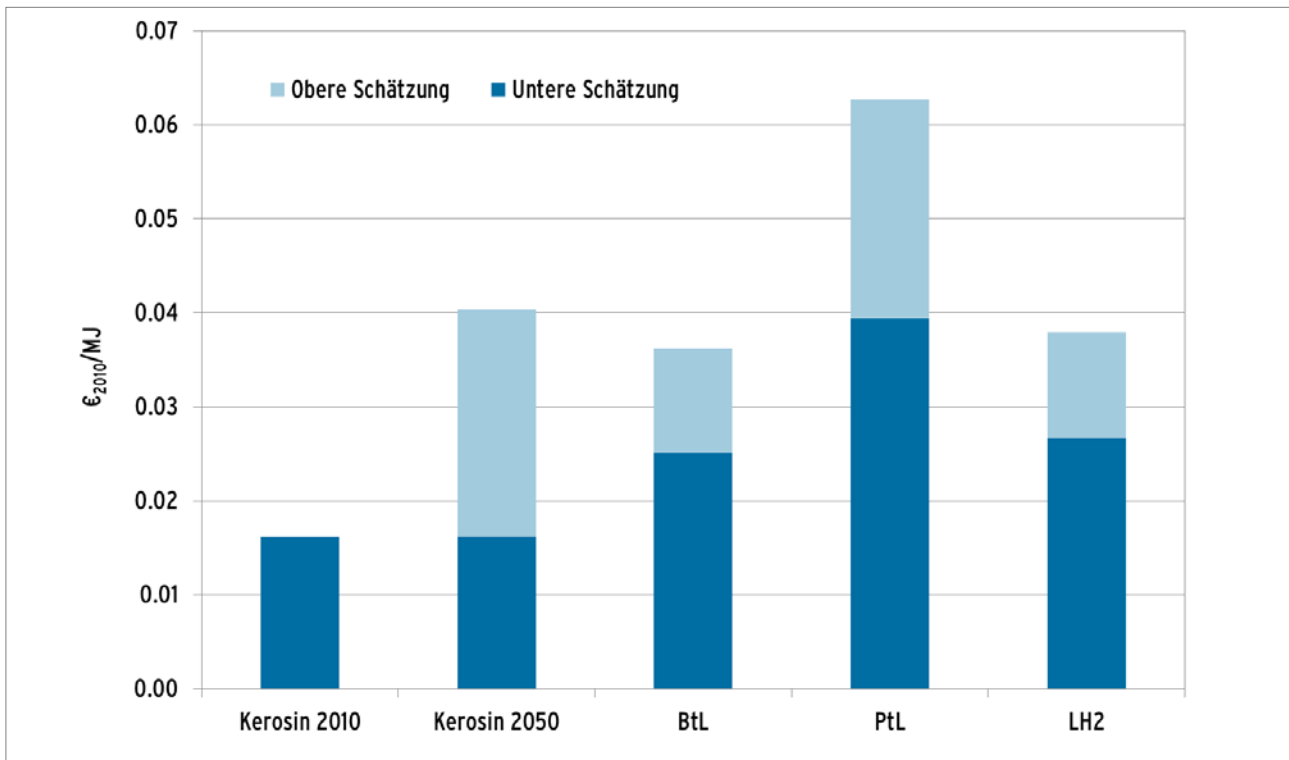
[eigene Darstellung]

## Kosten

Umfassende Kostenbetrachtungen für den Luftverkehr sind schwierig. Während die Kosten für Kerosin bekannt sind, stehen in der Regel wenig verlässliche Daten zu Kosten für die Flugzeuganschaffung zu Verfügung. Nach Angaben der International Air Transport Association (IATA) entfällt ein Drittel der operativen Kosten pro Flugzeug-km auf Kerosin [IATA 2013]. Auswertungen für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge zeigen zudem, dass 33 bis 50 % von den übrigen Kosten auf das Flugzeugleasing entfallen – also 22 bis 33 % der Gesamtkosten [AC 2005]. Damit sind die Treibstoffkosten mehr oder weniger gleichbedeutend mit den Kosten für das Flugzeug. Beiden Kostenblöcken kommt eine hohe Bedeutung für die Gesamtkosten des Flugbetriebs zu.

Abbildung 30 vergleicht auf Preisbasis 2010 die auf den Energieinhalt bezogenen Energiekosten von Kerosin mit den Produktionskosten für BtL, PtL und Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>). Für Kerosin sind die heutigen (rund 0,60 €<sub>2010</sub>/l) und die künftigen Kosten basierend auf Angaben der U.S. Energy Information Administration (EIA) im Bild dargestellt [Malina 2013]. Der Vergleich macht deutlich, dass BtL und LH<sub>2</sub> in Zukunft bei steigenden Kerosinpreisen durchaus wettbewerbsfähig werden. Für PtL gilt das nur dann, wenn die Kerosinkosten noch stärker steigen als in der Abbildung angenommen (Obergrenze in der Abbildung: 1,40 €<sub>2010</sub>/l).

Abbildung 30: Vergleich der Kerosinkosten (2010 und 2050) mit den Produktionskosten postfossiler Kraftstoffe für den Luftverkehr im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010)

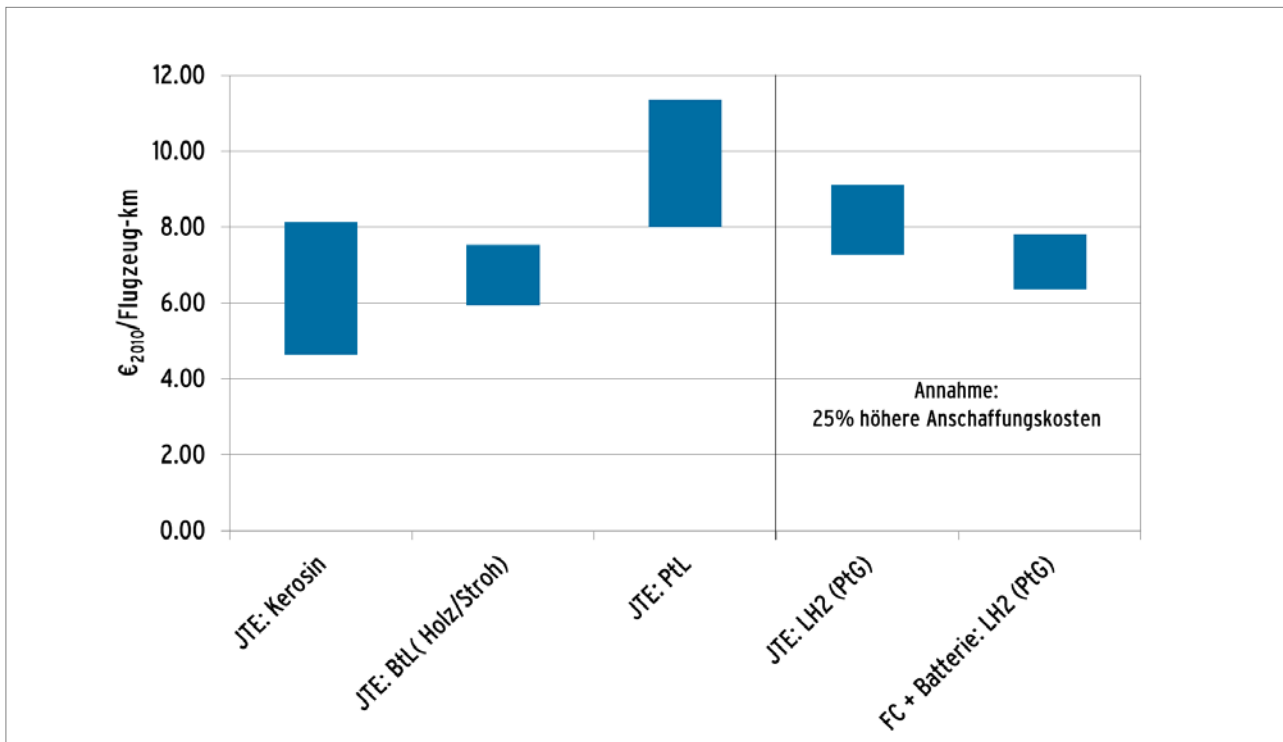


[Malina 2013; eigene Berechnungen]

Wasserstoff schneidet pro MJ Energie durchaus günstig ab. Wird das Gas direkt in den Triebwerken von Kurzstreckenflugzeugen verbrannt, liegt der Energieverbrauch allerdings um 10 bis 18 % höher als bei Kerosin [Westenberger 2003]. Da LH<sub>2</sub>-Flugzeuge erst noch entwickelt werden müssen, ist davon auszugehen, dass sie teurer sein werden als Flugzeuge mit Triebwerken. Wie hoch die Mehrkosten sind, ist nicht bekannt. Daher wurde für Abbildung 31 angenommen, dass die Anschaffungskosten für die Flugzeuge rund 25 % höher liegen als bei konventionellen Flugzeugen. In diesem Fall ergibt sich die in Abbildung 31 dargestellte Situation. Die Kosten von LH<sub>2</sub>-Flugzeugen liegen über denen von BtL-Flugzeugen. Die Vorteile zu PtL-Flugzeugen sind kleiner als erwartet.

Anders sieht das Bild für Flugzeuge mit Elektromotor aus. Aufgrund der höheren Energieeffizienz (rund 10 % niedrigerer Verbrauch gegenüber Flugzeugen mit Triebwerken) können Mehrkosten von bis zu 25 % bei der Flugzeuganschaffung stärker kompensiert werden als beim LH<sub>2</sub>-Flugzeug. Die Gesamtkosten für Flugzeug und Treibstoff sind daher mit der BtL-Variante vergleichbar. Selbst bei Mehrkosten von 50 % wäre das elektrifizierte Konzept immer noch günstiger als Flugzeuge, die PtL nutzen. Flugzeuge mit Hochgeschwindigkeits-Elektromotor sind also ökonomisch durchaus interessant, auch wenn ihr Emissionsvorteil gering ausfällt.

Abbildung 31: Spezifische Kosten für Flugzeuganschaffung und Energie für Kurzstreckenflugzeug im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010)



[eigene Darstellung]

### Zwischenfazit

Anders als bei Pkw, Lkw und Bus gibt es für den Luftverkehr nur wenige postfossile Energieversorgungsoptionen. Für Mittel- und Langstreckenflugzeuge stehen ausschließlich BtL und PtL als postfossile Kraftstoffe im Jahr 2050 zur Verfügung. Während bei den Treibhausgasemissionen PtL gegenüber BtL leicht im Vorteil ist, sind die Kosten von BtL deutlich niedriger. Bei steigenden Kerosinkosten wären BtL-Kraftstoffe durchaus mit denen von Kerosin vergleichbar. Die Verwendung von PtL führt hingegen zu Mehrkosten. Da für den Flugverkehr BtL nur begrenzt zur Verfügung steht, ist er langfristig auf PtL als zweite postfossile Energieversorgungsoption angewiesen. Andernfalls sind ambitionierte Klimaschutzziele im Luftverkehr mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität nicht erreichbar.

Für den Kurzstreckenverkehr bestehen weitere Möglichkeiten. So kann beispielsweise flüssiger Wasserstoff als Kraftstoff direkt in den Triebwerken genutzt werden. Noch weitreichender ist die Entwicklung eines Konzeptes, bei dem ein Hochgeschwindigkeitsmotor beim Start von einer Batterie, während des Flugs von einer Brennstoffzelle gespeist wird. Beide Konzepte haben leichte Vorteile bei den Treibhausgasemissionen im Vergleich zu BtL und PtL. Bei den Kosten liegen sie etwas höher als BtL, aber günstiger als PtL. Da sich aber weder Wasserstoff- noch Elektro-Flugzeuge in der konkreten Entwicklung befinden, ist nicht davon auszugehen, dass diese Technologien im Jahr 2050 einen nennenswerten Beitrag zur Treibhausgasreduzierung liefern werden. Da mit BtL eine ökonomische Alternative auch für den Kurzstreckenverkehr zur Verfügung steht, ist zudem fraglich, ob sich Investitionen in völlig neue Konzepte lohnen.

## 5.5 Seeschiff

### Die Optionen im Überblick

Analysen der IMO zeigen, dass bereits heute der Containerverkehr einer der größten Einzelenergieverbraucher der Schifffahrt ist, der zudem in den nächsten Jahren noch stark zunehmen wird [IMO 2009]. Daher wird in diesem Kapitel nur auf Containerschiffe fokussiert. Dabei wird ein typisches Containerschiff betrachtet, das kontinental im Feederverkehr eingesetzt wird und eine Kapazität von rund 800 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit = 20-Fuss-Standardcontainer) hat. Als Gegenpol dient ein großes Containerschiff, das zwischen den Kontinenten eingesetzt wird und rund 15.000 TEU fasst.

Wie beim Flugzeug stehen auch beim Containerschiff postfossiles BtL und PtL als so genannte Drop-in-Kraftstoffe zur Verfügung (siehe Abbildung 27). Werden zukünftig LNG-Schiffe verstärkt eingeführt, kann in diese Schiffe alternativ auch Bio-SNG oder PtG-Methan in verflüssigter Form genutzt werden. Diese Möglichkeit steht sowohl großen als auch kleinen Schiffen offen. Für Feeder-Schiffe mit einer Kapazität von bis zu 1.000 TEU sind daneben Elektromotoren denkbar, die über eine Brennstoffzelle in Kombination mit einer Batterie angetrieben werden. Die Batterie liefert dabei den Strom für kurzfristig hohe Leistungen, die Brennstoffzelle versorgt den Motor im gleichmäßigen kontinuierlichen Betrieb. Die Brennstoffzelle wird mit flüssigem Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) versorgt. Auf diese Weise besteht für den Feeder-Verkehr die Möglichkeit der Elektrifizierung.

Abbildung 32: Postfossile Energieversorgungsoptionen für Containerschiffe

	Verbrennungsmotor (ICE = Internal Combustion Engine)		Elektroantrieb			
	Flüssigkraftstoff	Gas	Brennstoffzelle	Batterieelektrisch	Plug-in Hybrid	Oberleitung
BtL (Holz/Stroh)	○					
PtL	●					
Bio-SNG (Holz/Stroh) - verflüssigt		○				
PtG-Methan - verflüssigt		●				
PtG-Wasserstoff - verflüssigt		●	● Kombination nur Feeder-Verkehr			

● = Ausreichende Mengenpotentiale; ○ = nur eingeschränkte Mengenpotentiale

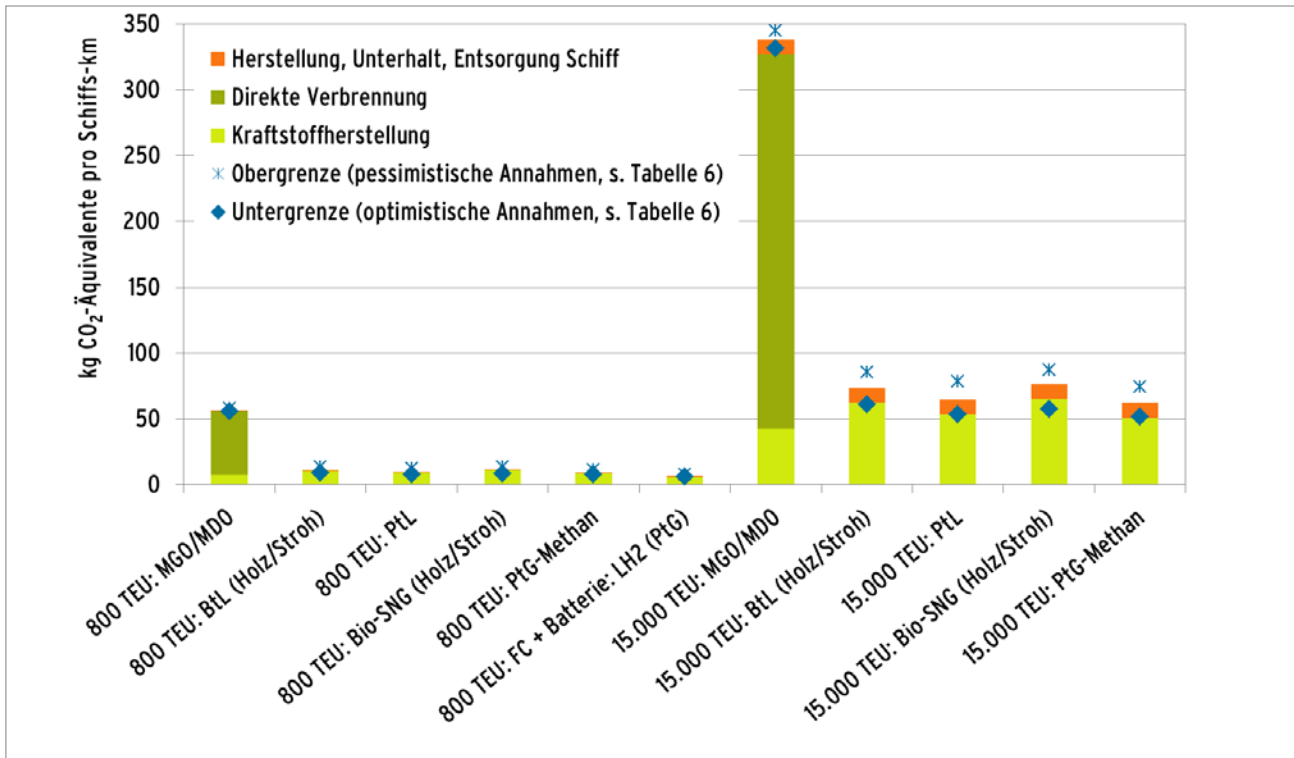
[eigene Darstellung]

### Treibhausgasemissionen

Abbildung 33 zeigt die spezifischen Treibhausgasemissionen pro Schiffskilometer im Jahr 2050 für das Feeder- und das interkontinental eingesetzte Containerschiff. Als konventionelle Referenz für das Jahr 2050 dienen Marine Gas Oil (MGO) bzw. Marine Diesel Oil (MDO). Der Vergleich macht Zweierlei deutlich: Zum einen sind alle möglichen postfossilen Optionen geeignet, die Emissionen der Containerschifffahrt deutlich zu senken, wobei die Unterschiede zwischen den Varianten fast vernachlässigbar sind. Zum anderen ist vor allem für große Containerschiffe mit ihrem hohen Verbrauch eine postfossile Lösung dringender notwendig als im Feederverkehr, um langfristig eine treibhausgasarme Mobilität im Schiffsverkehr zu erreichen. Da BtL und Bio-SNG weltweit nur in begrenzten Mengen verfügbar sind, wird der Seeverkehr künftig auch auf stromgenerierte Kraftstoffe angewiesen sein. Welcher stromgenerierte Kraft-

stoff den Vorzug bekommen sollte, kann auf Basis des Emissionsvergleichs nicht entschieden werden. Hierzu sind zusätzliche Kriterien in die Bewertung mit einzubeziehen.

