



Hintergrundpapier:
Energieverbrauch und Energieträger
im Straßenverkehr bis 2025.

Impressum.

Herausgeber.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Energieeffiziente Verkehrssysteme
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin

Tel: +49 (0)30 72 61 65-600
Fax: +49 (0)30 72 61 65-699

E-Mail: info@dena.de
Internet: www.dena.de

Autoren.

Stefan Haendschke, dena
Dr. Dominika Kalinowska, dena
Dr. Christian A. Rumpke, dena

Druck.

druck.haus rihn gmbh
Stand: 04/13
Alle Rechte sind vorbehalten.
Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.

Diese Publikation wurde erstellt mit freundlicher Unterstützung durch:

Vorsprung durch Technik



DAIMLER



VDA

Verband der
Automobilindustrie

Berlin, April 2013

Inhalt.

1	Zusammenfassung und politische Handlungsempfehlungen.	4
2	Ziele sowie energie- und klimapolitische Herausforderungen im Straßenverkehr.	7
3	Nachfrageszenarien bis 2025: der Straßenverkehr und sein Energieverbrauch.	10
3.1	Der Energieverbrauch der Fahrzeuge.	10
3.2	Verkehrs- und Fahrleistungen.	10
3.3	Szenarien zur Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr.	10
4	Relevante Kraftstoff- und Antriebspfade für Pkws, Lkws und Busse.	13
4.1	Marktreife Kraftstoff- und Antriebspfade bis 2025.	13
4.2	Vor- und Nachteile von Biokraftstoffen.	16
4.3	Vorzüge und Probleme bei der Nutzung von Biokraftstoffen im Fahrzeug.	17
4.4	Potenziale und Grenzen der Verfügbarkeit von Biokraftstoffen.	19
5	Handlungsbedarf bei Fahrzeug- und Kraftstofftechnik.	22
6	Politische Rahmenbedingungen – Status quo und Empfehlungen.	23
7	Literaturverzeichnis.	26
8	Abkürzungen.	27

① Zusammenfassung und politische Handlungsempfehlungen.

Auch der Verkehrssektor steht vor den Herausforderungen der Energiewende.

Personenmobilität und Gütertransport sind in einer arbeitsteiligen Wirtschaft Voraussetzung für Wohlstand und Wachstum. Mit Verkehr sind aber auch spezifische Herausforderungen verknüpft. So verbraucht dieser Sektor in Deutschland rund ein Fünftel der Endenergie. Hierbei ist wiederum der Straßenverkehr mit Pkws, Lkws, Bussen und motorisierten Zweirädern mit gut 80 Prozent des Endenergieverbrauchs und damit der CO₂-Emissionen des Verkehrssektors zu nennen.

Im Personenverkehr hat die Verkehrsleistung seit 1992 um knapp 24 Prozent zugenommen, im Güterverkehr um 60 Prozent. Dem stehen deutliche Verbesserungen bei der Energieeffizienz gegenüber – vor allem bei Lkws (um 36 Prozent) und Pkws (um 20 Prozent). Im Ergebnis ist der Endenergieverbrauch im Verkehr von 1992 bis 2005 um knapp zweieinhalb Prozent gestiegen und seither wieder um gut ein Prozent zurückgegangen.

Die gesamten CO₂-Emissionen sind im Verkehrssektor noch deutlicher gesunken: von 1990 bis 2010 um knapp sechs Prozent. Dies ist neben den Effizienzsteigerungen auch auf den wachsenden Anteil regenerativer Kraftstoffe zurückzuführen.

Im Rahmen der Energiewende hat die Bundesregierung das Ziel formuliert, den Endenergieverbrauch im Verkehrssektor bis 2020 um zehn Prozent und bis 2050 um 40 Prozent zu reduzieren (jeweils gegenüber 2005). Zentrale Herausforderung wird dabei sein, Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen bei absehbar weiter steigenden Verkehrsleistungen zu reduzieren und dabei gleichzeitig eine für alle bezahlbare Mobilität zu erhalten.

Die Verkehrsleistungen auf der Straße wachsen insbesondere im Güterverkehr weniger stark als bislang angenommen.

Für den Pkw wird bis 2025 eine geringere Zunahme der Fahrleistung, für den Linien- und den Reisebus eine Stagnation prognostiziert. Für den Güterverkehr hingegen wurde bisher von einem starken Wachstum in den kommenden Jahrzehnten ausgegangen – in der Regel gestützt auf die „Verkehrsprognose 2025“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) aus dem Jahr 2007. Vor dem Hintergrund jüngerer Entwicklungen wie der Wirtschaftskrise, die den Straßengüterverkehr stark getroffen hat, lässt eine aktuelle Prognose der ProgTrans AG allerdings ein deutlich schwächeres Wachstum der Güterverkehrsleistung erwarten, das sich in den Jahren

zwischen 2007 und 2011 auch bereits so gezeigt hat. Auch die Bundesregierung hat inzwischen die Eckwerte der Verkehrsprognose 2030, insbesondere die der erwarteten Entwicklung der wirtschaftlichen Rahmendaten, gegenüber der alten Prognose für 2025 deutlich zurückgenommen.

Der Dieselanteil im Straßenverkehr steigt weiter.

Der Bedarf nach Flüssigkraftstoffen für Verbrennungsmotoren liegt voraussichtlich auch im Jahr 2025 immer noch bei über 95 Prozent. Die Alternativen Strom, Wasserstoff und Erdgas/CNG erreichen in den Prognosen insgesamt weniger als drei Prozent. Da der Güterverkehr am stärksten wächst, bewegt sich der Anteil der Dieselmotoren im Straßenverkehr von 57 Prozent im Jahr 2010 in einen Bereich von 66 bis 76 Prozent im Jahr 2025. Der Anteil der Ottomotoren sinkt hingegen von 43 auf 24 bis 30 Prozent.