Abbildung 33: Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung von Containerschiffen im Feeder-Verkehr (800 TEU) und im Interkontinental-Verkehr (15.000 TEU) im Jahr 2050



Legende: MGO = Marine Gasoil; MDO = Marine Diesel Oil.  
[eigene Darstellung]

## Kosten

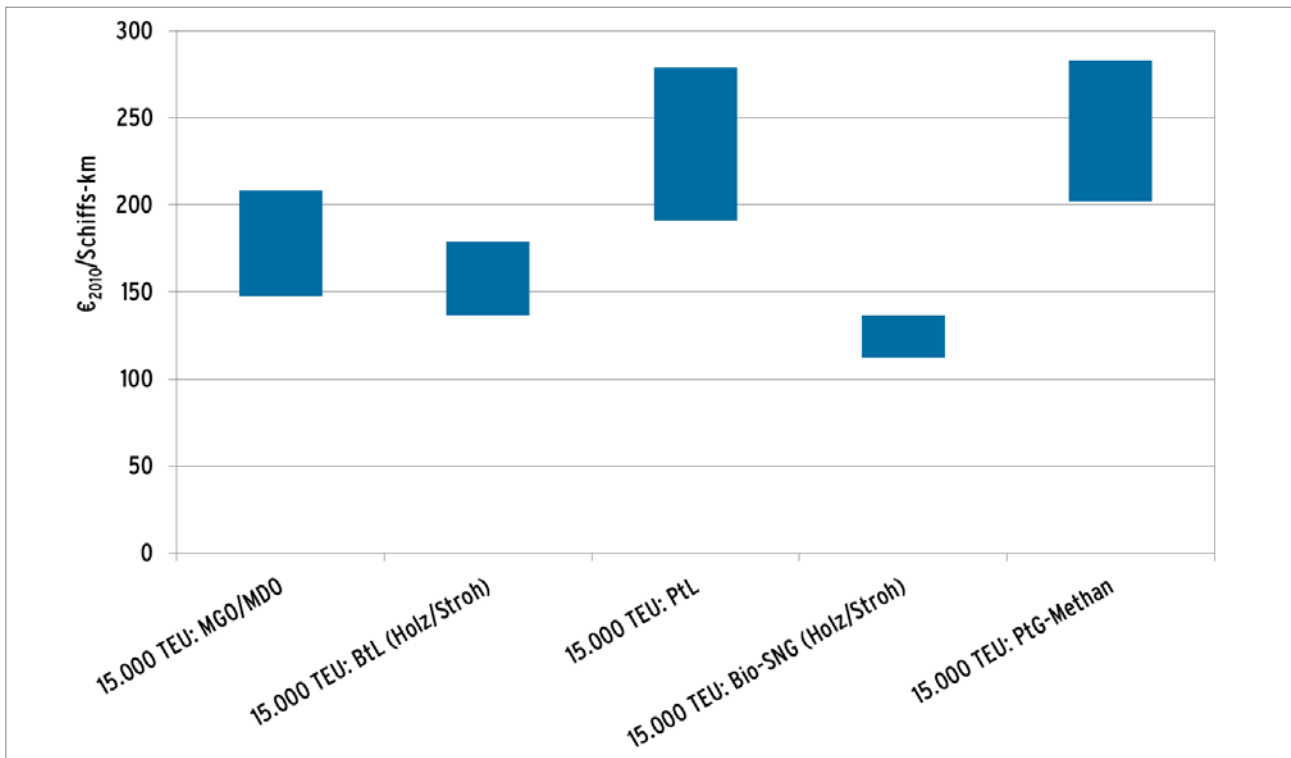
Wie sich die Kosten von Containerschiffen in Zukunft entwickeln, ist schwerer vorherzusagen als bei anderen Verkehrsträgern. Aufgrund der strenger werdenden Anforderungen an die Minderung der Schwefelemissionen müssen Containerschiffe, die Schweröl nutzen, mit einer Abgasnachbehandlungsanlage (Rauchgaswäscher, englisch Scrubber) ausgerüstet werden oder alternativ schwefelärmere Kraftstoffe wie Marine Gas Oil (MGO) oder Marine Diesel Oil (MDO) nutzen, die heute aber teurer sind [TNO et al. 20013]. Eine derzeit diskutierte Alternative ist LNG [HVB 2009]. Es ist z.Z. günstiger als MGO und MDO - die für LNG notwendigen Kühltanks aber machen im Gegenzug die Schiffe teurer [Sames et al. 2012]. Detaillierte Kostenschätzungen zeigen für die heutige Situation, dass sich diese Mehrkosten amortisieren, wenn das Schiff häufig in so genannten Sulphur Emission Control Areas (SECA) beispielsweise in Nord- und Ostsee sowie entlang der Nordamerikanischen Küste unterwegs ist [Sames 2011]. Ab 2020 bzw. 2025 wird sich der Einsatz der schwefelarmen Kraftstoffe wie LNG, MGO und MDO aufgrund der dann geltenden Schwefel-Grenzwerte auch außerhalb der SECA-Gebiete rechnen. Allerdings gehen bei Nutzung von LNG durch die Tanks bis zu 3 % der Containerstellplätze verloren; dieser Nachteil besteht bei MGO bzw. MDO nicht [Sames 2011].

Nach Schätzungen von TNO et al. (2013) kosten LNG-Containerschiffe mit einer Kapazität von 15.000 TEU derzeit mit 272 Mio. Euro rund 22 Mio. Euro mehr als Schiffe, die mit Schweröl betrieben werden (Preisbasis 2010). Das ist ein Preisaufschlag von rund 9 %. Legt man eine Nutzungsdauer von 25 Jahren und einen Zinssatz von 4 % zugrunde, belaufen sich damit die

jährlichen Kosten eines LNG-Containerschiffs mit 15.000-TEU auf rund 17,4 Mio. Euro bzw. 46 Euro pro Schiffs-km. Das sind rund 1,4 Mio. Euro pro Jahr bzw. 4 Euro pro Schiffs-km mehr als bei einem heute noch mit Schweröl, MDO oder MGO betriebenen Schiff vergleichbarer Größe [TNO et al. 2013].

Werden bis 2050 die bis dorthin üblichen konventionellen Kraftstoffe wie MDO und MGO durch BtL bzw. PtL ersetzt oder in LNG-Schiffen verflüssigtes Bio-SNG bzw. PtG-Methan genutzt, ergibt sich die in Abbildung 34 dargestellte Situation im Jahr 2050 für ein Containerschiff im interkontinentalen Verkehr. Am ungünstigsten schneiden die stromgenerierten Kraftstoffe PtL und PtG-Methan ab. Ein möglichst treibhausgasneutraler Schiffsverkehr wird dennoch auf stromgenerierte Kraftstoffe angewiesen sein, da Biokraftstoffe nur in begrenzten Mengen zur Verfügung stehen. Die Unterschiede beider Kombination – Bio-SNG mit PtG-Methan oder BtL mit PtL – sind allerdings so klein, dass aufgrund der Kostensituation keine klare Empfehlung ausgesprochen werden kann. Tendenziell führt die Verwendung von Bio-SNG zu den niedrigsten Gesamtkosten pro Schiffs-km.

Abbildung 34: Spezifische Kosten für Schiff und Kraftstoffe für ein Containerschiff im Interkontinental-Verkehr (15.000 TEU) im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010)



[eigene Darstellung]

Die Kosten für Brennstoffzellen-Schiffe, die ergänzend Strom aus einer Batterie beziehen können, sind derzeit nur grob abschätzbar. Der Germanische Lloyd kommt zu dem Ergebnis, dass Feeder-Schiffe für maximal 1.000 TEU als Brennstoffzellenversion statt 22 rund 35 Mio. US-\$ kosten würden (heutige Preisbasis). Die Mehrkosten werden dabei zu 37 % durch den Wasserstofftank, zu 57 % durch die Brennstoffzelle und zu 6 % durch die Batterie verursacht [Sames et al. 2012]. Gegenüber den herkömmlichen Schiffen mit Schweröl verursacht dieses Konzept jährlich rund 30 % höhere Kosten und ist daher ökonomisch als ungünstiger einzustufen (Preisbasis 2010). Allerdings wird sich in Zukunft diese Preisdifferenz verringern, da zur Einhaltung der



strengerem Schwefelgehalt diese Schiffe mit Rauchgaswäscher ausgestattet sein müssen bzw. mit MGO bzw. MDO betrieben werden müssen.

### **Zwischenfazit**

Wie beim Luftverkehr stehen für den Seeverkehr für interkontinentale Verkehre nur zwei Optionen zur Realisierung eines treibhausgasneutralen Betriebs zur Verfügung: Biokraftstoffe der 2. Generation oder die Nutzung von stromgenerierten Kraftstoffen. Auch für den Seeschiffsverkehr gilt, dass Biokraftstoffe nur einen Teil der Energienachfrage decken können. Ob ergänzend flüssige Kraftstoffe oder verflüssigte Gase zum Einsatz kommen sollten, ist eine offene Frage. Da Bio-SNG die niedrigsten Gesamtkosten aller postfossilen Optionen des Seeverkehrs verursacht, würde sich eine Kombination mit gasförmigem PtG-Methan als stromgeneriertem Kraftstoff anbieten. Aufgrund der geringen Unterschiede ist aber eine Vorfestlegung, ob die Kombination Bio-SNG und PtG-Methan oder die Kombination BtL und PtL die bessere Option darstellt noch offen. Hier besteht noch weiterer Klärungsbedarf.

## 6 Weitere Einflüsse auf die Bewertung

Treibhausgasemissionen und Kosten sind wichtig für die Entscheidung, welche postfossile Energieversorgungsoption für jeden einzelnen Verkehrsträger im Jahr 2050 vorteilhaft ist. Die beiden Kriterien allein sind für eine Bewertung aber nicht ausreichend. Neben den Emissionen spielen noch andere ökologische Aspekte eine Rolle und die Kostenbetrachtungen erfolgten vor allem aus Sicht der Fahrzeugnutzer – Infrastrukturkosten wurden beispielsweise nicht berücksichtigt. Darüber hinaus sind neben ökologischen und ökonomischen Größen noch andere Aspekte für eine Entscheidung relevant.

Daher werden in diesem Kapitel weitere ökologische und ökonomische, aber auch technologische, infrastrukturelle und systemische Aspekte betrachtet. Eine Bewertung für jeden einzelnen Verkehrsträger würde aber den Rahmen dieser Studie sprengen. Daher erfolgt eine gemeinsame Bewertung, die auch deshalb Sinn macht, weil viele Facetten übergreifend für alle Verkehrsmittel gelten. Gibt es dennoch essentielle Unterschiede, wird darauf hingewiesen.

Für die Vorauswahl der postfossilen Energieversorgungsoptionen wurde in Kapitel 4 bereits eine Reihe möglicher Kriterien für eine umfassendere Bewertung der Optionen identifiziert (siehe auch Tabelle 11). Von den technischen, infrastrukturellen und systemischen Aspekten wurde die überwiegende Mehrheit der in Tabelle 11 aufgeführten Kriterien bereits behandelt. In Kapitel 6.3 erfolgt daher in erster Linie die Bewertung der technischen Realisierungschancen bis zum Jahr 2050 sowie die systemische Anschlussfähigkeit postfossiler Optionen. Zwar wird indirekt auch eine notwendige Anpassung an die bestehende Infrastruktur im Zusammenhang mit den Kosten diskutiert; der Vollständigkeit halber werden diese aber in diesem Kapitel für die einzelnen Optionen gegenübergestellt.

### 6.1 Weitere ökologische Aspekte

#### Energieeffizienz

Die Energieeffizienz einer postfossilen Energieversorgungsoption hängt nicht nur von der Effizienz des Antriebssystems, sondern auch vom Herstellungsweg der eingesetzten Kraftstoffe ab. In Kapitel 3 werden die Entwicklung der Energieeffizienz der einzelnen Antriebssysteme für jeden Verkehrsträger, außerdem Wirkungsgrade und Energieeffizienz der Herstellung stromgenerierter Kraftstoffe vorgestellt. Wichtige Annahme dabei ist, dass bis 2050 sowohl die Fahrzeugeffizienz als auch die Effizienz der Kraftstoffherstellung deutlich ansteigen.

Aber auch im Jahr 2050 gibt es Unterschiede zwischen Antriebssystemen und Herstellungswegen. Elektroantriebe sind energieeffizienter als Brennstoffzellenantriebe, Brennstoffzellenantriebe wiederum effizienter als Verbrennungsmotoren [Öko-Institut 2013a und b; Prognos/INFRAS 2012]. Lediglich die Verbrennungsmotoren gleichen sich an: Heute haben Gasmotoren in der Regel deutlich höhere Verbräuche als Dieselmotoren, im Jahr 2050 liegt deren Mehrverbrauch nur noch geringfügig höher (siehe Kapitel 3.1) [IFEU et al. 2013].

Für Strom und stromgenerierte Kraftstoffe gilt: Wird der Strom direkt in Elektrofahrzeugen genutzt, ist die Energieeffizienz am höchsten. Wird er zur Herstellung stromgenerierter Kraftstoffe verwendet, sinkt die Energieeffizienz von PtG-Wasserstoff über PtG-Methan hin zu PtL [Öko-Institut 2013b]. Dabei ist der Wirkungsgrad der Anlagen – auch wenn überschüssiger Windkraftstrom verwendet wird – durchaus relevant. Zum einen sollte auch überschüssiger Windstrom so weit wie möglich effizient genutzt werden, also beispielsweise – wenn in anderen Sektoren keine entsprechende Nachfrage besteht – zur Gewinnung von Kraftstoffen aus Prozessen mit hohem Wirkungsgrad wie z. B. PtG-Wasserstoff. Zum anderen arbeiten Anlagen

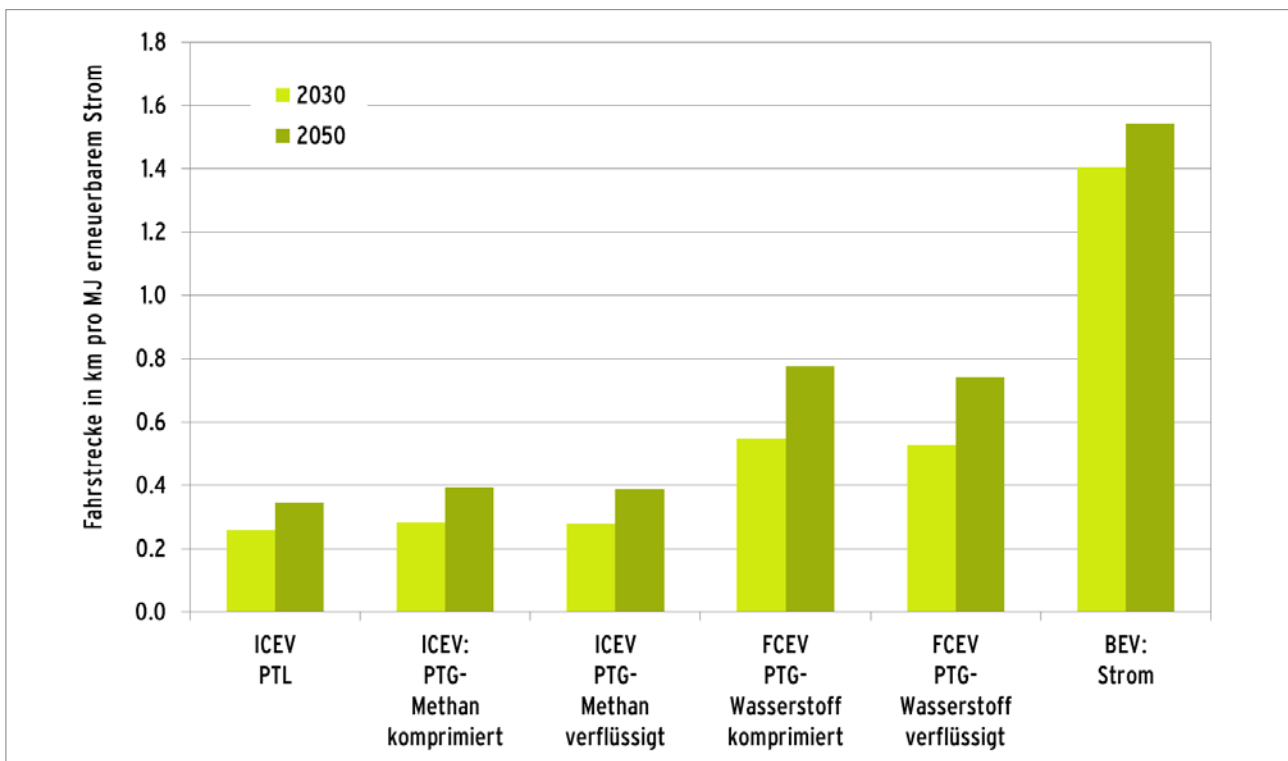
erst bei etwa 7.000 Betriebsstunden pro Jahr wirtschaftlich; überschüssiger Windstrom steht aber nicht für so viele Stunden im Jahr in Deutschland zu Verfügung (siehe Kapitel 3.5) [DVGW 2013].

Für die Gesamtenergieeffizienz von Antrieb und Kraftstoff ist die Kombination beider Bereiche interessant, unabhängig davon, welches Verkehrsmittel betrachtet wird:

- Elektrofahrzeuge nutzen den effizientesten Antrieb und die effizienteste Möglichkeit des Kraftstoffs – unabhängig, ob der Strom in einer Batterie zwischengespeichert oder direkt per Oberleitung genutzt wird. Daher ist diese Kombination am energieeffizientesten.
- Werden PtG-Methan und PtL in Verbrennungsmotoren mit der geringsten Energieeffizienz eingesetzt, ist die Energieeffizienz am geringsten.
- Brennstoffzellenfahrzeuge mit PtG-Wasserstoff liegen in der Energieeffizienz zwischen Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, die PtG-Methan oder PtL nutzen.

Abbildung 35 zeigt am Beispiel eines Mittelklasse-Pkw, welche Wegstrecke mit den unterschiedlichen Kombinationen pro MJ erneuerbar erzeugtem Strom (=3.6 kWh) im Jahr 2050 zurückgelegt werden kann. Demnach legen batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) rund 1,5 km zurück, Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) mit PtG-Wasserstoff rund 0,8 km. Bei Nutzung von PtL und EE-Methan im Verbrennungsmotor (ICEV) reduziert sich die Strecke auf rund maximal 0,4 km. Die Abbildung zeigt auch, dass zwar die Energieeffizienz im Jahr 2030 unter der von 2050 liegt, dass der Vergleich der Antriebssysteme und Kraftstoffe aber vergleichbar ausfällt. Gasförmige Kraftstoffe sind in verflüssigter Form weniger energieeffizient als komprimiert.

Abbildung 35: Fahrstrecke pro MJ erneuerbaren Stroms für einen Mittel-Klasse-Pkw (Golf-Klasse) ausgewählte post-fossile Energieversorgungsoptionen

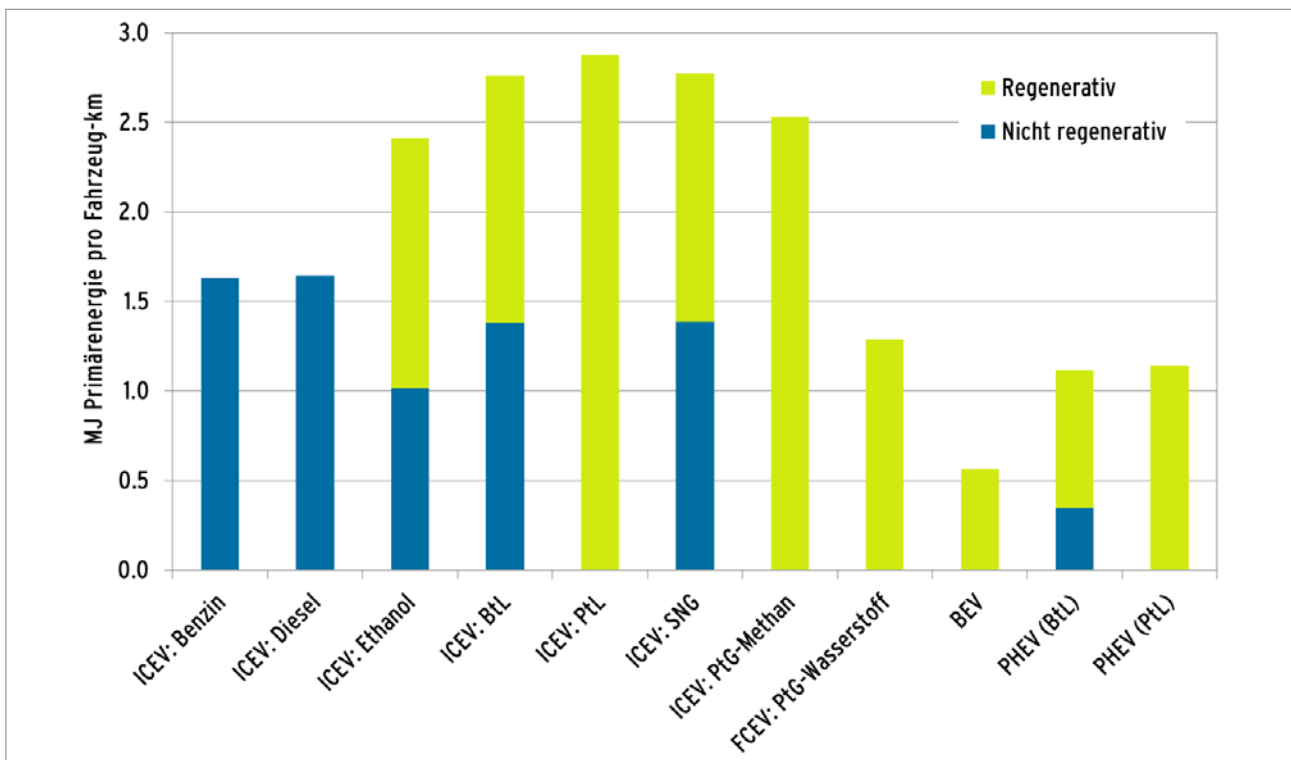


[eigene Darstellung]

Da erneuerbarer Strom aufgrund des erst notwendigen Ausbaus der Erzeugungsanlagen auch künftig nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen wird, müssen alternative Antriebe aus Energieeffizienzsicht dort ansetzen, wo mit möglichst wenig Strom die größte Fahrleistung erzielt werden kann. Wo immer möglich, sollte der Strom direkt genutzt werden, entweder in rein batterieelektrischen Verkehrsmitteln oder - um Reichweitenbeschränkungen aufzulösen – als Plug-In-Hybride. Nur wenn Strom nicht direkt genutzt werden kann, sollten stromgenerierte Kraftstoffe eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind der Mittel- und Langstreckenverkehr mit Flugzeugen oder der interkontinentale Schiffsverkehr. Für diese Verkehrsmittel sind stromgenerierte Kraftstoffe wie PtG-Methan und PtL eine wichtige Option.

Biokraftstoffe der 2. Generation verbrauchen mehr Energie bei der Herstellung als konventionelle Kraftstoffe. Ein Vergleich ist nur möglich, wenn der Primärenergieverbrauch der Optionen gegenübergestellt wird. Da für konventionelle Kraftstoffe wie auch für Biokraftstoffe keine verlässlichen Primärenergiefaktoren für das Jahr 2050 vorliegen, wurden heutige Werte zugrunde gelegt und mit den Verbrauchswerten der Fahrzeuge im Jahr 2050 kombiniert [EN 16258, JRC 2013; Müller-Langer 2011]. Abbildung 36 zeigt das Ergebnis dieses Vergleiches des Primärenergieverbrauchs für das Jahr 2050 für den Pkw pro Fahrzeug-km. Bis 2050 werden aber die herstellungsbedingten Energieverbräuche noch sinken, so dass die in der Abbildung dargestellten Werte für konventionelle Kraftstoffe und Biokraftstoffe der 2. Generation Obergrenzen darstellen. Auch der Anteil nicht regenerativer Energie wird bis zum Jahr 2050 bei Biokraftstoffen der 2. Generation noch deutlich sinken.

Abbildung 36: Primärenergieverbrauch pro Fahrzeug-km für Mittelklasse-Pkw (Golf-Klasse) im Jahr 2050 basierend auf heutigen Primärenergiefaktoren



[eigene Darstellung basierend auf EN 16258, JRC 2013; Müller-Langer 2011]

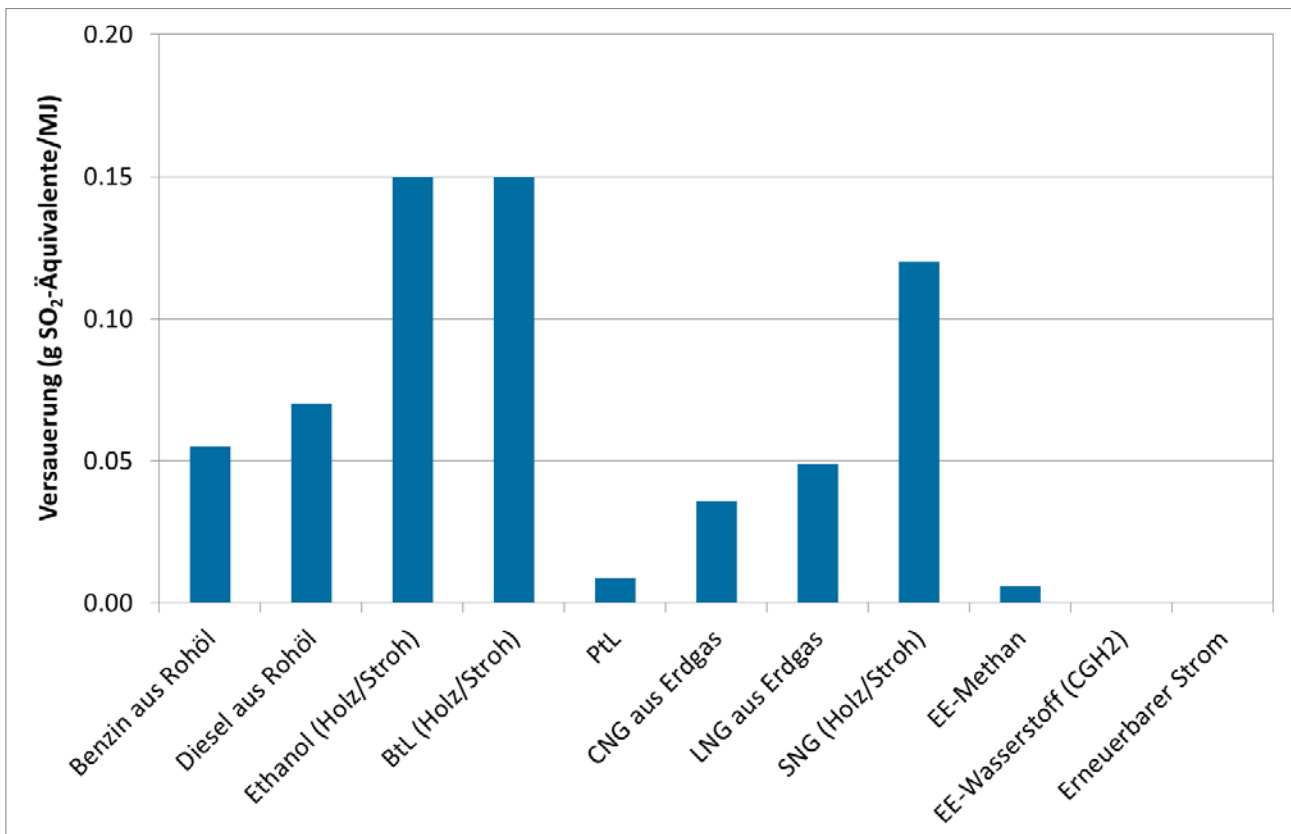
Auch wenn der Vergleich diesen Einschränkungen unterliegt, wird deutlich, dass die direkte Stromnutzung in Elektroautos am günstigsten abschneidet. Zu beachten ist allerdings, dass bei der regenerativen Stromerzeugung wie allgemein üblich ein Wirkungsgrad von 100 % ange-

nommen wird [LBST 2013]. Daher kommt bei Elektroautos nur der direkte Energieverbrauch einschließlich der Ladungsverluste zum Tragen. Biokraftstoffe der 2. Generation liegen in Bezug auf den Primärenergieverbrauch leicht besser als PtL und PtG-Methan. Überraschenderweise schneiden Brennstoffzellenfahrzeuge, die Wasserstoff nutzen, primärenergetisch annähernd gleich ab wie Plug-In-Hybride. Hierbei kommt der hohe Primärenergiebedarf für die Herstellung von BtL und PtL zum Tragen (Annahme: 25 % nicht elektrischer Fahranteil).

### Luftschadstoffe

Im Jahr 2050 werden aufgrund der gesetzlichen Emissionsvorschriften für alle Verkehrsmittel die direkten  $\text{NO}_x$ -, HC- und Partikel-Emissionen von Verbrennungsmotoren niedriger liegen als heute. Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge haben zudem den Vorteil, dass sie im Fahrbetrieb keine Luftschadstoffe verursachen; aufgrund der Minderung der Abgase bei konventionellen Verbrennungsmotoren wird ihr Vorsprung aber geringer. Bei Flugzeugen können nur Maßnahmen am Triebwerk selbst zur Reduzierung von Emissionen führen (Ponater et al. 2006). Für Schiffe gibt es erst seit wenigen Jahren gesetzliche Vorschriften zur Luftreinhaltung, so dass hier Emissionsminderungen bis 2050 geringer ausfallen werden als bei anderen Verkehrsträgern.

Abbildung 37: Versauerungswirkung durch  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen (berechnet in  $\text{SO}_2$ -Äquivalenten) für die Herstellung von konventionellen Kraftstoffen, Biokraftstoffen sowie stromgenerierten Kraftstoffen aus erneuerbarer Energie (WTT-Betrachtung)



[eigene Darstellung; Daten: LBST 2013; Müller-Langer 2011]

Die direkten Luftschadstoffemissionen werden an Bedeutung verlieren. Eine größere Rolle spielen künftig die indirekten Luftschadstoffemissionen (Well-to-Tank-Emissionen) aus der Herstellung postfossiler Kraftstoffe. Strom und strombasierte Kraftstoffe besitzen gegenüber Biokraft-

stoffen der 2. Generation (Zellulose-Ethanol, BtL und Bio-SNG) klare Vorteile bei den Luftschadstoffemissionen. Abbildung 37 zeigt dies beispielhaft für die durch  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen verursachte Versauerungswirkung (berechnet in  $\text{SO}_2$ -Äquivalenten) [LBST 2013; Müller-Langer 2011]. Für den Vergleich wurde unterstellt, dass ausschließlich EE-Strom zur Erzeugung der stromgenerierten Kraftstoffe genutzt wird. Bei den Biokraftstoffen der 2. Generation wurde von bereits optimierten Produktionsanlagen ausgegangen [Müller-Langer 2011]. Für Benzin und Diesel wurden heutige Werte herangezogen.

Das Bild der Versauerungswirkung gilt für andere Luftschadstoffe oder andere Wirkkategorien (z. B. Eutrophierung) in ähnlicher Form. Bei den direkten Wirkungen sind die Unterschiede der postfossilen Energieversorgungsoptionen gering, auf Seite der Kraftstoffherstellung dagegen deutlich.

Berücksichtigt man Herstellung und Nutzung der Kraftstoffe im Fahrzeug, schneiden Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge generell am günstigsten ab. Bei Verbrennungsmotoren sind strombasierte Kraftstoffe klar im Vorteil gegenüber Biokraftstoffen der 2. Generation. Sie sind derzeit sogar ungünstiger als Benzin oder Diesel. Unberücksichtigt in diesem Vergleich sind mögliche Luftschadstoffemissionen aus der Herstellung der Fahrzeuge selbst. Hierzu gibt es Verkehrsmittel-übergreifend keine geeigneten Studien.

### **Ressourcenverbrauch**

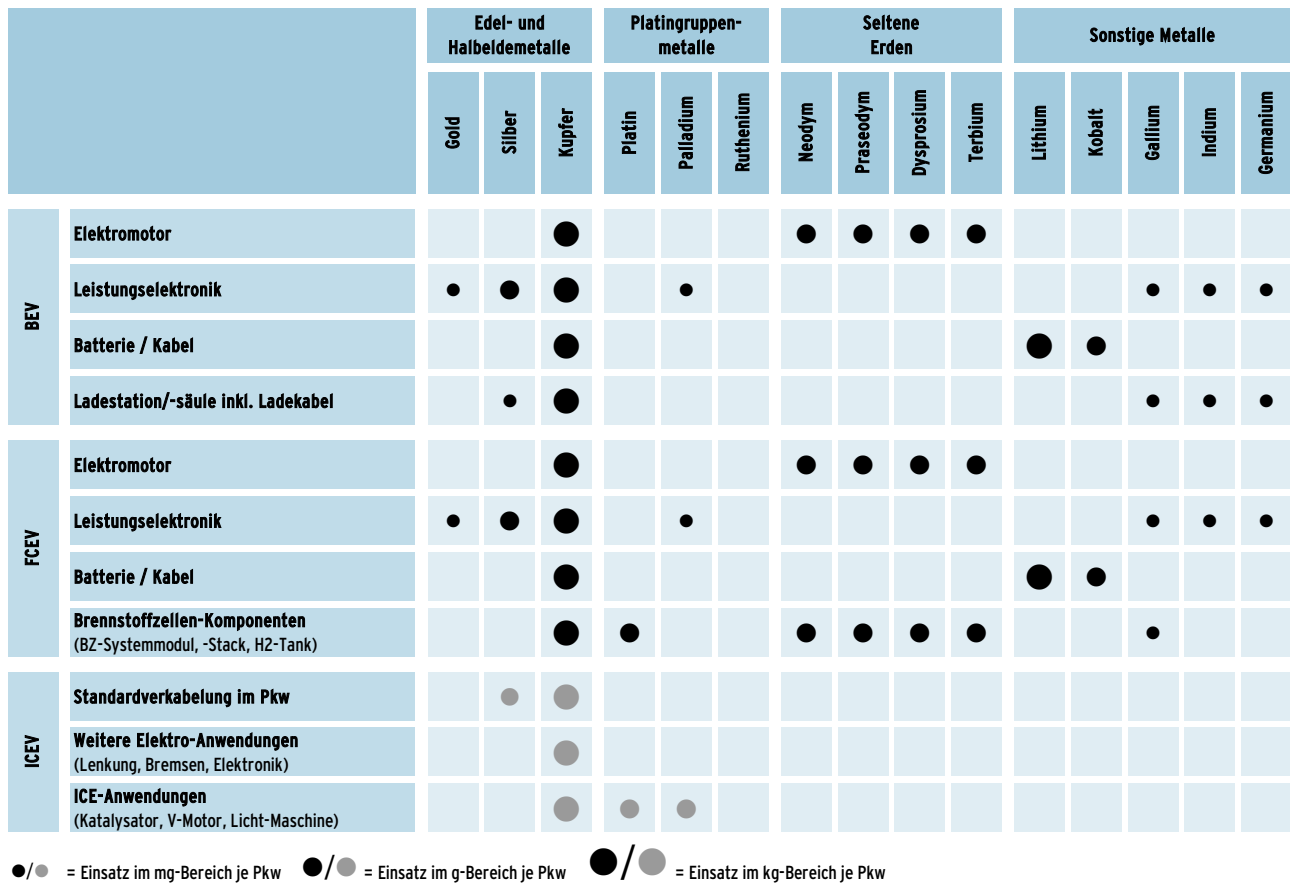
Die Herstellung von Verkehrsmitteln verbraucht beachtliche Ressourcen. Da Fahr- und Flugzeuge immer leichter werden müssen, wird Stahl durch Aluminium, Magnesium, Titan oder kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) ersetzt [e-mobil BW et al. 2013a]. Auch bei Antriebsstrang und Komponenten ändern sich die Materialien. Dominieren bei Verbrennungsmotoren vor allem Kupfer und Platingruppenmetalle, werden durch Elektromotoren, Batterien und Brennstoffzellen bisher im Bau von Fahrzeugen nicht eingesetzte Metalle und Seltene Erden, teilweise in bedeutenden Mengen, nachgefragt (siehe Abbildung 38).

Grundsätzlich verursacht die Primärproduktion von Metallen bei Förderung, Anreicherung und metallurgischer Umsetzung zum Teil erhebliche Umweltauswirkungen. Das gilt insbesondere für Platingruppenmetalle [Öko-Institut 2011a], die vor allem in Abgaskatalysatoren und in Brennstoffzellen zum Einsatz kommen [Haan/Zah 2013]. In der Vergangenheit wurde allerdings das Recycling von Abgaskatalysatoren ausgebaut und die Metallmenge pro Katalysator reduziert, so dass der Bedarf an Primärmetall und damit die herstellungsbedingten Umweltbelastungen wie Luftschadstoffe deutlich gemindert werden konnten [Hagelücken et al. 2005].

Bei der Elektromobilität sind der Bedarf an Seltenen Erden für die Permanentmagneten in Elektromotoren und der Verbrauch an Lithium für die Batterien kritische Aspekte [Haan/Zah 2013]. Seltene Erden kommen meist in Kombination mit radioaktiven Nukliden wie Thorium vor, so dass ihr Abbau mit besonderen Risiken für Mensch und Umwelt verbunden ist. Ein Ersatz dieser Materialien dürfte allerdings nur sehr beschränkt möglich sein, da nur in seltenen Fällen Ersatzmaterialien zur Verfügung stehen [Öko-Institut 2011a].

Allerdings können die Umweltbelastungen deutlich sinken, wenn entsprechende Recyclingverfahren für Batterien und Elektromotoren aufgebaut und etabliert werden [Öko-Institut 2011a und b]. Als Folge wären der zusätzliche Bedarf an kritischen Metallen und Seltenen Erden und die damit verbundenen Umweltfolgen nicht entscheidend für die Auswahl der ökologischsten postfossilen Energieversorgungsoption im Jahr 2050. Bedeutender ist eher die Frage der Versorgungssicherheit. Seltene Erden werden derzeit ausschließlich in China gefördert, so dass es trotz großer globaler Reserven temporär kurz- bis mittelfristig zu Versorgungsengpässen kommen kann [Öko-Institut 2011a].

Abbildung 38: Bedarf an wichtigen und kritischen Metallen für Elektro-Pkw und Pkw mit Verbrennungsmotor



●/● = Einsatz im mg-Bereich je Pkw ●/● = Einsatz im g-Bereich je Pkw ●/● = Einsatz im kg-Bereich je Pkw

Schwarz = Elektrofahrzeuge (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) Grau = Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICEV)

[eigene Darstellung basierend auf Öko-Institut 2011a]

Die steigende Lithiumnachfrage gilt hingegen kurz- und mittelfristig als gedeckt. Nur bei einem weltweit stark steigenden Absatz an Elektrofahrzeugen könnte es zu Lieferengpässen kommen, so dass neue Reserven erschlossen werden müssten [Haan/Zah 2013]. Brennstoffzellenfahrzeuge haben im Vergleich verschiedener Elektro-Pkw-Konzepte den größten Verbrauch an kritischen Materialien, da sie neben Seltenen Erden zusätzlich auch Platingruppenmetalle verbaut haben. Soll langfristig der Ressourcenverbrauch minimiert und die Versorgungssicherheit erhöht werden, wären Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb verglichen mit rein batterieelektrischen Fahrzeugen daher leicht im Nachteil.

Seltene Erden kommen aber nicht nur zum Bau von Elektromotoren zum Einsatz; eines der Haupteinsatzfelder sind auch die Permanentmagnete in Windkraftanlagen. Damit wird durch die Nutzung von regenerativem Strom für die Mobilität auch indirekt eine Nachfrage nach kritischen Metallen ausgelöst. Je geringer der Wirkungsgrad der Nutzung des regenerativen Stroms, desto größer der Bedarf. Daher spricht auch der Verbrauch kritischer Metalle für die Stromerzeugung dafür, den Strom so effizient wie möglich und damit möglichst direkt zu nutzen.

### Lärm

Verkehr verursacht Lärm. Erdgasmotoren sind deutlich leiser als Dieselmotoren. Zurückzuführen ist dies auf die höhere Klopfestigkeit des Gases und die dadurch höhere Laufruhe [Erdgas mobil 2012]. Auch Gasmotoren mit PtG-Methan und Bio-SNG werden gegenüber Verbren-

nungsmotoren, die Flüssigkraftstoffe verwenden, leiser sein. Noch leiser sind Elektromotoren. Sie sind beim Faktor Lärm auch gegenüber modernsten Verbrennungsmotoren deutlich im Vorteil.

Der Motor ist aber nur eine der möglichen Lärmquellen von Fahrzeugen. Bei Autos ist der Antrieb nur bis 25 km/h, bei Lkw und Bussen bis 50 km/h für den von ihnen erzeugten Lärm bestimmend, bei höherer Geschwindigkeit dominieren die Reifen-Fahrbahn-Geräusche und bei noch deutlich höheren Geschwindigkeiten die aerodynamischen Geräusche. Daher sind batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge bei höheren Geschwindigkeiten vergleichbar laut wie konventionelle Fahrzeuge. Bei Elektrofahrzeugen ist zudem zu beachten, dass die Leistungselektronik nicht geräuschlos ist – auftretende hohe Pfeiftöne können als sehr störend empfunden werden [UBA 2013b]. Lärminderung ist daher nicht allein mit Hilfe elektrischer Antriebe zu erreichen, hierzu sind weitergehende planerische, infrastrukturelle und technologische Maßnahmen notwendig [UBA 2013b].

Bei Flugzeugen entsteht Lärm im Wesentlichen durch die Triebwerke und die Luftumströmungen von Rumpf und Flügeln während des Fluges. Die Lärmemissionen der Triebwerke sind vor allem beim Start dominierend und werden auch durch postfossiles BtL, PtL und LH<sub>2</sub> nicht verändert. Ob konventionelle Flugzeuge mit elektrischem Antrieb deutlich geringere Lärmemissionen verursachen würden, muss sich in Zukunft noch zeigen. Daher muss davon ausgegangen werden, dass keine der postfossilen Optionen gegenüber Flugzeugen mit Kerosin wesentliche Lärminderungen bringen wird.

### **Wasserverbrauch**

Bei der Herstellung strombasierter Kraftstoffe wird für die Elektrolyse Wasser benötigt. Pro t Wasserstoff werden rund 8,8 t Wasser verbraucht, bezogen auf den Energieinhalt entspricht das 0,07 kg Wasser pro MJ erzeugter Wasserstoff [Otten 2013]. Wird der Wasserstoff in PtL oder PtG-Methan umgesetzt, fällt allerdings Wasser als Reaktionsprodukt an. Für die Herstellung von PtG-Methan werden somit netto rund 2,6 t Wasser pro t Endprodukt benötigt, das entspricht grob 0,06 kg pro MJ Methan [Otten 2013]. Bei Großanlagen mit Jahresmengen von 220 Mio. m<sup>3</sup> Wasserstoff bzw. 60 Mio. m<sup>3</sup> Methan [DVGW 2013] liegt der jährliche Wasserbedarf bei 120.000 bis 180.000 m<sup>3</sup>. Werden solche Anlagen in ariden Gebieten geplant, kann der zusätzliche Wasserbedarf durchaus eine relevante Größe darstellen und muss kritisch im Gesamtkontext der Klima- und Umweltauswirkungen bewertet werden.