Kraftstoff- und Antriebspfade für Pkws, Lkws und Busse sind vielfältig.

Die verschiedenen Antriebs- und Kraftstoffkombinationen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Eignung für verschiedene Einsatzzwecke. Der Ottomotor bleibt für den Pkw auch künftig ein sinnvoller Antrieb, zumal hier mit Ethanol eine geeignete regenerative Ergänzung zum fossilen Benzin zur Verfügung steht. Bei schweren Nutzfahrzeugen wird der Ottomotor hingegen auch künftig kaum eine Option sein. Dominieren wird hier weiterhin der Dieselmotor mit seinem höheren Wirkungsgrad, ebenso wie z. B. bei Pkws mit hoher Jahreslaufleistung. Insgesamt wird es für die künftige Versorgung mit Kraftstoffen nicht den einen Königsweg geben, der den unterschiedlichen Anforderungen aller Verkehrsmittel gerecht wird.

Vor- und Nachteile von Biokraftstoffen erfordern differenzierte Bewertung und Strategie.

Regenerativ erzeugte Alternativen zu konventionellen Kraftstoffen versprechen neben einer Diversifizierung der Kraftstoffbasis eine Reduktion der klimaschädlichen Kohlendioxidemissionen. Vor allem die herkömmlichen Biokraftstoffe können allerdings je nach Herkunftsregion und Ausgangsstoffen auch mit Belastungen für Mensch und Umwelt verbunden sein. Wenn die heimische Nutzung von Biokraftstoffen in Drittländern zu Änderungen in der Landnutzung führt (indirekte Landnutzungsänderung, ILUC), dann kann die Klimabilanz sogar schlechter ausfallen als bei fossilen Kraftstoffen. Eine Bewertung und entsprechende Anrechnung von Biokraftstoffen muss daher im Einzelfall genau zwischen Herkunftsregionen,

Ausgangsprodukten und Erzeugungspfaden differenzieren.

Flüssige Biokraftstoffe stoßen im Fahrzeug an ihre Grenzen.

Die meisten Biokraftstoffe weisen ähnliche Eigenschaften wie ihre fossilen Pendanten auf, sind aber chemisch nicht identisch mit ihnen. Ihr Einfluss auf die Antriebs- und Fahrzeugtechnik z. B. bei Wirkungsgrad, Langzeitverhalten und Schadstoffemission kann daher die Nutzung von Biokraftstoffen limitieren. Beim Ethanol ist aus antriebstechnischer Sicht – eine gleichbleibend hohe Qualität des Grundkraftstoffs vorausgesetzt – eine Anhebung des Beimischungsanteils auf 20 bis 25 Prozent realisierbar. Seine hohe Oktanzahl (d. h. die geringe Neigung zur unerwünschten Selbstentzündung) spricht sogar für diesen Kraftstoff. Beim Biodiesel setzen insbesondere vor dem Hintergrund geltender und kommender EU-Abgasnormen die Schadstoffemissionen – u. a. die Stickoxidemissionen – einer Beimischung enge Grenzen. Aus antriebstechnischer Sicht erscheint auch künftig ein Anteil von mehr als sieben Prozent Biodiesel eher hinderlich. Viele weiterentwickelte und künftige Biokraftstoffe sind qualitativ deutlich hochwertiger. So sind hydrierte Pflanzenöle oder BTL lediglich aufgrund ihrer niedrigeren Dichte bei der Zumischung zu Diesel nach DIN EN 590 begrenzt. Technisch unproblematisch ist schließlich die Nutzung von regenerativ erzeugtem Methan und – in kommenden Wasserstofffahrzeugen – Wasserstoff. Unabhängig von den Ausgangsstoffen und dem Pfad ihrer Herstellung sind sie chemisch identisch mit ihren nicht regenerativen Pendanten. Auch beim Strom ist die Herkunft für die fahrzeugtechnische Eignung irrelevant.

Verfügbarkeit von Biokraftstoffen bleibt hinter technischen Nutzungspotenzialen zurück.

Szenarien zur Abschätzung biogener Kraftstoffpotenziale unterscheiden sich hinsichtlich der getroffenen Annahmen, weshalb ihre Ergebnisse nur eingeschränkt miteinander vergleichbar sind. Eine restriktive Abschätzung künftiger Biokraftstoffpotenziale unter Berücksichtigung der EU-Richtlinie zur Nachhaltigkeitszertifizierung bietet Zeddies (2010). Vergleicht man die aus antriebstechnischer Sicht mögliche Beimischungsmenge an Ethanol mit der von Zeddies ermittelten Biomasseverfügbarkeit, so zeichnet sich zumindest nach dem Referenzszenario eine deutliche Unterversorgung mit heimischem Ethanol ab. Erst eine gezielte und maximale Biomassebereitstellung (unter Wahrung von Nachhaltigkeitsanforderungen) könnte demnach ab 2025 den Bedarf mit Ethanol aus heimischer Produktion decken. Allein für den Erdgas-/CNG-Pfad – der aus antriebstechnischer Sicht vollständig mit Biomethan bedient werden könnte – wäre das

heutige Biomassepotenzial ausreichend. Weitaus schwieriger zeichnet sich die Dekarbonisierung des Dieselpfades ab, bei dem die nationalen Biomassepotenziale bei weitem nicht ausreichen, um die antriebstechnisch mögliche Beimischungsmenge an Biodiesel bereitzustellen. Insgesamt wird die Substitution von fossilen Kraftstoffen durch Biokraftstoffe nur einen Teil der für die Mobilität benötigten Energie zur Verfügung stellen können. Für die Energiewende im Verkehr ist in dieser Hinsicht eine Forcierung von erneuerbaren, qualitativ hochwertigen Kraftstoffen mit größerer Flächen- und Energieausbeute von zentraler Bedeutung.