Demgegenüber haben andere postfossile Alternativen klare Vorteile. Rein batterieelektrische Fahrzeuge benötigen zur Herstellung des Fahrstroms kein zusätzliches Wasser. Biokraftstoffe der 2. Generation, die Holz und Stroh als Ausgangsstoffe nutzen, weisen ebenfalls keinen relevanten zusätzlichen Wasserverbrauch auf (siehe auch Kapitel 4).

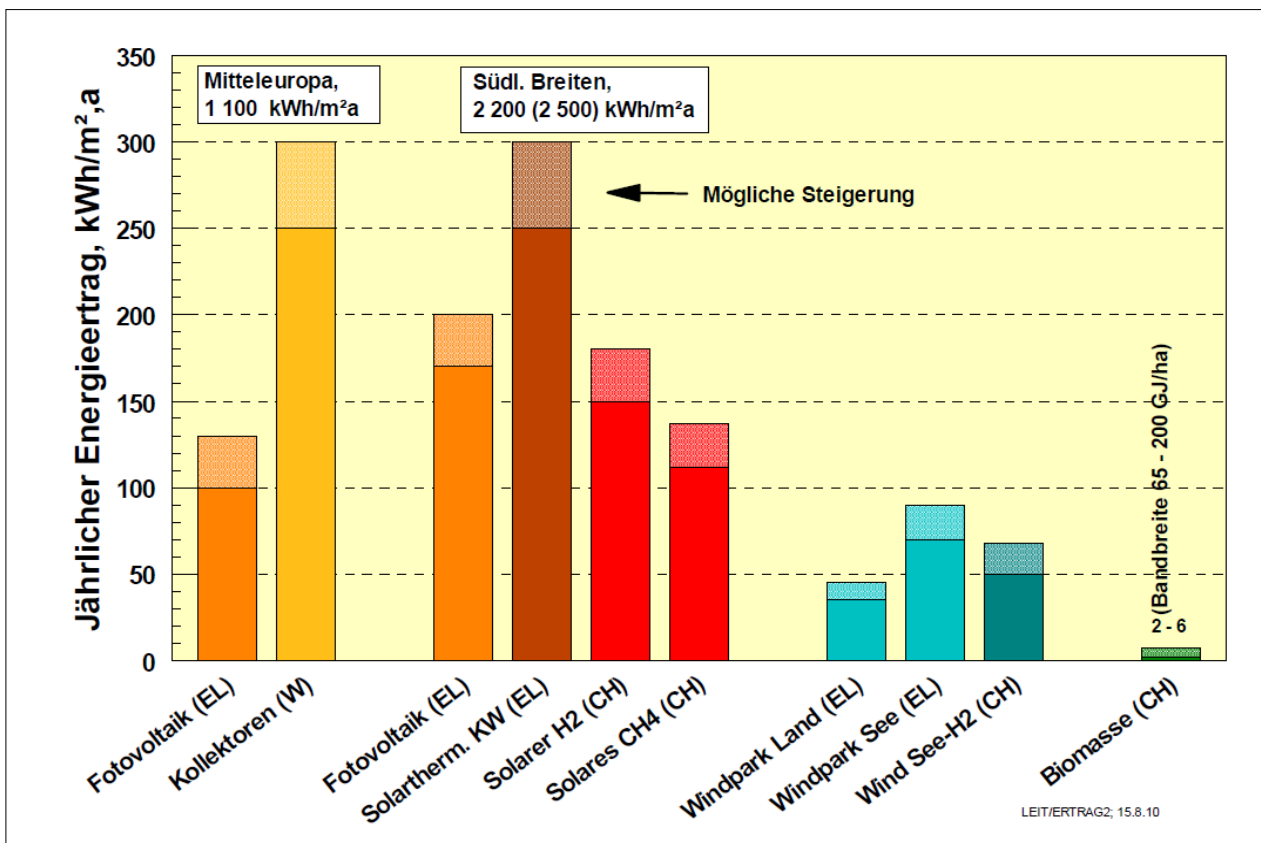
### **Flächenbedarf und Flächenkonkurrenz**

Der Anbau von Biomasse und Anlagen zur Produktion von Kraftstoffen oder Strom benötigen Fläche. Bei technischen Anlagen ist der Flächenbedarf allerdings beschränkt: Eine Elektrolyseanlage mit einer elektrischen Leistung von 3 MW (rund 600 m<sup>3</sup> Wasserstoff/h) hat einen Flächenbedarf von rund 3.000 m<sup>2</sup> [Müller-Syring/Henel 2011]. Die Power-to-Gas-Versuchsanlage in Werlte mit einer elektrischen Leistung von 6.3 MW benötigt 2000 m<sup>3</sup> Fläche und produziert rund 1.000 t Methan pro Jahr - eine ähnliche Größenordnung gilt für vergleichbare PtL-Anlagen. In Zukunft dürfte sich bei Großanlagen der spezifische Flächenverbrauch weiter reduzieren lassen.



Deutlich relevanter ist der Flächenbedarf für die Erzeugung von erneuerbarem Strom sowie von Biomasse für Biokraftstoffe der zweiten Generation. Die flächenspezifischen Energieerträge sind bei der Erzeugung von regenerativem Strom am größten (siehe Abbildung 39). Das bedeutet: Wird EE-Strom direkt in batterieelektrischen Pkw eingesetzt, ist der Flächenbedarf für die Erzeugung der benötigten Elektrizität am geringsten. Bei der Herstellung von strombasierten Kraftstoffen geht Energie verloren, daher nehmen hier die Flächenerträge deutlich ab - von PtG-Wasserstoff über PtG-Methan bis zu PtL. Dennoch liegen die Flächenerträge, unabhängig, ob Photovoltaik oder Windkraft eingesetzt wird, über denen der Biomassenutzung. Somit haben Strom und strombasierte Kraftstoffe deutliche Vorteile gegenüber Biokraftstoffen.

Abbildung 39: Typische flächenspezifische Energieerträge von erneuerbarer Primärenergien



[DLR et al. 2012]

Dass der Flächenverbrauch eher eine Randgröße ist, zeigt auch der internationale Blick: Würde der globale Energieverbrauch des Verkehrs in Höhe von 100 bis 170 EJ mit PtG-Methan aus Windstrom gedeckt, läge der Flächenbedarf für die Stromerzeugung bei 0,397 bis 0,675 Mio. km<sup>2</sup>. Das sind 0,3 bis 0,5 % der Landfläche der Erde. Bei direkter Nutzung von Strom oder von PtG-Wasserstoff wäre der Wert noch geringer, bei ausschließlicher Verwendung von PtL geringfügig höher. Eine Versorgung des Verkehrs mit Strom und strombasierten Kraftstoffen würde also nicht an Flächenrestriktionen scheitern. Wie in Kapitel 3 ausgeführt, sind hingegen die Biokraftstoffe der 2. Generation mengenmäßig aufgrund der begrenzten Menge an Holz und Stroh global auf maximal 18 EJ beschränkt [IEA 2010].

Die Verwendung von Anbaubiomasse und damit von Biokraftstoffen der ersten Generation, die zum Anbau landwirtschaftliche Nutzfläche benötigt, ist für eine möglichst treibhausgasneutrale Mobilität 2050 ausgeschlossen (siehe Kapitel 4.2). Demgegenüber steht der zusätzliche Flächenbedarf für die Stromerzeugung bzw. die Gewinnung von Holz und Stroh weder in Konkurrenz

zu landwirtschaftlichen Nutzflächen noch zur Nahrungsmittelproduktion. Grundsätzlich gilt dies für alle der ausgewählten postfossilen Energieversorgungsoptionen. Ob allerdings der Flächenverbrauch der postfossilen Energieversorgungsoptionen geringer oder höher ausfällt als der von konventionelle Kraftstoffen wie Benzin, Diesel oder Kerosin ist kaum zu sagen, da eine gegenüberstellende Flächenbilanzierung bisher noch nicht durchgeführt wurde.

### **Biodiversität**

Der Ausbau der erneuerbaren Energien wie Wind- und Wasserkraft oder Photovoltaik kann zu Beeinträchtigung von natürlichen Lebensräumen führen. Damit kann die Nutzung von Strom und strombasierten Kraftstoffen sich theoretisch auch negativ auf die weltweite Biodiversität auswirken. Allerdings können durch gezielte Standortwahl die Auswirkungen minimiert werden.

Wie in Kapitel 4 bereits ausgeführt, darf für die Herstellung von Biokraftstoffen der 2. Generation bei der Nutzung von Restholz als auch von Reststroh bzw. Präriegras der Biomasseentzug nicht so hoch sein, dass er negative Auswirkungen auf die Biodiversität hat [Zah et al. 2010]. Dies muss beispielsweise durch eine nachhaltige Forstwirtschaft erreicht werden, was aber durch entsprechende Überwachungsmaßnahmen auch abgesichert werden muss. Für die Herstellung der Biokraftstoffe sollte auch nur das Restholz eingesetzt werden, das stofflich nicht genutzt werden kann.

Allerdings muss dabei auch betrachtet werden, dass die Auswirkungen der zur Auswahl stehenden postfossilen Energieversorgungsoptionen im Vergleich zu den teilweise massiven Eingriffen in die Natur durch die Förderung, den Transport und die Gewinnung von fossilen Kraftstoffen trotzdem geringer ausfallen dürften [Haan/Zah 2013]. Die Vorteile sind dabei bei Nutzung von regenerativem Strom und damit hergestellten Kraftstoffen sicher höher als bei Biokraftstoffen der 2. Generation.

## **6.2 Weitere ökonomische Aspekte**

Die Ausstattung von Straßen mit Oberleitungen, der Aufbau von Gas- und Wasserstofftankstellen sowie von Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge erfordert hohe Investitionen. Wie hoch die Kosten konkret ausfallen, hängt unter anderem davon ab, wie hoch die Marktdurchdringung einer Technologie im Jahr 2050 ist. Wird Wasserstoff nur für Pkw oder auch für Lkw genutzt? Sind Autos mit Brennstoffzellen lediglich eine Ergänzung zu batterieelektrischen Pkw oder die Hauptoption? Ist ein flächendeckendes Netz an Wasserstofftankstellen notwendig oder genügen Tankstellen entlang von Autobahnen?

Da die Höhe der Investitionskosten von der Dichte der notwendigen Infrastruktur abhängt und die Kosten pro Fahrzeug-km von der Anzahl der Nutzer, können seriöse Schätzungen nur im Zusammenhang mit Einführungsszenarien ermittelt werden. Dies war jedoch nicht Ziel dieser Studie. Zudem ist die Ermittlung der Infrastrukturkosten mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da keine verlässlichen Erfahrungswerte vorliegen. Bei den heute bestehenden bzw. in Bau befindlichen rund 15 Wasserstofftankstellen in Deutschland handelt es sich beispielsweise durchweg um Pilot- und Demonstrationsvorhaben [e-mobil BW 2013b]. Diese Studie kann daher nur Anhaltspunkte liefern.

### **Tankstellen- und Ladeinfrastruktur**

Für Drop-in-Kraftstoffe wie Zellulose-Ethanol, BtL oder PtL kann die derzeitige Tankstelleninfrastruktur ohne Veränderungen weiter genutzt werden. Für Bio-SNG oder PtG-Methan gilt das nicht. Bundesweit gibt es rund 900 Erdgas-Tankstellen [BVR 2013], wobei die Kosten pro Tank-

stelle mit 200.000 bis 250.000 € beziffert werden, bei Bustankstellen je nach Flottengröße ein Mehrfaches davon.<sup>12</sup> Diese Kosten dürften auf Bio-SNG oder PtG-Methan übertragbar sein. Allerdings ist bei einer weiten Verbreitung dieser Kraftstoffe und steigendem Bedarf an Tankstellen mit sinkenden Kosten zu rechnen.

Die Kosten für Wasserstofftankstellen für Pkw und Lkw werden heute mit rund 650.000 bis 700.000 € beziffert. Bei steigendem Bedarf an Wasserstoff könnten sich diese Ziffern in etwa halbieren. Für Busse werden Kosten von lediglich 260.000 € erwartet, da der Wasserstoff nur auf 350 statt auf 700 bar komprimiert werden muss [FGH-ISI/LBST 2010]. Damit sind Wasserstofftankstellen weit teurer als Gastankstellen, die Differenz wird aber mit wachsendem Ausbau kleiner.

Müssten alle Tankstellen in Deutschland auf Wasserstoff umgestellt werden, wären die Kosten enorm hoch. Entscheidend für den Vergleich der postfossilen Energieversorgungsoptionen ist aber der Bezug der Kosten auf die verkaufte Menge Wasserstoff. Pro kWh Wasserstoff würden Kosten zwischen 0,02 bis 0,03 € entstehen. Bezogen auf die Produktionskosten von Wasserstoff, wie sie in dieser Studie verwendet werden (rund 0,09 bis 0,14 €/kWh), würde dies einen Preiszuschlag von 15 bis 30 % bedeuten [FHG-ISI/LBST 2010].

Für eine Wasserstoff-Versorgung wären drei Möglichkeiten denkbar [e-mobil BW 2013b]:

- Der Wasserstoff wird per Elektrolyse direkt auf dem Tankstellenareal erzeugt (so genannte On-site-Erzeugung). In diesem Fall entfallen zusätzliche Transportkosten, allerdings werden Flächen für die Elektrolyseanlagen benötigt, was in Innenstädten problematisch sein kann.
- Der Wasserstoff wird per Pipeline angeliefert. Für neue Pipelines entstehen Kosten von rund 0,02 €/kWh [FHG-ISI/LBST 2010].
- Der Wasserstoff wird per Lkw verflüssigt angeliefert, an der Tankstelle verdampft und anschließend komprimiert.

Die Gesamtkosten für die Verteilung des Wasserstoffs sowie die Kosten der Tankstelle liegen insgesamt bei rund 0,03 bis 0,04 €/kWh. Für Bio-SNG und PtG-Methan belaufen sich die Schätzungen hingegen auf rund die Hälfte. Abbildung 40 zeigt den Kostenvergleich für den Lkw-Fernverkehr. Die Berücksichtigung möglicher Tankstellenkosten macht gasförmige Kraftstoffe gegenüber flüssigen deutlich teurer. Insbesondere der Kostenvorteil von Brennstoffzellen-Lkw bei Anschaffung und Energie ginge verloren. Hierbei handelt es sich allerdings um grobe Abschätzungen, verallgemeinernde Schlussfolgerungen können daraus nicht gezogen werden. Sicher ist, dass alle Optionen, die eine Wasserstoffinfrastruktur voraussetzen, mit Zusatzkosten verbunden sind. Um diese genauer zu identifizieren, besteht weiterer Forschungsbedarf.

Auch für Elektrofahrzeuge ist eine zusätzliche Infrastruktur notwendig. Nach FGH-ISI/LBST (2010) liegen die Kosten für Pkw-Ladestationen zwischen 200 und 1.250 € pro Fahrzeug, für Busse zwischen 1.000 bis 1.150 € pro Fahrzeug. Legt man für Pkw eine Jahresfahrleistung von 15.000 km, eine Lebensdauer von zwölf Jahren und einen Verzinsungsfaktor von 4 % zugrunde, ergeben sich jedoch Kosten von unter 0,01 €/km. Daher sind die Kosten für die Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen in den meisten Fällen eher vernachlässigbar.

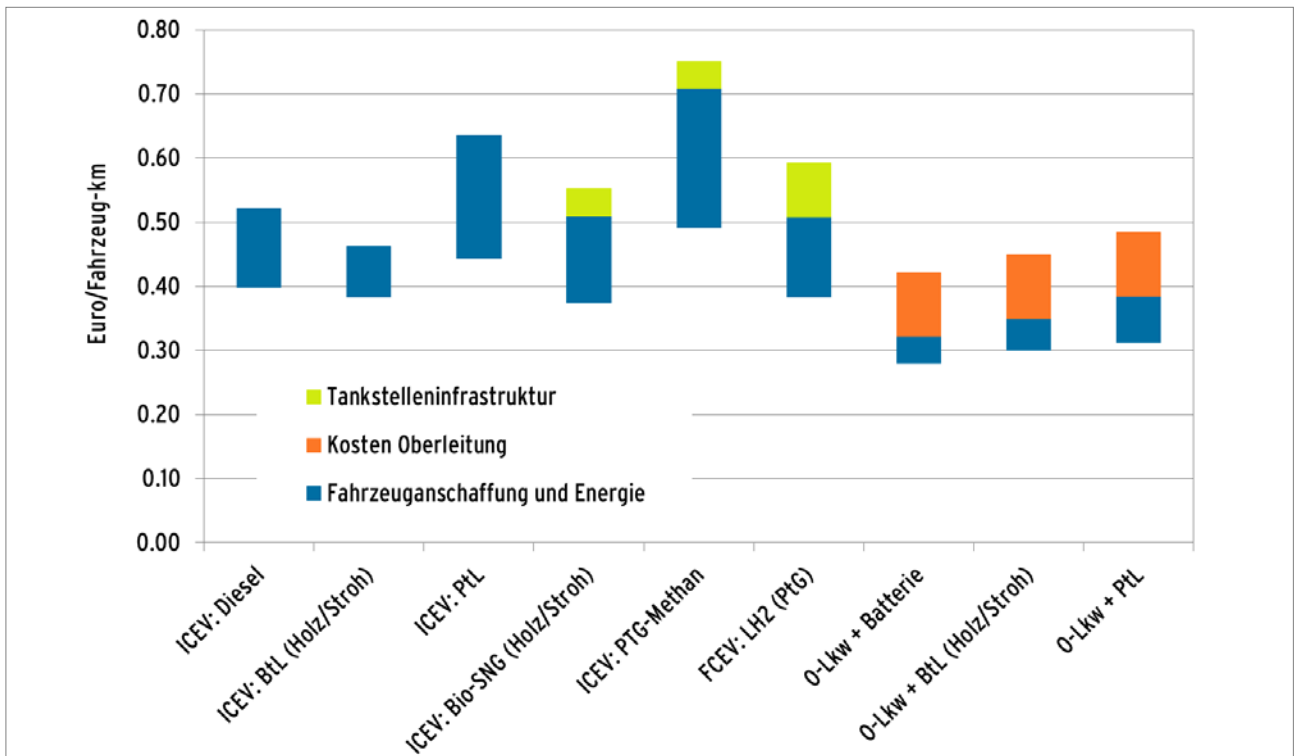
Bei Bussen, die Schnellladesysteme nutzen, könnte das anders aussehen. Wird die Batterie induktiv geladen, wie dies derzeit in Braunschweig, Berlin und Mannheim getestet wird, muss

---

<sup>12</sup> Siehe: [www.erdgas-mobil.de/tankstellenbetreiber/installation-wartung](http://www.erdgas-mobil.de/tankstellenbetreiber/installation-wartung) (Abruf: 3.2.2014).

pro Ladestation mit Kosten von 100.000 bis 150.000 Euro gerechnet werden. In Braunschweig werden eine Ladestation im Busdepot und drei Ladestationen entlang der 12 km langen Linie eingesetzt [INFRAS 2014]. Welche Kosten sich dabei pro Fahrzeug-km ergeben, ist noch nicht abschätzbar. Erfolgt die Schnellladung der Busse im Netz oder per Oberleitung, liegen die Kosten deutlich niedriger [INFRAS 2014]. Bei Schnellladesystemen werden also die niedrigeren Batteriekosten durch die aufwändigere Ladeinfrastruktur teilweise kompensiert.

Abbildung 40: Bandbreite der spezifischen Kosten für Fahrzeuganschaffung, Kraftstoffe, Oberleitungen und Tankstelleninfrastruktur für einen 40-t-Lkw im Fernverkehr im Jahr 2050 (ohne MwSt. und Energiesteuern, zu Preisen von 2010)



[eigene Darstellung]

### Oberleitungen

Busse oder Lkw können mit Strom direkt aus einer Oberleitung versorgt werden. Oberleitungen für Autobahnen kosten nach Schätzungen des Sachverständigenrats für Umweltfragen 1,1 bis 2,5 Mio. € pro Kilometer [SRU 2012]. Für das gesamte Autobahnnetz (rund 13.000 km) ergäben sich damit Gesamtinvestitionskosten von rund 32,5 Mrd. €. Unterstellt man eine Lebensdauer von 20 Jahren, einen Zinsfaktor von 4 % sowie jährliche Wartungskosten von 5 %, belaufen sich die jährlichen Gesamtkosten auf rund 2,5 Mrd. €. Da Lkw über 12 t zGG rund 50 Mrd. km auf deutschen Autobahnen zurücklegen, würden sich ohne Berücksichtigung der Fahrzeuggröße Kosten von rund 0,05 € pro Lkw-km ergeben. Da davon auszugehen ist, dass nicht jeder Lkw auf der Autobahn Oberleitungen nutzen wird und schwere Lkw (40-t-Lkw) vermutlich höher bepreist werden, liegen die Zusatzkosten dann bei rund 0,10 € pro Lkw-km (siehe Abbildung 40). Dennoch würde der O-Lkw im Vergleich mit anderen postfossilen Energieversorgungsoptionen seine relativ günstige Position halten.