Um die dargestellten Potenziale zur Reduktion des Endenergieverbrauchs im Straßenverkehr sowie die Diversifizierung der Kraftstoffbasis bis 2025 und darüber hinaus erzielen zu können, werden flankierende politische Maßnahmen empfohlen:

Steigerung der Energieeffizienz konventioneller Antriebe und Kraftstoffe fördern.

Da Otto- und Dieselmotoren den Straßenverkehr weiterhin dominieren werden, gilt es, die Weiterentwicklung konventioneller Antriebe und Kraftstoffe zu unterstützen. Hürden für eine rasche Marktdurchdringung bereits verfügbarer Effizienztechnologien sollten gezielt abgebaut werden. So reduziert beispielsweise der Betriebsstoff AdBlue® Stickoxidemissionen und ermöglicht so indirekt eine Erhöhung des Wirkungsgrads des Dieselantriebs. Seiner weiteren Etablierung steht eine bisher unzureichende Infrastruktur im Wege, die mitunter auch auf hohe und uneinheitliche Hürden bei der Zulassung zurückzuführen ist.

Weiterentwicklung von innovativen, flüssigen Kraftstoffen stützen.

Die herkömmlichen Biokraftstoffe stoßen an antriebstechnische Grenzen und stehen unter Wahrung von Nachhaltigkeitsanforderungen nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung. Insofern sind weiterentwickelte Biokraftstoffe wie hydrierte Pflanzenöle und BTL z. B. mit weiteren Forschungs- und Demonstrationsförderungen konsequent zu unterstützen und durch Investitionen in entsprechende großtechnische Anlagen abzusichern. Auch Kraftstoffquellen, die nicht in der klassischen Landwirtschaft und ihren Nebenprodukten liegen – beispielsweise Pfade von Algen zu synthetischem Diesel sowie Power-to-Gas –, müssen konsequent erschlossen werden.

Politik der nachhaltigen, erneuerbaren Kraftstoffe langfristig und qualitätsorientiert entwickeln.

Die notwendigen Veränderungen bei der Beimischung von

alternativen Kraftstoffen zu Diesel bzw. Benzin erfordern für Fahrzeughersteller und Kraftstoffproduzenten entsprechenden zeitlichen Vorlauf. Daher muss schon jetzt Klarheit über die Regelungen nach 2020 geschaffen werden. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die fertigen Kraftstoffe hinsichtlich Emission, Langzeitstabilität und Wirkungsgrad im Fahrzeug gleichwertig oder besser sind als heutige. Vor dem Hintergrund der langen Betriebsdauer der Fahrzeuge und der langsamen Durchdringung des Gesamtbestands mit Neufahrzeugen ist bei der Regelung von Beimischungsquoten die Kompatibilität mit Bestandsfahrzeugen zu berücksichtigen. Nur so können CO₂-Minderungswirkungen schon kurz- bis mittelfristig erzielt werden. Zielführend wäre zudem eine deutlich stärkere Vereinheitlichung auf europäischer Ebene.

Durchdringung des Verkehrssektors mit Erdgas und Biomethan flankieren.

Der Einsatz von Erdgas (CNG) und Biomethan im Straßenverkehr bietet erhebliche energie- und klimapolitische Chancen. Um ihn weiter zu fördern, bedarf es neben einer Verlängerung der Energiesteuerermäßigung auf Erdgas als Kraftstoff einer Anpassung der Preisauszeichnung von Erdgas an Tankstellen im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit mit herkömmlichen Kraftstoffen sowie Anreizen zum zielgerichteten Ausbau der Tankstelleninfrastruktur. Zudem sollten die Potenziale von verflüssigtem Erdgas (LNG) im Straßengüterverkehr analysiert sowie im Rahmen der Energiewende die künftige Rolle von aus (zeitweise überschüssigem) regenerativem Strom erzeugtem Methan (Power-to-Gas) weiter untersucht werden.

Parallel Elektromobilität fördern.

Der Pfad der Elektromobilität (Batterie und Wasserstoff/Brennstoffzelle) muss konsequent weiterverfolgt werden. Dabei wird es zum einen eine zunehmende Elektrifizierung des konventionellen Antriebsstrangs (Hybridisierung) – auch mit externer Aufladung (Plug-in-Option) – und zum anderen eine wachsende Anzahl von Fahrzeugen mit rein elektrischem Antriebsstrang geben. Wenn der Verbrennungsmotor als mechanischer Antrieb und Wärmelieferant in Teilstrecken oder auf der gesamten Fahrt ausgeschaltet bleibt, sind davon auch die Nebenaggregate im Fahrzeug betroffen. Das bedeutet grundlegende Neuentwicklungen mit hohem Aufwand. Um diesen Aufwand planbar zu machen, bedarf es sicherer und langfristiger Umfeld- und Rahmenbedingungen.

Veränderungen in der Energieinfrastruktur des Verkehrs planen.

Der angestrebte Umbau der Energiebasis im Verkehr erfordert auch einen passenden politischen Rahmen bei der Energieinfrastruktur. Großtechnische Anlagen zur Produktion künftiger Biokraftstoffe, beispielsweise Pipelines für den Transport von Wasserstoff, oder der Ausbau der Tankstellenanzahl für Erdgas als Kraftstoff erfordern Anschub und Investitionssicherheit. Insofern sollte die Verkehrswegeplanung künftig konsequent um energieinfrastrukturelle Aspekte ergänzt werden. Optionen wie Power-to-Gas können in dieser Hinsicht ihrerseits wichtige Beiträge zur Energiewende leisten.

Lenkungswirkung von Politikinstrumenten verfolgen und gegebenenfalls anpassen.

Zentrales politisches Instrument zur Steuerung des Angebots an energieeffizienten Fahrzeugen ist derzeit vor allem die europäische CO₂-Gesetzgebung für Pkws und leichte Nutzfahrzeuge. Politisch genutzte Hebel zur Steuerung der Nachfrage nach energieeffizienten Fahrzeugen oder alternativen Antrieben bzw. Energieträgern sind die Besteuerung von Kraftstoffen, die CO₂-basierte Kfz-Steuer, die Energieverbrauchskennzeichnung von Neuwagen und Reifen sowie – durch Sonderregelung für die Elektromobilität – die Dienstwagenbesteuerung. Zur Prüfung, ob und in welchem Maße diese Instrumente ihre gewünschte energie- und klimapolitische Lenkungswirkung entfalten und wo gegebenenfalls nachgebessert werden muss, bedarf es eines konsequenten Monitorings.

② Ziele sowie energie- und klimapolitische Herausforderungen im Straßenverkehr.

Personenmobilität und Gütertransport sind in einer arbeitsteiligen Wirtschaft Voraussetzung für Wohlstand und Wachstum. Deutschland ist bei der Produktion von Fahrzeugen international führend. Die Automobilindustrie ist hierzulande ein bedeutender Wirtschaftszweig.

Mit Verkehr sind aber auch spezifische Herausforderungen verknüpft. So verbraucht dieser Sektor in Deutschland rund ein Fünftel der Endenergie. Durch den hohen Anteil des Straßenverkehrs an der gesamten Verkehrsleistung entstehen durch Pkws und Lkws, aber auch durch Busse und motorisierte Zweiräder rund 80 Prozent des Endenergieverbrauchs und der CO₂-Emissionen des Verkehrssektors. Vor diesem Hintergrund werden die Reduktion des Energieverbrauchs und der Einsatz alternativer Kraftstoff- bzw. Antriebspfade diskutiert. Im laufenden Prozess der Entwicklung einer verkehrsträgerübergreifenden Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie will das hier federführende Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) die vielversprechendsten Ansätze identifizieren. So soll ein konkreter Weg aufgezeigt werden, um das im Rahmen der Energiewende der Bundesregierung formulierte Ziel der Reduktion des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor um minus zehn Prozent bis 2020 und um minus 40 Prozent bis 2050 (jeweils gegenüber 2005) zu erreichen.

In diesem Zusammenhang hat die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2010/2011 gemeinsam mit Forschungsinstituten eine Voruntersuchung durchgeführt. Mit dem vorliegenden Hintergrundpapier will die dena jetzt ein zukunftssträchtiges Vorgehen für den Straßenverkehr aufzeigen – unter Beachtung der Anforderungen Energieeinsparung, Klimaschutz und Versorgungssicherheit. Dabei werden nicht nur technische Potenziale berücksichtigt, sondern auch politische Rahmenbedingungen.

Dazu gilt es zunächst, sich die bisherigen Entwicklungen in diesem Bereich zu vergegenwärtigen:

Gestiegene Verkehrsleistung beim Pkw, Rückgang im öffentlichen Straßenpersonenverkehr.

In Deutschland wurde 2009 eine Verkehrsleistung von fast 1,2 Billionen Personenkilometern erbracht – gegenüber 1992 eine Zunahme von rund 24 Prozent, gegenüber 2005 allerdings nur um zweieinhalb Prozent. Dabei ist die Präferenz für den motorisierten Individualverkehr ungebrochen. Zu mehr als drei Vierteln (80 Prozent) werden der Pkw bzw. das Motorrad gewählt. Während kurz nach der Wiedervereinigung rund 730 Mrd. Personenkilometer im motorisierten Individualverkehr zurück-

gelegt wurden, stieg hier die Verkehrsleistung in fast 20 Jahren auf 899 Mrd. und damit um 23 Prozent.

Im öffentlichen Straßenpersonenverkehr mit Bussen hat dagegen die Verkehrsleistung abgenommen – von rund 91 Mrd. Personenkilometern im Jahr 1992 auf 79 Mrd. im Jahr 2009 (BMVBS 2011).

Erhebliche Zunahme der Nachfrage nach Straßengüterverkehrsleistung.

Im gesamten Güterverkehr wurde 2010 eine Transportleistung von 605 Mrd. Tonnenkilometern erbracht – beinahe 60 Prozent mehr als 1992 und sieben Prozent mehr als 2005. Fast drei Viertel (72 Prozent) der Güterverkehrsleistung entfallen auf die Straße. Seit 1992 hat der Güterverkehr auf der Straße um über 70 Prozent zugelegt, seit 2005 um knapp acht Prozent (BMVBS 2011).

Reduktion des Endenergieverbrauchs im Straßenverkehr um ein Prozent seit 2005; Ziel bis 2020: minus zehn Prozent.

Im motorisierten Individualverkehr ist der Energieverbrauch zwischen 1992 und 2010 um fast sieben Prozent zurückgegangen. Im öffentlichen Verkehr fand eine Reduktion um 22 Prozent statt. Der Verbrauch im Straßengüterverkehr ist zwischen 1992 und 2010 um etwa sechs Prozent gestiegen.

Zwischen den Referenzjahren 2005 und 2010 konnte im Straßenverkehr mit Pkws, Motorrädern, Lkws und Bussen eine Verbrauchssenkung von 1,1 Prozent erzielt werden. Bis 2020 soll der gesamte Verkehrssektor seinen Endenergieverbrauch um rund zehn Prozent reduzieren, bis 2050 um 40 Prozent – vgl. Abbildung 1 (BMVBS 2011).

Erfolge bei der Energieeffizienz von Fahrzeugen.

Der Energieverbrauch beim Pkw lag 2010 bei etwa zwei MJ je Personenkilometer. Im Linienbusverkehr rangiert dieser Wert bei 1,1 MJ. Im Straßengüterverkehr mussten rund 1,4 MJ pro Tonnenkilometer geleistet werden (Umweltbundesamt/TREMODO 2012).

Durch die Reduktion der spezifischen Energieverbräuche konnte die Energieeffizienz in den vergangenen 20 Jahren verbessert werden. Dabei wurden starke Verbrauchsminderungen beim Lkw (36 Prozent) und Pkw (20 Prozent) erzielt. Etwas geringer fielen die Verbrauchssenkungen im Linienbusverkehr (13 Prozent) aus.