Auch bei den Oberleitungen ergibt sich für Busse ein anderes Bild. Da O-Busse eine weit geringere Jahresfahrleistung haben als Lkw, liegen die Kosten pro Bus-Kilometer höher. Für die Verkehrsbetriebe Basel zeigen eigene Analysen, dass die spezifischen Kosten für Oberleitungen bei

Bussen erheblich sein können [INFRAS 2006]. Detaillierte Berechnungen für eine Streckenerweiterung ergeben Kosten von rund 1,00 € pro Bus-km. Schweizer Verkehrsunternehmen suchen daher nach Alternativen zu reinen Oberleitungsbussen [INFRAS 2014]. Ein Weg wäre die Ausstattung der Busse mit Batterien, um Teilstrecken oberleitungsfrei zurücklegen zu können. Beispielrechnungen im Rahmen des Projektes „TrolleyPlus“ in Esslingen zeigen, dass bei einer 14 km langen Linie mit einem 6 km langen oberleitungsfreien Anteil die Anfangsinvestitionen für die Infrastrukturanlagen um mehr als 40 % gesenkt werden können [Soffel 2012].

### **6.3 Technische, infrastrukturelle und systemische Aspekte**

Technische, infrastrukturelle und systemische Aspekte sind nicht ohne weiteres quantifizierbar. Aber auch nur qualitativ können sie für eine Gesamtbewertung von Bedeutung sein. So kann eine ökologische wie ökonomisch vorteilhafte Option einen so großen Anpassungsbedarf bei Fahrzeugen, Tankstellen und Verkehrsinfrastruktur nach sich ziehen, dass Zweifel an deren Realisierungschancen bestehen. Auch hängt die Realisierung einer Option davon ab, ob diese schnell genug umgesetzt werden kann. Entscheidend ist daneben, ob sie systemisch in die Konzepte anderer Länder passt, denn Lösungen allein für Deutschland sind insbesondere bei Flugzeug und Schiff, aber auch im Lkw-Fernverkehr schwer vorstellbar.

#### **Infrastruktureller Anpassungsbedarf**

Neben den Folgekosten durch Tankstellen- und Ladeinfrastruktur sowie durch Bau und Unterhalt von Oberleitungen spielt die notwendige Anpassung an Versorgungsnetze und auf Fahrzeugseite eine wichtige Rolle. Abbildung 41 gibt beispielhaft einen Gesamtüberblick zum Anpassungsbedarf der einzelnen Energieversorgungsoptionen bei Bussen. In der Regel ist eine Umstellung der Fahrzeugflotte notwendig. Da Brennstoffzellenfahrzeuge wie auch Elektrobusse bisher lediglich als Vorserienfahrzeuge verfügbar sind, ist der Umstellungsbedarf hier am größten. Auch bei der Tankstellen- bzw. Ladeinfrastruktur sind erhebliche Anpassungen notwendig. Bei Brennstoffzellenbussen muss in der Regel zudem ein neues Verteilsystem für Wasserstoff aufgebaut werden.

Anders ist die Situation bei den Flüssigkraftstoffen BtL und PtL. Hier besteht weitgehend kein Anpassungsbedarf. Bei PtL besteht indirekt ein Anpassungsbedarf bei den Stromnetzen, um die erzeugte regenerative Energie zu den Produktionsanlagen leiten zu können. Diese Anpassung ist allerdings auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen Gesellschaft 2050 zwingend notwendig und kann nicht zwangsläufig allein der Erzeugung der stromgenerierten Kraftstoffe zugerechnet werden. Geringe Anpassungen ergeben sich bei den gasförmigen Kraftstoffen Bio-SNG und PtG-Methan sowie beim Einsatz von Oberleitungsbussen.

Ein höherer Umstellungsaufwand muss sich aber nicht zwangsläufig auch in wesentlich höheren Kosten niederschlagen (siehe Kapitel 6.2). Er kann aber die Realisierung einer Option erschweren und wirkt daher als Umsetzungshemmnis.

Abbildung 41: Übersicht der Fahrzeug- und Versorgungsinfrastrukturen postfossiler Energieversorgungsoptionen bei Bussen

	Anpassungsbedarf					
	Fahrzeuge	Tankstellen- infrastruktur	Lade- infrastruktur Batterien	Versorgung (Strom/Gas)	Verkehrs- Infrastruktur (Oberleitungen)	Gesamt- bewertung
ICEV: BtL (Holz/Stroh)	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf
ICEV: PtL	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf (Strom)	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf
ICEV: Bio-SNG (Holz/Stroh)	geringer Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf
ICEV: PtG-Methan	geringer Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf (Strom)	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf
FCEV: GCH2 (PtG)	geringer Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf (Strom + Gas)	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf
BEH: Standardlader	geringer Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf (Strom)	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf
BEH: Schnelllader	geringer Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf (Strom)	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf
O-Bus	geringer Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf (Strom)	geringer Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf
O-Bus + Batterie	geringer Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	kein Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf (Strom)	geringer Anpassungsbedarf	geringer Anpassungsbedarf

**Legende:**

<span style="display:inline-block; width:20px; height:10px; background-color:#90EE90; border:1px solid black;"></span> kein Anpassungsbedarf	<span style="display:inline-block; width:20px; height:10px; background-color:#FFDAB9; border:1px solid black;"></span> geringer Anpassungsbedarf	<span style="display:inline-block; width:20px; height:10px; background-color:#FFA07A; border:1px solid black;"></span> grösserer Anpassungsbedarf
--	--	---

[eigene Darstellung]

### Realisierungschancen

Postfossile Energieversorgungsoptionen mit geringen Realisierungschancen bis 2050 wurden von der detaillierteren Analyse ausgeschlossen (z. B. Biokraftstoffe der 3. Generation, siehe Kapitel 4). Bei allen anderen stellt sich die Frage, ob sie bis 2050 so weit entwickelt sein werden, um sich spürbar im Markt zu etablieren.

Um diese Frage zu beantworten, muss zwischen den Produktionsverfahren der postfossilen Energieträger einerseits und den Antriebstechnologien andererseits unterschieden werden. Der Aufbau von Produktionsanlagen bis 2050 erscheint machbar und gilt nicht als Hürde. Bei Pkw, Lkw und Bussen entwickeln sich alternative Fahrzeugtechnologien schnell genug, um innerhalb der kommenden Jahrzehnte marktreif zu werden. Das gilt aber nicht für Schiffe und Flugzeuge. Bei Schiffen müsste der Umstieg zum Beispiel auf LNG frühzeitig erfolgen, um bis 2050 postfossile Optionen wie Bio-SNG oder PtG-Methan in ausreichendem Maß einsetzen zu können. Ob der aktuell langsam beginnende Einsatz von LNG in den Sulphur Emission Control Area (SECA) ausreicht, ist unklar. Im Flugzeugsektor ist zwar denkbar, dass die Entwicklung alternativer Konzepte wie Cryoplane oder elektrischer Hochgeschwindigkeitsmotoren forciert wird, aufgrund der langen Produktentwicklungszeiten und Lebensdauer von Flugzeugen ist es allerdings sehr unwahrscheinlich, dass diese Konzepte 2050 einen nennenswerten Anteil haben.

### Systemische Anschlussfähigkeit

Im Kontext der systemischen Anschlussfähigkeit sind zwei Dinge zu betrachten: Gibt es bereits heute Entwicklungen, die der Umsetzung der postfossilen Energieversorgungsoption behilflich sein können? Gibt es Umsetzungshemmnisse auf europäischer oder internationaler Ebene?

Grundsätzlich die größte Anschlussfähigkeit besitzen postfossile Optionen, die ohne Veränderungen in bestehenden Fahrzeugen eingesetzt werden können (siehe Abbildung 42), also für die Flüssigkraftstoffe Zellulose-Ethanol, Bio-SNG und PtL. Auch international würden diese Al-

alternativen auf keine Hemmnisse stoßen. Auch für gasförmige Kraftstoffe stehen prinzipiell geeignete Fahrzeuge zur Verfügung - eine Anschlussfähigkeit ist aber nicht zwangsläufig gegeben, da bei einigen Verkehrsträgern keine bzw. kaum Praxiserfahrungen vorliegen. Bei Schiffen werden derzeit zwar erste Gasantriebe (LNG) eingebaut, aber noch nicht im größeren Stil eingesetzt. Verschiedene Häfen beginnen aktuell auch die landseitige Versorgung für LNG aufzubauen. Gleiches gilt für den Einsatz von Gasen in Fernverkehrs-Lkw. Demgegenüber ist der Einsatz von Bio-SNG und PtG-Methan in Pkw, kleineren Nutzfahrzeugen und Bussen leichter anschlussfähig. Der Einsatz von Wasserstoff im Flugverkehr hingegen erfordert eine Neukonzeption von Flugzeugen; damit ist keinerlei Anschlussfähigkeit gegeben.

Batterieelektrische Fahrzeuge fahren heute schon auf Deutschlands Straßen – aber immer noch als große Ausnahme. Dennoch ist eine Anschlussfähigkeit gegeben: Konventionelle Antriebe werden hybridisiert, um den Kraftstoffverbrauch zu senken. Weltweit arbeiten Firmen und Forschungsinstitute an der Weiterentwicklung der Batterien, um deren Kapazitäten zu steigern und gleichzeitig die Kosten zu senken. Eine systemische Anschlussfähigkeit ist daher gegeben.

Die Nutzung von Strom per Oberleitung ist ein Sonderfall der Elektromobilität. Für Busse ist die Technik bereits weltweit im Einsatz, eine Anschlussfähigkeit wäre daher gegeben. Für Fernverkehrs-Lkw kommt diese Technik bislang nur in Sonderfällen zum Einsatz (z. B. Anbindung von Minen). Da Fernverkehr grenzüberschreitend erfolgt, müssten alle europäischen Länder die wichtigsten Verkehrsrouten elektrifizieren. Dies erscheint aus heutiger Sicht wenig wahrscheinlich. Einige Nationen wie die Schweiz setzen eher auf die Verlagerung der Transporte auf die Schiene, in anderen Ländern wäre die Elektrifizierung allein von Autobahnen nicht ausreichend, vielmehr müssten auch nachgeordnete Straßen mit Leitungen ausgerüstet werden. Eine systemische Anschlussfähigkeit von O-Lkw ist daher aus heutiger Sicht nicht gegeben.

Auch beim Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen mit PtG-Wasserstoff ist eine systemische Anschlussfähigkeit nicht gegeben. Brennstoffzellenfahrzeuge spielen in der Riege alternativer Antriebe eher eine untergeordnete Rolle, zudem scheint der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur nicht in greifbarer Nähe. Kurzstreckenflugzeuge können zwar mit Hilfe von Batterie und Brennstoffzelle elektrisch fliegen – doch auch diese Option koppelt weder national noch international an derzeitige konkrete Entwicklungen an.

Abbildung 42: Überblick über die systemische Anschlussfähigkeit der postfossilen Energieversorgungsoptionen nach Art des Verkehrsmittels

	Systemische Anschlussfähigkeit					
	Pkw	Lkw-Nahverkehr	Lkw-Fernverkehr	Bus	Flugzeug	Schiff
ICE: Flüssigkraftstoffe	ja	ja	ja	ja	ja	ja
ICE: Gasförmige Kraftstoffe	ja	ja	nein	ja	nein	nein
FCEV: PtG-Wasserstoff	nein	nein	nein	nein	nein	nein
BEH: Strom	ja	ja	ja	ja	nein	nein
Oberleitung: Strom			nein	nein		

**Legende:**

<span style="background-color: #90EE90; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span> Uneingeschränkt anschlussfähig	<span style="background-color: #E0E0E0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span> Weitgehend anschlussfähig	<span style="background-color: #A9A9A9; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span> keine Option
<span style="background-color: #FF8C00; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span> Nicht direkt anschlussfähig	<span style="background-color: #FFDAB9; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span> Bedingt anschlussfähig	

[eigene Darstellung]

## 7 Gesamtbewertung

In den beiden vorangegangenen Kapiteln wurden detailliert die verschiedenen postfossilen Energieversorgungsoptionen in Bezug auf ökologische, ökonomische, technische, infrastrukturelle und systemische Aspekte bewertet. In diesem Kapitel erfolgt nun die Gesamtbewertung für alle Optionen, die prinzipiell möglich und für eine postfossile Energieversorgung zukunftsfähig sind (siehe Abbildung 43).

Abbildung 43: Überblick über die möglichen postfossilen Energieversorgungsoptionen pro Verkehrsmittel im Jahr 2050

	Verkehrsmittel					
	Pkw	Lkw-Nahverkehr	Lkw-Fernverkehr	Linienbus	Flugzeug	Schiff
ICE: Ethanol (Holz/Stroh)	●					
ICE: BtL (Holz/Stroh)	●	●	●	●	●	●
ICE: PtL	●	●	●	●	●	●
ICE: Bio-SNG (Holz/Stroh)	●	●	●	●		●
ICE: PtG-Methan	●	●	●	●		●
ICE: PtG-Wasserstoff					○	
FC: PtG-Wasserstoff	●	●	●	●	○	○
Batterie: Regenerativer Strom	●	●		●		
Oberleitung: Regenerativer Strom			●	●		

● = mögliche Option; ○ = mögliche Option nur für Kurzstrecke oder Feederverkehr

ICE = Internal combustion engine; FC = Fuel cell.

[eigene Darstellung]

In diese Gesamtbetrachtung fließen alle Kriterien ein, die in den voran gegangenen Kapiteln detaillierter bewertet wurden. Mit zwei Ausnahmen: Zum einen wurde der Flächenverbrauch nicht berücksichtigt, da für einen Vergleich aller Optionen entsprechende Daten fehlen. Zum anderen wurde die Reichweite als zusätzliches Kriterium aufgenommen, um zu verdeutlichen, ob alle Varianten ausreichende Reichweiten ermöglichen. Die für die Bewertung letztendlich verwendeten Kriterien und deren Beschreibung finden sich in Tabelle 12.

Die Gesamtbewertung der einzelnen Verkehrsträger zeigt, ob die postfossile Energieversorgungsoption besser, deutlich besser, schlechter oder deutlich schlechter abschneidet als das heute übliche Fahrzeugkonzept (z. B. beim Pkw ein Benzin-Pkw). Teilweise lagen die Optionen bei der Bewertung sehr eng beieinander, so dass diejenigen Optionen, die am besten oder schlechtesten abschnitten, auch die besten oder schlechtesten Bewertungen bekamen – auch wenn der Abstand zwischen den Optionen gering war. Dies gilt insbesondere für die WTW-Treibhausgasemissionen.



Tabelle 12: Übersicht zu den Kriterien für die Bewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen

Bereich	Kriterium	Beschreibung
Ökologie	WTW-Treibhausgasemissionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>berücksichtigt werden die Emissionen bei der direkten Verbrennung (TTW), durch die Kraftstoffherstellung (WTT) sowie durch die Fahrzeugherstellung (siehe Kapitel 3.4 und 5)</li> </ul>
	Energieeffizienz Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>bewertet wird die Effizienz des Fahrzeuges gegenüber Referenz (siehe Kapitel 3.1)</li> </ul>
	Primärenergiebedarf (inkl. regenerativ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>berücksichtigt wird der WTW-Energiebedarf, also Endenergiebedarf sowie Energiebedarf für die Herstellung der Kraftstoffe (siehe Kapitel 6.1)</li> <li>die Bewertung erfolgt einschließlich des Verbrauchs an regenerativen Energien</li> </ul>
	WTW-Luftschadstoffemissionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>berücksichtigt werden die Emissionen bei der direkten Verbrennung (TTW) sowie durch die Kraftstoffherstellung (WTT) (siehe Kapitel 6.1)</li> </ul>
	Verbrauch kritischer Metalle	<ul style="list-style-type: none"> <li>in die Bewertung fließt ein, ob gegenüber dem Referenzfahrzeug ein neuer Verbrauch an kritischen Metallen entsteht (siehe Kapitel 6.1)</li> <li>durch das Schließen der Recyclingkreisläufe kann aber langfristig der Bedarf deutlich gesenkt werden</li> </ul>
	Zusätzlicher Wasserverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> <li>bewertet wird, ob ein zusätzlicher, erheblicher Wasserverbrauch bei der Kraftstoffherstellung auftritt (siehe Kapitel 6.1)</li> <li>es wird nicht bewertet, ob dieser Wasserverbrauch kritischer einzustufen ist als der bei der Herstellung der Referenzkraftstoffe</li> </ul>
	Lärmemissionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>da sich die Optionen in Bezug auf Reifen-Fahrbahn-Geräusche (dominierend bei hohen Geschwindigkeiten) nicht unterscheiden, wird nur die Lärmemission des Antriebes bewertet (siehe Kapitel 6.1)</li> <li>positiv wird nur bewertet, wenn die Lärmemissionen des Antriebes deutlich niedriger sind als die des Referenzfahrzeuges (z. B. bei Elektroantrieben gegenüber Dieselantrieb), die Emissionsvorteile von Gasmotoren bleiben daher unberücksichtigt</li> </ul>
	Konfliktpotential Biodiversität	<ul style="list-style-type: none"> <li>analog zum Wasserverbrauch wird nur bewertet, ob ein zusätzliches Konfliktpotential im Themenfeld Biodiversität entstehen kann (siehe Kapitel 6.1)</li> </ul>
Ökonomie	Kosten Fahrzeuge + Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>berücksichtigt werden ausschließlich die Kosten für Fahrzeuganschaffung sowie Energiekosten ohne MwSt. oder Energiesteuern (siehe auch Kapitel 3.5 und Kapitel 5)</li> </ul>
	Zusätzliche Infrastrukturkosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>hier wird berücksichtigt, ob gegenüber der Referenz mögliche zusätzliche Infrastrukturkosten mittelfristig entstehen können (siehe Kapitel 6.2)</li> <li>es wird hingegen nicht bewertet, ob diese Kosten langfristig tiefer oder höher liegen als die Kosten für die Referenzfahrzeuge</li> </ul>
Sonstige Kriterien	Reichweite	<ul style="list-style-type: none"> <li>falls gegenüber dem Referenzfahrzeug Reichweitenbeschränkungen vorliegen, wird dies hier ausgewiesen (siehe Kapitel 3.2)</li> </ul>
	Gesamtanpassungsbedarf	<ul style="list-style-type: none"> <li>dieses Kriterium bewertet gesamthaft, wie hoch der Anpassungsbedarf bei Fahrzeugen, Tankstellen- oder Ladeinfrastruktur, Verkehrsinfrastruktur und Versorgungsstruktur ist (siehe Kapitel 6.3)</li> </ul>
	Realisierungschancen bis 2050	<ul style="list-style-type: none"> <li>falls erheblicher Zweifel an der Realisierbarkeit der Option bis 2050 besteht, wird dies hier kenntlich gemacht (siehe Kapitel 6.3)</li> </ul>
	Systemische Anschlussfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>es werden nur die Optionen negativ bewertet, wenn sie keine direkte Anschlussfähigkeit an heutige Systeme oder Entwicklungen haben (siehe Kapitel 6.3)</li> </ul>

[eigene Zusammenstellung]



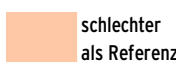

## 7.1 Pkw: Elektromobilität als Kernoption

Die Gesamtbewertung aller ökologischen, ökonomischen und sonstigen Aspekte zeigt die Abbildung 44 für den Pkw. Das Ergebnis ist relativ eindeutig. Die Elektromobilität stellt für den Pkw die Kernoption im Jahr 2050 dar. Nachteilig sind vor allem der Verbrauch an kritischen Metallen, der sich allerdings künftig durch verbesserte Recyclingkreisläufe reduzieren lässt, und der Anpassungsbedarf mit seinen Infrastrukturkosten. Das Ergebnis zeigt aber auch, dass selbst im Jahr 2050 rein batterieelektrische Fahrzeuge an Reichweitengrenzen stoßen. Sollen hohe Reichweiten erzielt werden, muss die Batterie so groß sein, dass sie sich negativ auf die Kostenbetrachtung auswirkt. Als zielführender Ausweg bieten sich Plug-In-Hybride (einschließlich Elektrofahrzeuge mit Range-Extender) an, die aber zusätzlich Flüssigkraftstoffe wie BtL oder PtL benötigen.