Seit 1990 leicht gestiegene CO₂-Emissionen im gesamten Straßenverkehr.

Der motorisierte Individualverkehr hatte mit rund 57 Prozent den höchsten Anteil an den CO₂-Emissionen (inklusive

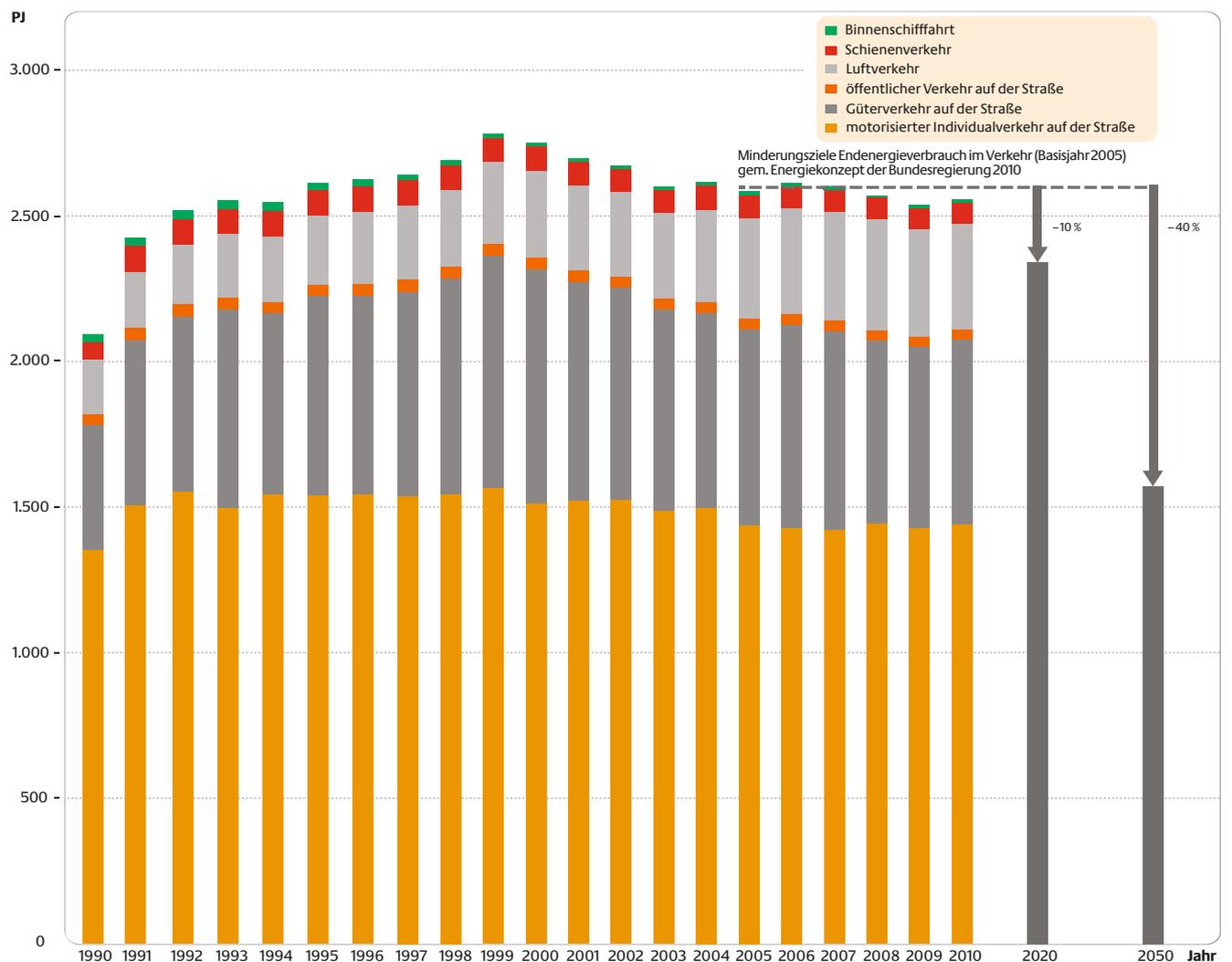


Abbildung 1: Endenergieverbrauch nach Verkehrsbereichen sowie Reduktionsziele.

Energiebereitstellung) des Verkehrssektors. Der Straßengüterverkehr emittierte rund 23 Prozent. Der CO₂-Ausstoß des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs lag bei zwei Prozent.

Die Entwicklung der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor verlief zwischen 1990 und 2010 bei einem Gesamtanstieg von rund acht Prozent je nach Verkehrsträger unterschiedlich: Im öffentlichen Straßenpersonenverkehr sind die CO₂-Emissionen um 24 Prozent

zurückgegangen, im motorisierten Individualverkehr mit Pkw und Motorrädern um fünf Prozent. Der Straßengüterverkehr verzeichnete dagegen eine Zunahme des CO₂-Ausstoßes von 46 Prozent.

Insgesamt sind im Straßenverkehr mit Pkws, Motorrädern, Lkws und Bussen die CO₂-Emissionen von 1990 bis 2005 um rund acht Prozent gestiegen, seither aber auch wieder um drei Prozent gesunken (Umweltbundesamt/TREMOD 2012).

Biokraftstoffanteil bei knapp sechs Prozent.

Bisher bilden Benzin und Diesel aus Erdöl die Energiebasis im Verkehr. Biokraftstoffe machen 2011 knapp sechs Prozent der Endenergie im Verkehr aus (BMU 2012). Flüssiggas (0,85 Prozent) und Erdgas (0,38 Prozent) gewinnen erst seit wenigen Jahren langsam an Relevanz (AG Energiebilanzen 2010).

Kaum alternative Antriebe im Markt – aber Wandlungspotenzial vorhanden.