Abbildung 44: Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für den Pkw für das Jahr 2050

		Referenz: ICEV: Benzin	ICEV: Ethanol (Holz/Stroh)	ICEV: BtL (Holz/Stroh)	ICEV: PtL	ICEV: Bio-SNG (Holz/Stroh)	ICEV: PtG-Methan	FCEV: CGH2 (PtG)	BEV (Reichweite: 200 km)	BEV (Reichweite: 500 km)	PlugIn-EV (BtL)	PlugIn-EV (PtL)
Ökologie	WTW-Treibhausgasemissionen (inkl. Pkw)											
	Energieeffizienz Fahrzeuge											
	Primärenergiebedarf (inkl. regenerativ)											
	WTW-Luftschadstoffemissionen											
	Verbrauch kritischer Metalle											
	Zusätzlicher Wasserverbrauch											
	Lärmemissionen											
	Konfliktpotential Biodiversität											
Ökonomie	Kosten Fahrzeuge + Energie											
	Zusätzliche Infrastrukturkosten											
Sonstiges	Reichweite											
	Gesamtanpassungsbedarf											
	Realisierungschancen bis 2050											
	Systemische Anschlussfähigkeit											

Bewertung gegenüber Referenz:

	Entspricht Referenz		besser als Referenz		deutlich besser als Referenz/ beste Optionen
	schlechter als Referenz		deutlich schlechter als Referenz/ ungünstigste Optionen		

[eigene Darstellung]

Brennstoffzellen-Pkw, die PtG-Wasserstoff nutzen, haben zwar einige ökologische Vorteile, verursachen aber hohe Infrastrukturkosten und besitzen eine schlechte Anschlussfähigkeit an derzeitige Entwicklungen. Pkw mit Brennstoffzellen setzen ein europaweit flächendeckendes Wasserstoff-Tankstellenetz voraus. Allein in Deutschland müsste ein Großteil der heute mehr als 14.000 Tankstellen Wasserstoff anbieten, um eine flächendeckende Versorgung sicherzustellen. Da mit rein batterieelektrischen Fahrzeugen und Plug-In-Hybriden bessere Optionen zur Verfügung stehen, ist dieser Schritt kaum vertretbar.

Die Gesamtbewertung zeigt Schwachpunkte auch bei stromgenerierten Kraftstoffen wie PtG-Methan und PtL: Ein hoher Energieverbrauch, der sich auch in hohen Kosten niederschlägt. Um erneuerbaren Strom möglichst effizient zu nutzen, ist die direkte Nutzung des Stroms in Elektro- und Hybrid-Fahrzeugen vorzuziehen.

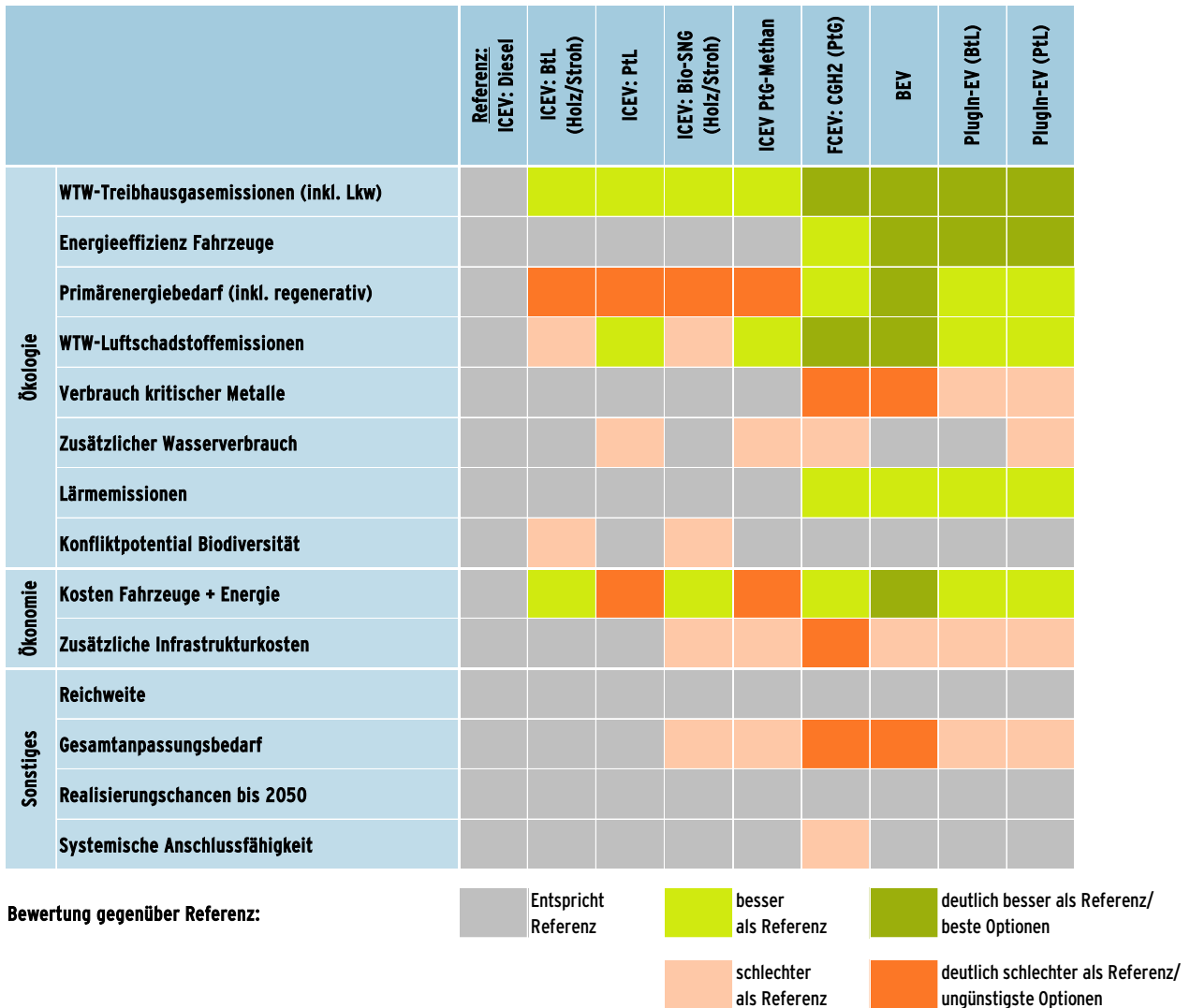
Im Vergleich zu stromgenerierten Kraftstoffen schneiden Biokraftstoffe der 2. Generation in einigen Kriterien besser, in anderen schlechter ab. Ihr größter Vorteil liegt in den mit Diesel vergleichbaren Kosten. Aufgrund der begrenzten Mengenpotentiale können moderne Biokraftstoffe als alleinige Alternative nicht dienen, sehr wohl aber als Zweitkraftstoff für Hybride. Aber selbst dann werden die verfügbaren Mengen nicht den gesamten Bedarf des Pkw-Verkehrs decken können, zumal sie auch für andere Verkehrsträger sinnvoll genutzt werden können. Daher werden ergänzend stromgenerierte Kraftstoffe wie PtL auch für die Elektromobilität nötig sein. Die detaillierten Kostenbetrachtungen zeigen zudem, dass bei Plug-In-Hybriden die Mehrkosten von PtL gegenüber BtL kaum ins Gewicht fallen (siehe Kapitel 5.1). Damit werden 2050 trotz wachsender Elektromobilität für den Pkw-Verkehr auch postfossile Flüssigkraftstoffe gebraucht.

## **7.2 Lkw: Bester Weg für schwere Nutzfahrzeuge noch offen**

Beim Lkw sind Nah- und Fernverkehr zu unterscheiden. Im Nahverkehr legen kleinere Lkw (z. B. der Klasse 7,5-12 t zGG) täglich Distanzen von rund 200 km zurück, im Fernverkehr fahren Sattel- und Lastzüge mit 40 t zGG 1.000 km und mehr. Diese Lkw sind zudem oft grenzüberschreitend unterwegs.

Abbildung 45 zeigt, dass für Nahverkehrs-Lkw grundsätzlich die gleichen Energieversorgungsoptionen wie für den Pkw zu Verfügung stehen. Auch die Bewertung der Optionen fällt mit wenigen Abweichungen identisch aus. Mit einem wesentlichen Unterschied: Im Nahverkehr sind nicht zwangsläufig Plug-In-Hybride notwendig. Auch reine batterieelektrische Lkw werden im Jahr 2050 die geforderte Reichweite von 200 km erbringen können und dies sogar zu günstigeren Kosten als heutige Diesel-Lkw. Brennstoffzellen-Fahrzeuge haben auch bei Lkw ökologische Vorteile, allerdings überwiegen die negativen Auswirkungen durch den Systemwechsel. Anders als bei Pkw haben alle Optionen mit Biokraftstoffen (BtL, Bio-SNG) kostenseitige Vorteile gegenüber dem Diesel-Lkw. Daher zeigen sie gegenüber stromgenerierten Kraftstoffen insgesamt eine etwas vorteilhaftere Bewertung.

Abbildung 45: Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für den 10-t-Lkw im Nahverkehr im Jahr 2050



[eigene Darstellung]

Das Bild für den Fernverkehrs-Lkw zeigt Abbildung 46. Die zur Verfügung stehenden postfossilen Energieversorgungsoptionen unterscheiden sich deutlich von denen für den Nahverkehr. Reine Elektrofahrzeuge und Hybride sind selbst 2050 nicht praktikabel; stattdessen steht mit dem Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) eine Alternative zur Verfügung, die beim Nahverkehrs-Lkw keine Rolle spielt. Für die langen Fahrstrecken müssen gasförmige Kraftstoffe aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichten zudem flüssig im Lkw gespeichert werden (gilt für PtG-Methan, PtG-Wasserstoff sowie Bio-SNG), was zusätzliche Energie benötigt.

Der Vergleich zeigt, dass der O-Lkw bei vielen ökologischen Kriterien und bei alleiniger Betrachtung der Kosten für Fahrzeuganschaffung und Energie klare Vorteile hat. Dabei ist es wenig entscheidend, ob der Lkw die Energie für Fahrten abseits der Oberleitung aus einer Batterie oder einem Verbrennungsmotor bezieht. Der Bau von Oberleitungen verursacht aber erheblichen Anpassungsbedarf und ist mit hohen Investitionskosten verbunden. Entscheidend für die Gesamtbewertung aber ist, dass dieses System national und international kaum an die heutige Lkw-Entwicklung anschlussfähig ist. Eine klare Entscheidung für den O-Lkw ist daher aus heutiger Sicht nicht möglich.

Kommt der Oberleitungs-Lkw allerdings nicht zum Zuge, gibt es keine klare Alternative, die durchweg Vorteile aufweist. Der Brennstoffzellen-Lkw hat Nachteile durch die immensen Systemumstellungen und den Anpassungsbedarf. Auch ökonomisch schneidert er nicht besser ab als Biokraftstoffe der 2. Generation. Stromgenerierte Kraftstoffe (PtL und PtG-Methan) zeigen im Vergleich aller Optionen die ökonomisch ungünstigsten Werte. PtL zeigt zwar bei den technischen, infrastrukturellen und systemischen Faktoren Vorteile, ist allerdings der teuerste Kraftstoff.

Abbildung 46: Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für den 40-t-Lkw im Fernverkehr im Jahr 2050

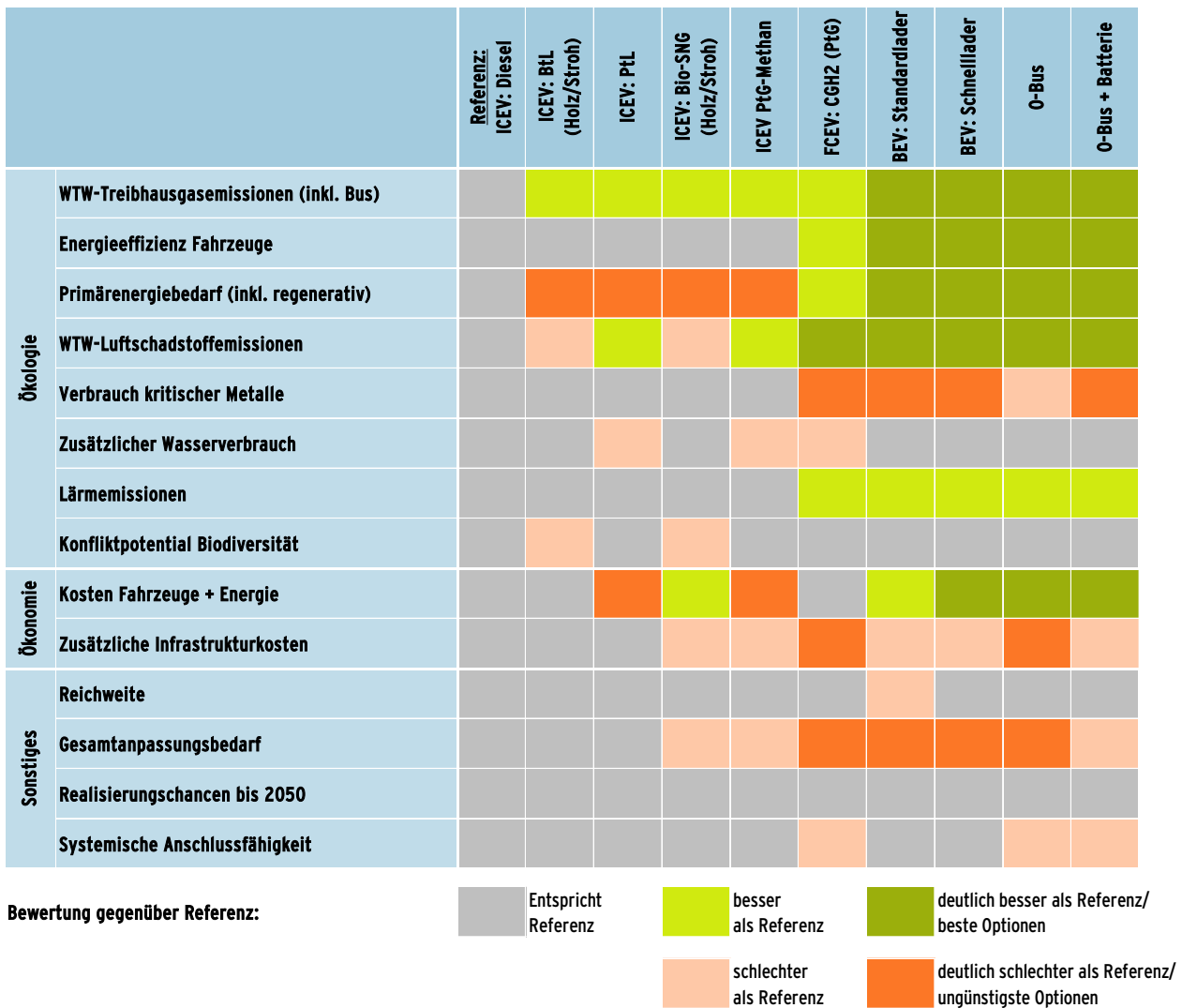


[eigene Darstellung]

### 7.3 Linienbus als Sonderfall: Schnellladung von Batterien als vielversprechende Option

Linienbusse fahren auf festen Routen. Dies eröffnet im Gegensatz zu anderen Verkehrsträgern die Möglichkeit, Busse mit kleinen Batterien auszustatten, die unterwegs immer wieder zwischengeladen werden. Auch für den Oberleitungsbus bieten sich dank der Weiterentwicklung der Batterietechnologie neue Varianten. Wird ein O-Bus mit einer Batterie ausgestattet, kann er einen Teil der Tour ohne Fahrdraht zurücklegen. Das senkt die Infrastrukturkosten für neue Oberleitungen. Die Gesamtbewertung der Optionen für den Busverkehr zeigt Abbildung 47.

Abbildung 47: Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für Linienbusse im Jahr 2050



[eigene Darstellung]

Die Abbildung verdeutlicht, dass auch rein batterieelektrische Busse mit Übernacht-Ladung (Standardlader) im Jahr 2050 zwar möglich sind, der Nachteil dieses Konzeptes ist aber, dass damit pro Tag nur 300 km zurückgelegt werden können. Für längere Touren wäre die Batterie so groß, dass diese Variante zu höheren Kosten als beim Dieselbus führt und zudem das Sitzplatzangebot spürbar reduziert werden müsste.

Die Gesamtbeurteilung zeigt, dass Schnelllader ökologisch wie auch ökonomisch mit am vorteilhaftesten abschneiden und Oberleitungsbusse mit zusätzlicher Batterie für freie Strecken ähnlich positiv zu bewerten sind. Für Städte, die bereits O-Busse betreiben, ist dies eine interessante Option. Für alle anderen Kommunen müssen Kostenanalysen zeigen, ob Schnelllader oder O-Bus mit Batterie die vorteilhaftere Option ist.

## 7.4 Flugverkehr: Power-to-Liquid ist Alternative zu Biokraftstoffen

Die postfossilen Energieversorgungsoptionen sind beim Flugverkehr stark beschränkt (siehe Abbildung 48). Für Kurz- wie auch Langstreckenflugzeuge stehen BtL und PtL zur Verfügung, für Kurzstrecken zusätzlich die direkte Verwendung von PtG-Wasserstoff in den Triebwerken bzw. in einer Brennstoffzelle, die zusammen mit einer Batterie einen elektrischen Hochge-

schwindigkeitsmotor antreibt. Alle Optionen zur Nutzung von Wasserstoff bedürfen völlige Neuentwicklungen von Flugzeugen, die sich bis zum Jahr 2050 im Markt durchgesetzt haben müssten. Dies erscheint unwahrscheinlich, weshalb diese Flugzeugtypen in Bezug auf ihre Realisierungschancen bis 2050 und ihre systemische Anschlussfähigkeit negativ bewertet wurden. Auch der Anpassungsbedarf an die Infrastruktur ist höher als bei BtL und PtL.

Abbildung 48: Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für Flugzeug im Jahr 2050

		Referenz: Kurzstrecke: Kerosin	Kurzstrecke: BtL (Holz/Stroh)	Kurzstrecke: PtL	Kurzstrecke: LH2 (PtG)	Kurzstrecke: FC + Batterie - LH2 (PtG)	Referenz: Langstrecke: Kerosin	Langstrecke: BtL (Holz/Stroh)	Langstrecke: PtL
Ökologie	WTW-Treibhausgasemissionen (inkl. Flugzeug)	Entspricht Referenz	besser als Referenz	besser als Referenz	besser als Referenz	besser als Referenz	Entspricht Referenz	besser als Referenz	besser als Referenz
	Energieeffizienz Fahrzeuge	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	schlechter als Referenz	besser als Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz
	Primärenergiebedarf (inkl. regenerativ)	Entspricht Referenz	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	Entspricht Referenz	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen
	WTW-Luftschadstoffemissionen	Entspricht Referenz	schlechter als Referenz	besser als Referenz	besser als Referenz	besser als Referenz	Entspricht Referenz	schlechter als Referenz	besser als Referenz
	Verbrauch kritischer Metalle	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz
	Zusätzlicher Wasserverbrauch	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	schlechter als Referenz	schlechter als Referenz	schlechter als Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	schlechter als Referenz
	Lärmemissionen	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz
	Konfliktpotential Biodiversität	Entspricht Referenz	schlechter als Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	schlechter als Referenz	Entspricht Referenz
Ökonomie	Kosten Fahrzeuge + Energie	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	schlechter als Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen
	Zusätzliche Infrastrukturkosten	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	schlechter als Referenz	schlechter als Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz
Sonstiges	Reichweite	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz
	Gesamtanpassungsbedarf	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz
	Realisierungschancen bis 2050	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz
	Systemische Anschlussfähigkeit	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	deutlich schlechter als Referenz/ungünstigste Optionen	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz	Entspricht Referenz

**Bewertung gegenüber Referenz:**

- Entspricht Referenz
- besser als Referenz
- deutlich besser als Referenz/  
beste Optionen
- schlechter als Referenz
- deutlich schlechter als Referenz/  
ungünstigste Optionen

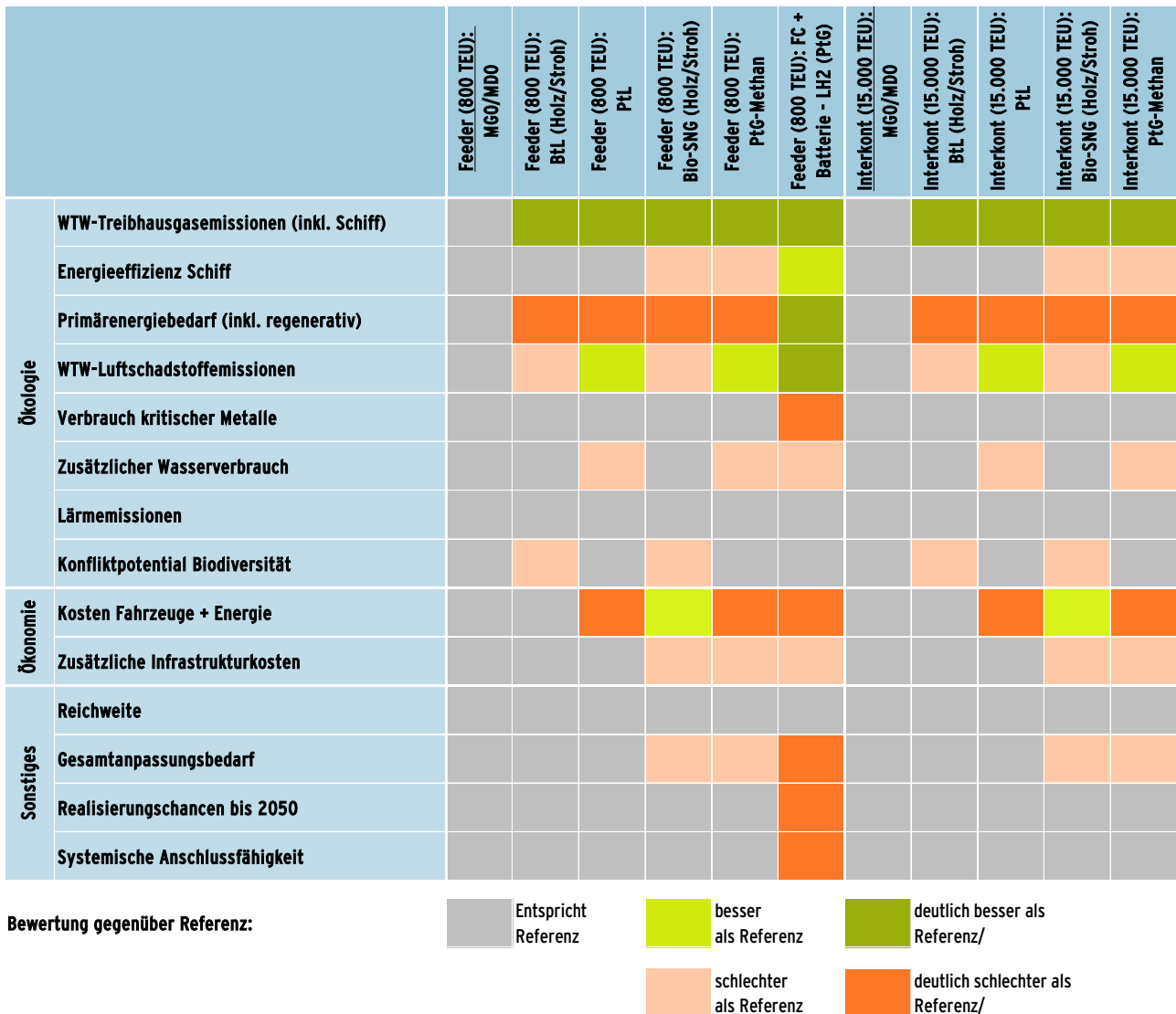
[eigene Darstellung]

Streng genommen stehen dem Luftverkehr nur zwei echte postfossile Alternativen zur Verfügung: BtL als Biokraftstoff der 2. Generation und PtL als stromgenerierter Kraftstoff. Da BtL im Vergleich zum Kerosin im Jahr 2050 zu vergleichbaren Kosten führt, dürfte diese Variante für die Fluggesellschaften deutlich interessanter sein. Die Mengenbeschränkungen und die Konkurrenz mit anderen Verkehrsmitteln um BtL führen aber dazu, dass der weltweite Flugverkehr nicht allein mit BtL versorgt werden kann. Damit ist ein treibhausgasneutraler Luftverkehr nur mit PtL als weiterem Kraftstoff möglich. Die Klimawirkungen durch Wasserdampf und Luftschadstoffe können aber auch durch PtL nicht gemindert werden. Hierzu sind einerseits Minderungen der Luftschadstoffemissionen des Luftverkehrs, andererseits die Stabilisierung bzw. die Reduktion der Luftverkehrsnachfrage notwendig.

### 7.5 Seeschiffe: Strombasierte Kraftstoffe unverzichtbar

Auch beim Seeschiff sind die postfossilen Optionen eingeschränkt. Die Gesamtbewertung zeigt, dass der Einsatz von Brennstoffzellen in Kombination mit Batterien bei Schiffen im Feederverkehr zwar eine ökologisch vorteilhafte Alternative ist, allerdings – wie auch bei Pkw, Lkw und Bus – kaum anschlussfähig an heutige Entwicklungen wäre und daher den größten Anpassungsbedarf hat.

Abbildung 49: Gesamtbewertung der postfossilen Energieversorgungsoptionen für das Seeschiff für das Jahr 2050



[eigene Darstellung]

Ob flüssige (BtL/PtL) oder gasförmige, verflüssigte Kraftstoffe (Bio-SNG/PtG-Methan) im Schiff eingesetzt werden sollten, ist auf Basis der Gesamtbewertung nur schwer abzuleiten. Flüssigkraftstoffe sind bei vielen Aspekten leicht im Vorteil, bei genauerem Hinsehen zeigt sich aber, dass gasförmige Kraftstoffe bei den Kosten leicht punkten. Bio-SNG beispielsweise ist der einzige Kraftstoff, der ökonomisch Vorteile gegenüber den anderen Optionen aufweist. Allerdings können Biokraftstoffe der 2. Generation – dies trifft für BtL und Bio-SNG gleichermaßen zu – aufgrund der Mengenrestriktionen den Bedarf des weltweiten Schiffsverkehrs zukünftig nicht decken. Daher sind beide Biokraftstoffe auf stromgenerierte Kraftstoffe als Ergänzung angewiesen. Ob aber die Kombination Bio-SNG zusammen mit PtG-Methan oder die Kombination von



BtL zusammen mit PtL letztendlich das Rennen machen wird, ist aus heutiger Sicht noch nicht abschließend zu beurteilen. Hierzu ist weiterer Forschungsbedarf notwendig. Unterstützt würde die Kombination gasförmiger postfossiler Kraftstoffe, wenn in den nächsten Jahren verstärkt LNG-Schiffe in den Markt kommen. Auf der Herstellungsseite würde zudem weniger regenerativer Strom zur Erzeugung von PtG-Methan benötigt.

## 8 Der Weg bis zum Jahr 2050 - erste Vorüberlegungen

Womit fahren Pkw, Lkw und Busse im Jahr 2050? Was treibt bis dahin Schiffe und Flugzeuge an? Für einige Verkehrsmittel ist die Frage nach der besten postfossilen Energieversorgungsoption klar, für andere ist sie nur schwer zu beantworten. In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wo Unsicherheiten bestehen und weiter geforscht werden muss.

Soll das Ziel einer postfossilen Energieversorgung des Verkehrs erreicht werden, muss nicht nur das Ziel bekannt sein, sondern auch geklärt werden, wie dieses erreicht werden kann. Die Identifikation möglicher Wege war nicht Gegenstand dieser Studie. Dennoch ergaben sich bei der Suche nach den präferierten Energieversorgungsoptionen auch Schlussfolgerungen für den Weg dorthin. Diese Vorüberlegungen werden in diesem Kapitel ebenfalls vorgestellt.

### Forschungsbedarf

Die vorliegende Studie liefert auf Basis bestehender Forschungsarbeiten einen systematischen Überblick zu möglichen postfossilen Energieversorgungsoptionen des Verkehrs und bewertet die Optionen für die Verkehrsträger Pkw, Lkw, Bus, Flugzeug und Schiff. Für die meisten Verkehrsträger konnten ökologisch und ökonomisch vorteilhafte postfossile Energieversorgungsoptionen identifiziert werden. Wenn Strom direkt im Fahrzeug genutzt wird, ist dies meist die effizienteste, ökologischste und meist auch ökonomischste Möglichkeit. Die Energieeffizienz der stromgenerierten Kraftstoffe sinkt von PtG-Wasserstoff über PtG-Methan bis zu PtL – daher sollte PtL nur dort eingesetzt werden, wo keine höherwertige Alternative zur Verfügung steht. Biokraftstoffe der 2. Generation sind ökonomisch oft stromgenerierten Kraftstoffen überlegen, unterliegen aber unausweichlichen Mengenrestriktionen.

Oft ergaben die Analysen eine klare Rangordnung der unterschiedlichen Konzepte und Kraftstoffe. Es konnte aber nicht bei allen Verkehrsmitteln die zu präferierende Option ermittelt werden. Offen ist beispielsweise die Situation beim schweren Lkw im Fernverkehr. Selbst mit steigenden Energiedichten von Batterien werden rein batterieelektrische Lkw auch im Jahr 2050 nicht möglich sein. Der Oberleitungs-Lkw zeigt gute Werte im Vergleich, ist aber im europäischen und internationalen Kontext systemisch kaum anschlussfähig. Hieraus erwächst die Frage, welches künftige Konzept politisch in Europa gewollt und akzeptiert wird. Hierzu muss in den nächsten Jahren eine politische, länderübergreifende Diskussion initiiert werden. Erhält der Oberleitungs-Lkw keine Chance, müssen die anderen Energieversorgungsoptionen in weiteren Studien detaillierter untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Studie lassen jedenfalls keine Entscheidung zu, welche der anderen Möglichkeiten für schwere Lkw als postfossile Energieversorgungsoption zu bevorzugen ist. Für Seeschiffe wurden die zwei Kombinationen PtL/BtL sowie von PtG-Methan/Bio-SNG als mögliche Optionen identifiziert. Auch hier ist weitergehender Forschungsbedarf notwendig, um die bestmögliche Option für den Seeverkehr zu identifizieren.

Neue Antriebe und Kraftstoffe erfordern häufig eine veränderte oder völlig neue Infrastruktur. Kosten und Anschlussfähigkeit sind mit entscheidend für die Realisierungschancen postfossiler Optionen. Verlässliche Daten dazu gibt es bisher wenig. Daher besteht bei der Ermittlung der verkehrsseitigen Infrastrukturkosten ebenfalls weitergehender Forschungsbedarf. Dabei muss auch ein Augenmerk auf Synergieeffekte gelegt werden. Wird eine Wasserstoffinfrastruktur beispielsweise nur für Lkw oder auch für Pkw und Lkw benötigt? Welche Auswirkungen hat dies auf die Tankstellendichte und damit auf die Kosten?

Ungeklärt sind auch Fragen zu Anlagen und Prozessen. BtL-Anlagen sind bisher noch nicht im großen Stile realisiert, zur Erzeugung von PtG-Methan sind in Deutschland gerade die ersten

Pilotanlagen in Betrieb gegangen, die erste PtL-Anlage soll 2017 folgen. Gerade bei Anlagen zur Erzeugung stromgenerierter Kraftstoffe müssen die Wirkungsgrade der Elektrolyse möglichst hoch und der Energiebedarf zur atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Abtrennung möglichst niedrig sein. Hier müssen durch gezielte F&E-Vorhaben frühzeitig die Weichen gestellt werden. Besonders Augenmerk sollte der Hochtemperaturelektrolyse zukommen; sie lässt sich ideal mit einer Methanisierung bzw. Fischer-Tropsch-Synthese kombinieren, da auf diese Weise die Abwärme genutzt werden kann. Damit können höhere Wirkungsgrade zur Erzeugung von PtG-Methan und PtL erzielt werden. Allerdings kann eine Hochtemperaturelektrolyse technologisch nur dann sinnvoll zum Einsatz kommen, wenn die Anlagen nicht ständig zur Nutzung des überschüssigen Windstroms angefahren und wieder abgestellt werden müssen. Der Einsatz einer Hochtemperaturelektrolyse setzt einen kontinuierlichen Dauerbetrieb voraus, was aber auch die ökonomisch sinnvollere Variante darstellt (siehe Kapitel 3.5).

Für die Weiterentwicklung von Batterien laufen umfangreiche F&E-Programme. In dieser Studie wurde aber darauf hingewiesen, dass gerade Elektrofahrzeuge in hohem Maße kritische Metalle verbrauchen. Neben Fragen der Versorgungssicherheit sind damit auch Umweltfolgen verbunden, wenn nicht die Recyclingkreisläufe für Batterien und Elektromotoren geschlossen werden. Hierzu ist ebenfalls zusätzlicher Forschungsbedarf notwendig.

Für Busse kommen verschiedene Optionen einer postfossilen Energieversorgung in Frage. Besonders interessant ist die Schnellladung von Batterien an Haltestellen. Aber auch die Flexibilisierung von Oberleitungsbussen durch den Einbau von Batterien für oberleitungsfreie Fahrten stellt eine interessante Option dar. Busse als Verkehrsträger können daher eine Vorreiterrolle in Sachen Elektromobilität einnehmen. Sie sind optimal für Pilotvorhaben geeignet und öffnen ein weites Forschungsfeld.

### **Erste Vorüberlegungen zum Weg**

Klare Ziele für den Verkehr im Jahr 2050 zu setzen, ist eine Sache. Die Frage, wie die Politik steuernd eingreifen kann, um viel versprechenden Optionen den Weg zu ebnen, eine andere. Damit muss stärker als bisher auch untersucht werden, wie der Weg hin zu einer treibhausgasneutralen Gesellschaft aussehen muss und wie dieser Weg von Seiten der Politik unterstützt werden kann.

Die großen Verbände der Luftverkehrsbranche (z. B. IATA und ICAO) haben sich beispielsweise verpflichtet, bis zum Jahr 2050 die absoluten Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs um 50 % gegenüber 2010 zu senken [Riegel/ Steinsdörfer 2011]. Neben Effizienzverbesserungen soll dies vor allem durch den Einsatz von Biokraftstoffen der 1. Generation erreicht werden. Um ohne Berücksichtigung des zusätzlichen Treibhauseffektes durch die Umwandlung der Verbrennungsemissionen und der Wasserdampfemissionen in Reiseflughöhe treibhausgasneutral zu werden, müsste der Luftverkehr aber – wie in dieser Studie gezeigt – langfristig auf PtL bzw. BtL umsteigen. Vor allem PtL als Alternative ist aber selbst im Jahr 2050 noch teurer als konventionelles Kerosin, zudem stehen PtL und BtL in Konkurrenz zu heutigen, wenig nachhaltigen Biokraftstoffen der 1. Generation.

Dies zeigt das Dilemma, das für viele postfossile Optionen und auch für die meisten Verkehrsträger gilt: Werden nicht rechtzeitig die benötigten Produktionskapazitäten aufgebaut, haben die Optionen im Jahr 2050 keine spürbare Verbreitung. Wird nicht rechtzeitig in die richtigen Alternativen investiert, können auch deren Kosten nicht konkurrenzfähig werden. Alternative Antriebssysteme müssen rechtzeitig entwickelt und erprobt werden, um im Jahr 2050 nennenswert im Bestand vertreten zu sein. Gelöst werden kann dieses Problem nur, wenn die Poli-

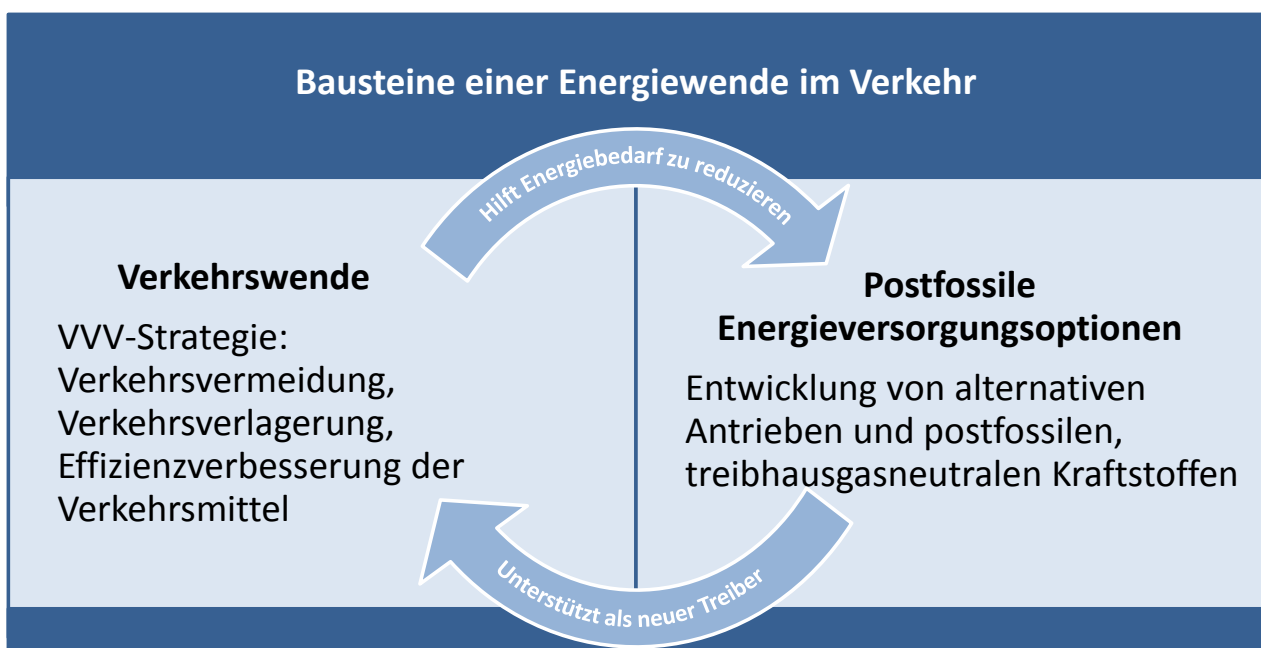
tik steuernd eingreift. Allerdings setzt das voraus, dass neben dem Ziel auch der Weg hin zur Zielerreichung schon genau bekannt ist, was nicht immer der Fall ist.

Hierbei kommt der Nutzung von stromgenerierten Kraftstoffen eine besondere Bedeutung zu. Für das Jahr 2050 wurde in dieser Studie von einer treibhausgasneutralen, vollständig regenerativen Stromerzeugung in Deutschland ausgegangen. PtG-Wasserstoff, PtG-Methan und PtL schneiden mit Werten zwischen 10 und 14 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro MJ Kraftstoff im Vergleich mit anderen postfossilen Optionen günstig ab. Würde aber der heutige Strommix verwendet, lägen ihre Emissionen zwischen 220 und 325 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro MJ Kraftstoff und damit um ein Vielfaches höher als bei konventionellen Kraftstoffen.

Anders gesagt: Stromgenerierte Kraftstoffe haben im Zeitraum vor 2050 nur dann Treibhausgasvorteile gegenüber konventionellen Kraftstoffen, wenn sie nahezu ausschließlich aus regenerativem Strom hergestellt werden. Gleichzeitig ist der Kraftstoffsektor für regenerativen Strom nicht der ökologisch effizienteste Abnehmer [IFEU/INFRAS 2013]. Gesellschaft und Politik müssen daher entscheiden, ob und wann stromgenerierte Kraftstoffe zum Einsatz kommen sollen. Falls dies vor einer vollständigen Dekarbonisierung der Stromversorgung geschieht, stellt sich die Frage, ob in der Übergangsphase regenerativ erzeugter Strom genutzt werden kann, auch wenn er in anderen Bereichen kostengünstiger, effizienter und damit emissionsmindernder eingesetzt werden könnte. Starke politische Weichenstellungen (z. B. ein ambitionierter Emissionshandel und Ausbaupfad für erneuerbare Energien) können einen solchen Konflikt gegebenenfalls entschärfen.

Eine postfossile Energieversorgung im Verkehr ist ein zentraler Baustein, um ambitionierte Klimaschutzziele in Deutschland zu erreichen. Jedoch braucht es nicht nur neue Kraftstoffe und Antriebe. Stattdessen ist es notwendig, die postfossile Energieversorgung in ein Gesamtkonzept einzubetten, in dem auch der Energieverbrauch des Verkehrs deutlich gesenkt wird. Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, Verlagerung und Verbesserung als Kernelemente einer Verkehrswende sind unabhängig von einer postfossilen Energieversorgung des Verkehrs und für die Zukunft unverzichtbar (siehe Abbildung 50).