Knapp 600 Tsd. der insgesamt 43 Mio. Pkws und damit rund 1,4 Prozent des Pkw-Gesamtbstands waren 2011 mit alternativen Antrieben ausgestattet. Davon war mit 456 Tsd. Pkws die Mehrzahl für Flüssiggas (LPG) ausgelegt, knapp 75 Tsd. waren Erdgas/CNG, 48 Tsd. Hybrid- und 4.500 Elektro-Pkws.

Bei alternativen Lkw-Antrieben dominieren ebenfalls Erd- und Flüssiggas. 2006 waren von den rund 4,6 Mio. Lkws und Zugmaschinen 6.700 mit Erdgas- und 860 mit Flüssiggasantrieb zugelassen. Bis 2012 erhöhte sich die Anzahl auf rund 16.900 Erdgas- und 8.700 Flüssiggas-Lkws.

Im Bestand der insgesamt 75 Tsd. Busse hat Erdgas als Kraftstoffalternative im Zeitverlauf etwas an Bedeutung gewonnen – wenn auch auf niedrigem Niveau. So hat der Bestand an Bussen mit Erdgasantrieb zwischen 2006 und 2012 von 1.300 auf 1.500 Fahrzeuge zugenommen (Kraftfahrt-Bundesamt 2011).

Ziele bis 2020: Reduktion des Endenergieverbrauchs um zehn Prozent, Integration von Biokraftstoffen und Forcierung alternativer Antriebe.

Neu zugelassene Pkws dürfen in Europa ab 2015 im Durchschnitt der jeweiligen europäischen Herstellerflotte nicht mehr als 130 g/km CO₂ emittieren – ansonsten drohen Strafzahlungen. Dieser Wert soll bis 2020 auf 95 g/km sinken. Als politisches Ziel zur Reduktion des Energieverbrauchs gilt für den Verkehrssektor in Deutschland, den Endenergieverbrauch bis 2020 gegenüber 2005 um rund zehn Prozent und bis 2050 um 40 Prozent zu senken.

Zudem muss gemäß der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) der EU bis 2020 in jedem Mitgliedsstaat der energetische Anteil der erneuerbaren Energien im Verkehrssektor auf zehn Prozent steigen. Dabei sollen gemäß der Kraftstoffqualitätsrichtlinie (FQD) die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen des Kraftstoffs um sechs Prozent reduziert werden.

Die Bundesregierung plant langfristig, den Verkehrssektor auf den Abschied vom Zeitalter der fossilen Kraftstoffe vorzubereiten (Bundesregierung 2009, BMU 2011).

Die Herausforderung: Energiewende im Verkehr.

Zentrale Herausforderung ist, den Verkehrssektor stärker als bisher in die Energiewende einzubeziehen, und zwar in zweifacher Hinsicht: Zum einen gilt es, Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen weiter zu reduzieren – und das bei absehbar weiter steigenden Verkehrsleistungen. Dabei ist die Antriebs- und Kraftstoffbasis so zu diversifizieren, dass die Versorgungssicherheit gewahrt wird und Energieressourcen für den Verkehr auch unter Berücksichtigung nötiger Investitionen in neue Energieinfrastrukturen weiterhin bezahlbar bleiben. Regenerative Kraftstoffe sollen vermehrt unter Wahrung ökologischer und sozialer Nachhaltigkeit zum Einsatz kommen. Zum anderen hält der Verkehrssektor aber auch Lösungen für die Energiewende bereit, die bisher noch zu wenig Beachtung finden – wie etwa die Potenziale der Elektro-, Erdgas- und Wasserstoffmobilität, Spitzen der regenerativen Stromerzeugung abzupuffern und als Speicher zu fungieren.

Das vorliegende Hintergrundpapier zeigt auf, inwiefern das Erreichen der gesetzten Ziele für den Straßenverkehr realistisch ist, welches Spektrum an Kraftstoffen und Antrieben vielversprechend ist, welche Zielkonflikte bestehen und wie flankierende Rahmenbedingungen ausgestaltet werden sollten.

③ Nachfrageszenarien bis 2025: der Straßenverkehr und sein Energieverbrauch.

Im Folgenden wird der Frage nach der Entwicklung der Energieverbräuche im Straßenverkehr nachgegangen. Zunächst werden grundlegende Faktoren erläutert, die darüber entscheiden, wie viel Energie der Straßenverkehr benötigt. Im Anschluss werden verschiedene Szenarien zur Entwicklung der Energieverbräuche im Straßenverkehr betrachtet und verglichen.

3.1 Der Energieverbrauch der Fahrzeuge.

Eine der zentralen Größen ist der spezifische Energiebedarf der Fahrzeuge, d. h. der Energieverbrauch pro Kilometer. Hier gab es insbesondere in den vergangenen zwanzig Jahren enorme Fortschritte. So haben etwa technische Verbesserungen und Downsizing der Antriebe bei Pkws dazu geführt, dass der spezifische Verbrauch zwischen 1990 und 2010 um knapp 28 Prozent gesunken ist.

In den im Folgenden betrachteten Szenarien wird für die meisten Verkehrsmittel eine weitere Verbrauchsreduktion angesetzt. Wie stark sie ausfällt, hängt von der technischen Weiterentwicklung von Antrieben und Fahrzeugen ab, aber auch vom Anteil alternativer Antriebe wie des Elektromotors. Derartige Effizienzsteigerungen betreffen stets die Neufahrzeuge. Den Energieverbrauch verursacht jedoch der Gesamtbestand. Daher kommt es auch darauf an, in welchem Ausmaß bzw. in welcher Geschwindigkeit effizientere Neufahrzeuge den Gesamtbestand durchdringen. So liegt die Betriebsdauer von Pkws in Deutschland heute bei knapp zwölf Jahren. Folglich durchdringen Neufahrzeuge mit höherer Effizienz und/oder alternativen Antrieben den Gesamtbestand nur sehr langsam, während ältere Fahrzeuge ihn lange dominieren.