Abbildung 50: Bausteine einer Energiewende im Verkehr



[Adlunger et al. 2013]

## 9 Quellenverzeichnis

- AC (2005):** Ohne Autor: Analysing the options for 757 replacement. In Aircraft Commerce (AC), Ausgabe Nr. 42, August/September 2005, S. 25-31.
- ADAC (2013):** ADAC (Hrsg.): Autokosten 2013. Stand 4/2013. München: 2013.
- Adlunger et al. (2013):** Adlunger, K.; Lange, M.; Schmied, M.: Treibhausgasneutraler Verkehr im Jahr 2050 – Notwendiges Zusammenspiel von Energie- und Verkehrswende. In: Internationales Verkehrswesen (65), Nr. 4/2013, S. 14-16.
- Alabi et al. (2009):** Alabi, A. O., Tampier, M., & Bibeau, E.: Microalgae Technologies & Processes for Biofuels / Bioenergy Production in British Columbia. Current Technology, Suitability & Barriers to Implementation. Current (p. 88).
- Althaus/Bauer (2011):** Althaus, H.-J. (EMPA); Bauer, C. (PSI): Gegenüberstellung verschiedener aktueller Schweizer Ökobilanzstudien im Bereich Elektromobilität. Schlussbericht: Villigen/Dübendorf: 2011.
- Audi (2013):** Audi (Hrsg.): Der Audi A3 Sportback g-tron. Pressemitteilung vom 27. Mai 2013.
- Bombardier (2013):** Bombardier Transportation: Brunswick: Primove E-Bus - First inductively charged e-bus project for passenger operation. Berlin: 2013.
- Brauer et al. (2007):** Brauer, S.; Vogel, A.; Müller-Langer, F.: Kosten und Ökobilanzen von Biokraftstoffen. Gutachten (Langfassung) des Instituts für Energetik und Umwelt im Auftrag der UFOP. Leipzig: 2007.
- Baum et al. (2010):** Baum, H.; Dobberstein, J.; Schuler, B.: Nutzen-Kosten-Analyse der Elektromobilität. In: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft (81), Heft 3/2010, S. 153-196.
- BVR (2013):** Bundesverband der Deutschen Volksbanken und Raiffeisenbanken (BVR): VR Branchen special Tankstellen. Bericht Nr. 38. München: Oktober 2013.
- CE Delft/DLR (2013):** Den Boer E. (CE Delft); Aarnink, S. (CE Delft); Kleiner, F. (DLR); Pagenkopf, J. (DLR): Zero emission trucks. An overview of state-of-the-art technologies and their potential. Report. Delft: 2013.
- Dena (2009):** Deutsche Energie-Agentur (Dena): GermanHy - „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?“. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und in Abstimmung mit der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW). Berlin: 2009.
- DNV (2012):** Det Norske Veritas (DNV): Shipping 2020. Oslo: 2012.
- DLR et al. (2012):** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Stuttgart, Kassel, Teltow: 2012.
- DVGW (2013):** DBI Gas- und Umwelttechnik Leipzig; DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie; E.ON New Build & Technology Essen; Fraunhofer IWES Kassel, VNG Gasspeicher Leipzig: Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan in Erdgasnetz. Studie im Auftrag des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW). Bonn: 2013.

- EK (2013):** Europäische Kommission: Saubere Energie für den Verkehr: Eine europäische Strategie für alternative Kraftstoffe. Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel: 24.1.2013.
- e-mobil BW (2013a):** Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg (Hrsg.): Leichtbau in Mobilität und Fertigung. Chancen für Baden-Württemberg. Stuttgart: 2013.
- e-mobil BW (2013b):** Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg (Hrsg.): Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität. Stuttgart: 2013.
- EN 16258:** Deutsches Institut für Normung (DIN): „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)“ (DIN EN 16258). Berlin: Beuth Verlag, 2013.
- Erdgas mobil (2012):** Erdgas mobil (Hrsg.): Verkehrslärm halbieren: Mit Erdgasbussen und – Lkw. Pressemitteilung vom 24. April 2012.
- Faist et al. (2012):** Faist Emmenegger, M.; Gmünder, S.; Reinhard, J.; Zah, R.; Nemecek, T.; Schnetzer, J.; Bauer, C.; Simons, A.; Doka, G. (EMPA): Harmonisation and extension of the bio-energy inventories and assessment. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE). Bern: 2012.
- FHG-ISI/LBST (2010):** Wietschel, M. (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung); Büniger, U. (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik): Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO<sub>2</sub>-freie Endenergieträger. Endbericht im Auftrag der RWE AG. Karlsruhe: 2010.
- Flury/Frischknecht (2012):** Flury, K.; Frischknecht, R.: Ökobilanz Erdgasauto im Auftrag der Gasmobil AG. Uster: 2012.
- FNR (2009):** Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR): Biokraftstoffe: Eine vergleichende Analyse. Erstellt mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV). Gülzow: 2009.
- Göhlich et al. (2013):** Göhlich, D.; Kunith, A.; Gräbener, S.: Systemtechnologien für elektrische Stadtbusse – die richtige Wahl. Ein Auswahlprozess für Technologie-Alternativen elektrifizierter Busse am Beispiel des E-Bus Berlin Projekts. In: Internationales Verkehrswesen (65), Nr. 4/2013, S. 75-77
- Gollnick (2013):** Gollnick, V. (DLR, Institut für Lufttransportsysteme): Frachtflugzeug der Zukunft: Weniger Emissionen und Lärm. Präsentation im Rahmen der Lufthansa Cargo Climate Care Conference am 24. April 2013 in Frankfurt.
- Graßl/Brockhagen (2007):** Graßl, H.; Brockhagen, D.: Climate forcing of aviation emissions in high altitudes and comparison of metrics. An update according to the Fourth Assessment Report, IPCC 2007. Hamburg: 2007.
- Haan/Zah (2013):** Haan, P. de; Zah, R.: Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. TA-SWISS 59/2013. Zürich: vdf Hochschulverlag, 2013
- Hagelücken et al. (2005):** Hagelücken, C; Buchert, M.; Stahl, H.: Stoffströme der Platingruppenmetalle: Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle. Hanau/Darmstadt: 2005.

- HC/Öko-Institut 2013:** Kappus, J.; Klusmann, A. (Hamburg Consult); Schmied, M.; Mottschall, M. (Öko-Institut e.V.); Hecht, M.; Eschweiler, P. (TU Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge): Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) in Kooperationspartner mit dem Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). Hamburg/Berlin: 2013.
- HVB (2009):** Hypovereinsbank (Hrsg.): Trendstudie Green Shipping. Hamburg: 2009.
- IATA (2013):** International Air Transport Association (IATA): Jet Fuel Price Monitor; siehe [www.iata.org/publications/economics/fuel-monitor/Pages/index.aspx](http://www.iata.org/publications/economics/fuel-monitor/Pages/index.aspx) (abgerufen am 15.8.2013).
- IEA (2009):** International Energy Agency (IEA): Transport, Energy and CO<sub>2</sub> – Moving towards Sustainability. Paris: 2009.
- IEA (2010):** Eisentraut, A.: Sustainable Production of Second-Generation Biofuels: Potential and perspectives in major economies and developing countries. Im Auftrag der IEA. Paris: IEA Renewable Energy Division. 2010.
- IEA (2012):** International Energy Agency (IEA): Energy Technology Perspectives 2012. Pathways to a Clean Energy System. Paris Cedex: 2012.
- IER (2009):** Fahl, U.; Härdtlein, M.; Özdemir, E.D.; Rath-Nagel, S.; Remme, U.; Eltrop, L.: Möglichkeiten der LNG-Nutzung in Baden-Württemberg. Studie des IER im Auftrag des Zentrums für Energieforschung Stuttgart e.V. und der Gasversorgung Süddeutschland GmbH. Stuttgart: 2009.
- IFEU (2009a):** Pehnt, M.; Höpfner, U. (IFEU): Wasserstoff- und Stromspeicher in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien: Analyse der kurz- und mittelfristigen Perspektive. Kurzgutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Heidelberg: 2009.
- IFEU (2009b):** Knörr, W.; Kutzner, F.: Verbrauch, Emissionen, Materialeinsatz und Kosten von Binnenschiffen, Flugzeugen und Schienenfahrzeugen. Dokumentation im Rahmen des BMU-Projektes „renewability – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“. Heidelberg: 2009.
- IFEU (2011):** Helms, H.; Jöhrens, J.; Hanusch, J.; Höpfner, U.; Lambrecht, U.; Pehnt, M. (IFEU): UMBReLA: Umweltbilanzen Elektromobilität. Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt UMBREeLA gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Heidelberg: 2011.
- IFEU (2012):** Knörr, W. et. al: Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011). Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes (FKZ 360 16 037). Heidelberg: 2012.
- IFEU et al. (2013):** Heidt, C.; Lambrecht, U. (IFEU); Hardinghaus, M.; Knitschky, G. (DLR); Schmidt, P.; Weindorf, W. (LBST); Naumann, K.; Majer, S.; Müller-Langer, F.; Seiffert, M. (DBFZ): CNG und LPG – Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs. Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Heidelberg, Berlin, Ottobrunn, Leipzig: 2013.

- IFEU/INFRAS (2013):** Knörr, W.; Bergk, F. (beide IFEU); Schmied, M. (INFRAS): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050. 1. Zwischenbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg/Bern: 2013.
- IFEU/Öko-Institut (2012):** Knörr, W.; Schacht, A. (beide IFEU); Gores, S. (Öko-Institut): Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs - TREMOD AV. Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau: 2012.
- IMO (2009):** International Maritime Organization (IMO): Second IMO GHG Study 2009. London: 2009.
- INFRAS (2006):** Keller, M.; Lebküchner, M.; Kljun, N. (INFRAS): Diesel-, Gas- oder Trolley-Bus? Schlussbericht in Zusammenarbeit mit Günter Weber (3BAG) im Auftrag des Wirtschafts- und Sozialdepartements des Kantons Basel-Stadt (WSD-BS). Bern: 2006.
- INFRAS (2014):** Schmied, M.; Wüthrich, P.: Bus der Zukunft: Marktübersicht. Gutachten von INFRAS im Auftrag Basler Verkehrsbetriebe, Bernmobil, Stadtbus Winterthur und Verkehrsbetriebe St. Gallen. Bern: 2014 (unveröffentlicht).
- IWES (2011):** Sterner, M.; Jentsch, M.; Holzhammer, U.: Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes. Gutachten des Fraunhofer Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) im Auftrag von Greenpeace Energy. Kassel: 2011.
- Jeanvré (2013):** Jeanvré, S.: Flugzeug-Recycling: Neue Ansätze zur Rohstoffrückgewinnung. Braunschweig: 2013.
- JRC (2013):** Joint Research Centre (JRC): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context (Version 4). Im Zusammenarbeit mit EUCAR-CONCAWE. Ispra: 2013.
- Knote (2013):** Knote, T. (Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme - IVI): Schnellladesysteme für Elektrobusse. Präsentation im Rahmen der 4. VDV-Akademie-Konferenz „Elektrobusse – Markt der Zukunft!“ am 19. Februar 2013 in Berlin.
- Kranke et al. (2011):** Kranke, A.; Schmied, M.; Schön, A.: CO<sub>2</sub>-Bilanzierung in der Logistik: Datenquellen, Formeln, Standards. München: Verlag Heinrich Vogel: 2011.
- Kuhn (2013):** Kuhn, H. (Bauhaus Luftfahrt): eAviation Energy and Power Systems. Präsentation im Rahmen der Konferenz „Future of Aviation – Perspectives for 2050“ in München am 5. Juni 2013.
- Kuhn et al. (2011):** Kuhn, H.; Falter, C.; Sizmann, A. (Bauhaus Luftfahrt): Renewable Energy Perspectives for Aviation. In: Proceedings of the 3. CEAS Air&Space Conference and 21.AIDAA Congress. Venedig: 2011, S. 1249-1259.
- LBST (2013):** Albrecht, U.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Wurster, R.; Zittel, W.: Kraftstoffstudie: Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen. Abschlussbericht von LBST. Eine Expertise für die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. Heft 1031. Frankfurt a. M.: 2013.
- Leible et al. (2007):** Leible, L.; Kälber, S.; Kappler, G.; Lange, S.; Nieke, E.; Proplesch, P.; Wintzer D.; Fürniß, B.: Kraftstoff, Strom und Wärme aus Stroh und Waldrestholz: Eine systemanalytische Untersuchung. Bericht des Forschungszentrums Karlsruhe gefördert vom Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (MLR). Wissenschaftliche Berichte FZKA 7170. Karlsruhe: 2007.



- Lindfeldt (2011):** Lindfeldt, E.: North European LNG Infrastructure Project: A feasibility study for an LNG filling station infrastructure and test of recommendations. Draft Feasibility Report, Appendix C LNG Prices. 2011.
- Malina (2013):** Malina, R.: Economics of alternative fuels. Präsentation im Rahmen des Bauhaus Symposiums am 4. Juni 2013 in München.
- Malins (2013):** Malins, Ch. (ICCT): Alternative Jet fuels: Sustainability and supply. Präsentation im Rahmen des Bauhaus Luftfahrt Symposiums "Future of Aviation – Perspectives for 2050" am 3./4. Juni 2013 in München.
- Müller-Langer (2011):** Müller-Langer, F.: Analyse und Bewertung ausgewählter zukünftiger Biokraftstoffoptionen auf der Basis fester Biomasse. Dissertation. Leipzig: 2011.
- Müller-Syring/Henel (2011):** Müller-Syring, G.; Henel, M.: Power-toGas: Konzepte, Kosten, Potentiale. Präsentation im Rahmen des DBI-Fachforums „Energiespeicherkonzepte und Wasserstoff am 13. September 2011 in Berlin
- Nitsch/Fischedick (2002):** Nitsch, J.; Fischedick, M.: Eine vollständig regenerative Energieversorgung mit Wasserstoff – Illusion oder realistische Perspektive? Essen: 2002.
- Öko-Institut (2011):** Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D.: Verbundprojekt: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBri. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren. Darmstadt: 2011.
- Öko-Institut (2013a):** Blanck, R.; Kasten, P.; Hacker, F.; Mottschall, M.: Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr. Abschlussbericht des Öko-Instituts im Auftrag des Umweltbundesamtes zum Forschungsvorhaben „Verkehr 2050 - Entwicklung von Parametern und Skizzierung eines vereinfachten Energie und Emissionsszenarios“
- Öko-Institut (2013b):** Kasten, P.; Blanck, R.; Loreck, C.; Hacker, F. (Öko-Institut): Strombasierte Kraftstoffe im Vergleich – Stand heute und die Langfristperspektive / unter der Mitarbeit von Silvia Forin. Öko-Institut Working Paper 1/2013. Berlin: 2013.
- Öko-Institut et al. (2011):** Buchert, M.; Jenseit, J.; Dittrich, St.; Hacker, F. (alle Öko-Institut); Schüler-Hainsch, E.; Ruhland, K.; Knöfel, S. (alle Daimler AG); Goldmann, D.; Rasenack, K. (alle TU Clausthal); Treffer, F. (Umioire): Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems der Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Anhang zum Schlussbericht im Rahmen der Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Darmstadt: 2011.
- Otten (2013):** Otten, R.: Integration von Mobilität in das Energiesystem der Zukunft: Das Audi e-gas-Projekt. Präsentation im Rahmen der 14. Fachtagung Erdgas Umwelt Zukunft am 23. Januar 2013 in Leipzig.
- Pioch et al. (2008):** Pioch, P. (WBZU); Aigle, T. (WBZU); Jörissen, L. (ZSW): Brennstoffzellen-Grundlagen: Aufbau und Funktion. Präsentation im Rahmen des Basisseminars Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie am 24. Januar 2008 am WBZU in Ulm.
- Ponater et al. (2006):** Ponater, M.; Pechtl, S.; Sausen, R.; Schumann, U.; Hüttig, G.: Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment. In: Atmospheric Environment 40 (2006), S. 6928–6944.

- Prognos/INFRAS (2012):** Prognos/INFRAS: Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050: Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000-2050. Gutachten von Prognos in Zusammenarbeit mit INFRAS im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE). Basel: 2012.
- Riegel/Steinsdörfer (2011):** Riegel, F.; Steinsdörfer, J.: Bioenergy in Aviation: The Question of Land Availability, Yields and True Sustainability. In: Proceedings of the 3. CEAS Air&Space Conference and 21.AIDAA Congress.Venedig: 2011, S. 675-681.
- Rohlfs (2012):** Rohlfs, W. (ISEA, RWTH Aachen): Electrification of bus routes with e buses & fast charging stations – in case of no overhead wires –. Präsentation vom 26.10.2012.
- Roth (2013):** Roth, A. (Bauhaus Luftfahrt): Sustainable energy and fuel options for future aviation. Präsentation im Rahmen der Konferenz “Elements of a Greenhouse Neutral Society” am 11. Oktober 2013 in Berlin.
- Sames (2011):** Sames, P. C.: Kosten und Nutzen von LNG als Kraftstoff für Containerschiffe: Ergebnisse einer gemeinsamen Studie von GL und MAN. In: DVN Germany: LNG-Info Dezember 2011.
- Sames et al. (2012):** Sames, P. C.; Plump, R.; Rohde, F. (Germanischer Lloyd): The “zero-emission perspective”: A vision for a zero emission container feeder vessel. Präsentation im Rahmen der Clean Baltic Sea Shipping Midterm Conference am 19. September 2012 in Riga.
- Shell (2008):** Shell Energy Scenarios to 2050. The Hague: 2008.
- Sieber (2011):** Sieber, J.: Alternative Kraftstoffe in der Luftfahrt. Präsentation im Rahmen des BDLI Facharbeitskreis Product Support am 1. Dezember 2011 in München.
- Siemens (2013):** Siemens: Elektrobuss der Wiener Linien: 12 Midibusse für den Innenstadtbereich. Berlin: 2013.
- Soffel (2012):** Soffel, C. (VCDB – VerkehrsConsult Dresden-Berlin): Der Hybridbus und seine Entwicklung zum vollelektrischen Hybrid. Präsentation im Rahmen der 3. Internationalen Trolleybus-Konferenz am 14. Oktober 2012 in Leipzig.
- SRU (2012):** Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt. Berlin: 2012.
- Steiner 2011:** Steiner, M. (IWES): Systemlösungen zur Integration erneuerbarer Energien - Potenziale im Gasnetz über Power-to-Gas erschließen. Präsentation im Rahmen des DENA-Kongresses „Energieeffizienz“ am 21. November 2011 in Berlin.
- Steubing et al. (2011):** Steubing, B.; Zah, R.; Ludwig, C.; Life cycle assessment of SNG from wood for heating, electricity, and transportation. In: Biomass and bio energy, Nr. 35/2011, S. 2950-2960.
- Sunfire (2013):** Becker, S. (Sunfire): Power to Liquids – a new Energy Option: Potentials and Difficulties. Präsentation im Rahmen der UBA-Konferenz „Elements of a Greenhouse gas neutral society“ am 10.11.2013 in Berlin.
- TNO et al. (2013):** Verbeek, R.; Ligterink, N.; Meulenbrugge, J.; Koornneef, G. (alle TNO); Kroon, P.; de Wilde, H. (alle ECN); Kampman, B.; Croezen, H.; Aarnink, S. (alle CE Delft): Natural gas in transport: An assessment of different routes. Studie im Auftrag des holländischen Ministeriums für Infrastruktur und Umwelt. Delft: 2013.

- Tübcke (2010):** Tübcke, J.: Grenzen der Elektromobilität – Energieeffizienz, Reichweite und Lebensdauer. Präsentation im Rahmen des 27. Deutschen Logistik-Kongresses am 21. Oktober 2010 in Berlin.
- UBA (2012):** Umweltbundesamt (Hrsg.): Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. UBA-Positionspapier. Dessau-Roßlau: 2012.
- UBA (2013a):** Umweltbundesamt (Hrsg.): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Hintergrundpapier. Dessau-Roßlau: 2013
- UBA (2013b):** Umweltbundesamt (Hrsg.): Kurzfristig kaum Lärminderung durch Elektroautos. Position. Dessau-Roßlau: 18. April 2013.
- UBA (2014):** Umweltbundesamt (Hrsg.): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Climate Change 07/2014. Dessau-Roßlau: April 2014.
- VTT (2012):** Nylund, N. O.; Koponen, K. (VTT): Fuel and Technology Alternatives for Buses - Overall Energy Efficiency and Emission Performance. Kuopio: 2012.
- WBCSD (2004):** World Business Council for Sustainable Development (WBCSD): Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability. Genf: 2004.
- WEC (2011):** World Energy Council: Global Transport Scenarios 2050; in Kooperation mit IBM Corporation und Paul Scherrer Institut. London: 2011.
- Westenberger (2003):** Westenberger, A. (Airbus): Cryoplane – Hydrogen Aircraft. Präsentation im Rahmen der H2 Expo in Hamburg am 11.10.2003.
- WIBERA 2004:** Wirtschaftsberatung Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (WIBERA): Betriebswirtschaftliche und umweltseitige Analyse der Leistungsmehrkosten und der Umwelteffekte anspruchsvoller Umweltstandards. Teilprojekt im Rahmen des BMU-Demonstrationsvorhaben „Anspruchsvolle Umweltstandards im ÖPNV-Wettbewerb“. Düsseldorf: 2004.
- Zah et al. (2010):** Zah, R.; Binder, C. (EMPA); Bringezu, S.; Reinhard, J.; Schmid, A.; Schütz, H. (Wuppertal-Institut): Future Perspectives of 2nd Generation Biofuels. TA-SWISS 55/2010. Zürich: 2010.
- Zah et al. (2011):** Zah, R.; Gmünder, S.; Ehrensperger, A.: Biotreibstoffe aus Entwicklungsländern. In: Biologie in unserer Zeit, 41(5), S. 316–323.