3.2 Verkehrs- und Fahrleistungen.

Die zweite zentrale Größe für die Bestimmung des Energieverbrauchs im Straßenverkehr ist die Entwicklung der Fahrleistungen. Ausschlaggebend für die Fahrleistung ist zum einen die Verkehrsleistung – wie viele Personen und Güter über welche Strecken befördert bzw. transportiert werden –, zum anderen die Auslastung der Fahrzeuge.

Viele Szenarien zur Entwicklung der Verkehrsleistung orientieren sich an der „Verkehrsprognose 2025“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) aus dem Jahr 2007. Die reale Entwicklung der Verkehrs- und Fahrleistungen blieb allerdings hinter den Annahmen dieser Prognose zurück.

Dies kann vor allem auf die Wirtschaftskrise, aber auch auf sich ändernde Mobilitätsgewohnheiten zurückgeführt werden. Auch für die kommenden Jahre ist mit einer eher zurückhaltenden gesamtwirtschaftlichen Entwicklung und folglich mit einer schwächeren Entwicklung der Verkehrsleistungen zu rechnen.

Insbesondere bei den schweren Nutzfahrzeugen (Lkws, Lastzüge und Sattelzüge) sind wesentliche Annahmen der „Verkehrsprognose 2025“ des BMVBS aus dem Jahr 2007 nicht mehr haltbar, da sie zentrale Entwicklungen der letzten Jahre noch nicht berücksichtigt konnte – vor allem die Wirtschaftskrise, die das Wachstum im Straßengüterverkehr stark gebremst hat. Die Wachstumsannahmen der „Verkehrsprognose 2025“ enthalten stattdessen die Fortführung des Trends, der seit Beginn der 1990er Jahre besteht und der von einem starken Güterverkehrsaufkommen im Zuge der EU-Osterweiterung geprägt war. Im Inland wurde der wachsende Güterverkehr zu einem erheblichen Anteil vom Baugewerbe verursacht. Dass diese Entwicklungen auch für die kommenden zwei Jahrzehnte fortzuschreiben sind, erscheint aus heutiger Sicht unrealistisch. Diese und weitere Aspekte hat ProgTrans in seinen aktuellen „World Transport Reports 2012/2013“ in den Blick genommen. Die Werte zur Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr für das Jahr 2025 liegen hier nun 16 Prozent unter denen der alten Prognose der Bundesverkehrswegeplanung des BMVBS. Bei der Inlandsfahrleistung rechnet ProgTrans nur noch mit einer moderaten Steigerung von 0,7 Prozent pro Jahr – das ist ein Drittel der in der Bundesverkehrswegeplanung seinerzeit angesetzten Steigerung.

Ein ähnliches Bild ist für den Personenverkehr zu erwarten. Hierfür liegen zwar keine aktuellen Studien vor. Doch die Eckdaten der Bundesregierung für die Verkehrsprognose 2030 für die Bundesverkehrswegeplanung lässt bereits auf eine Halbierung der Zuwachsraten auf etwa 0,3 Prozent pro Jahr schließen (BMVBS 2012).

In den folgend betrachteten Szenarien zur Entwicklung der Energieverbräuche im Straßenverkehr finden diese aktuellen Erkenntnisse allerdings noch keine Berücksichtigung. Insofern dürften die hier dargestellten Energieverbräuche eher als Maximalwerte zu betrachten sein.

3.3 Szenarien zur Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr.

Zur Entwicklung der Energieverbräuche im Straßenverkehr liegen zahlreiche Szenarien verschiedener Autoren und Akteure vor. Einige dieser Szenarien und ihre charakteristischen Annahmen

zur Entwicklung der oben dargestellten Faktoren sollen hier exemplarisch betrachtet werden.

Abweichungen zwischen den einzelnen Szenarien zeigen sich vor allem, wenn es um die spezifischen Energieverbräuche der Fahrzeuge geht. Hier werden unterschiedliche Annahmen zur künftigen Rolle alternativer Antriebe wie der Brennstoffzelle und der Elektromobilität gemacht. Insgesamt wird jedoch für alle Fahrzeugkategorien von einer weiteren Verbesserung der Energieeffizienz und einer Zunahme alternativer Antriebe ausgegangen. Im Straßenpersonenverkehr führt dies unmittelbar zu sinkenden Energieverbräuchen. Im Straßengüterverkehr werden die Verbesserungen jedoch durch das Wachstum der Fahrleistungen deutlich überkompensiert.

Hinsichtlich der Verkehrsleistungen liegen die Szenarien – mit Ausnahme des Trendszenarios der Shell-Lkw-Studie – relativ nah beieinander. So wird für den motorisierten Individualverkehr eine Stagnation oder ein nur sehr geringes Wachstum bis 2025 angenommen. Für den Straßengüterverkehr gehen die Szenarien hingegen alle von einem Wachstum von mindestens 40 Prozent bis 2025 aus, beim Shell-Trendszenario liegt es noch deutlich darüber.

Shell-Pkw-Szenarien und -Lkw-Studie.

Shell legt mit den Pkw-Szenarien und der Lkw-Studie getrennte Analysen des Personen- und des Güterverkehrs vor. In beiden wird zunächst ein Trendszenario präsentiert. Für den Pkw wird dabei langfristig von einer Hybridisierung und Elektrifizierung ausgegangen. Dem Straßengüterverkehr wird im Vergleich zu den anderen hier vorgestellten Szenarien eine noch wesentlich stärkere Zunahme der Fahrleistungen zugrunde gelegt. Dies führt im Vergleich auch zu – aus heutiger Sicht – unrealistisch hohen Energieverbräuchen im Straßenverkehr im Jahr 2025.

BMU-Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-

sicherheit (BMU) hat verschiedene „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“ erarbeiten lassen. Diese unterscheiden sich in ihrer langfristigen Perspektive. So werden im Basisszenario 2011 A bis 2050 bei Pkws 50 Prozent Elektromobilität angesetzt, ergänzt durch Wasserstoff- sowie effiziente konventionelle Antriebe.

ifeu TREMOD.

Das „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ – kurz TREMOD (Transport Emission Model) wurde vom ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg – im Auftrag des Umweltbundesamts entwickelt. Bei der Entwicklung der spezifischen Energieverbräuche wird nicht nur nach Fahrzeugkategorie, sondern auch nach Wegearten differenziert. Beim Pkw stützt sich TREMOD auf die europaweiten CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge, da diese indirekt auch zu einer Limitierung des Kraftstoffverbrauchs führen. Betrachtet wird dabei aber nur die Weiterentwicklung konventioneller Antriebe, alternative Antriebe finden bisher noch keine Berücksichtigung. Ebenso ist das abgeschwächte Wirtschaftswachstum der letzten und kommenden Jahre mit seiner Auswirkung auf die Verkehrsleistung noch nicht eingearbeitet.

WWF Modell Deutschland.

Das „Modell Deutschland“ des WWF bietet ein Referenzszenario und ein Innovationsszenario. Für das Innovationsszenario wird beim Personenverkehr vor allem eine stärkere Zunahme der Elektromobilität angenommen. Beim Güterverkehr findet eine stärkere Verlagerung auf die Schiene statt, sodass die – im Vergleich zum Referenzszenario unveränderte – Zunahme der Verkehrsleistung nicht vollständig auf die Entwicklung des Straßengüterverkehrs durchschlägt.

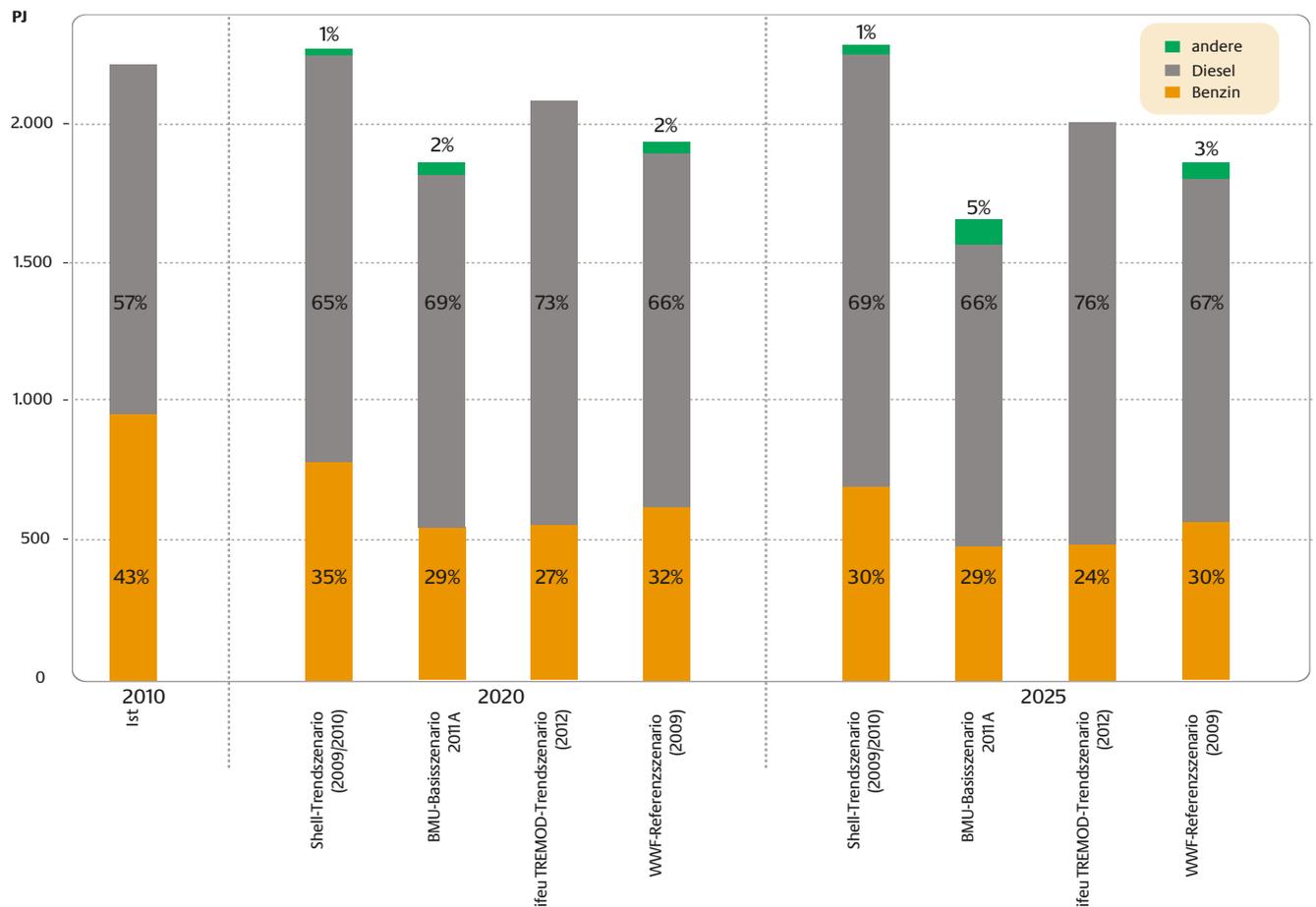


Abbildung 2: Szenarien zur Entwicklung der Energieverbräuche im Straßenverkehr (z. T. abgeleitet).

Auf Basis der vorgestellten Szenarien lässt sich zunächst abschätzen, welcher Energiebedarf für welchen Antriebspfad zu erwarten ist (vgl. Abbildung 2).

Mit Ausnahme des Shell-Trendzenarios zeigen alle Szenarien einen deutlich sinkenden Energieverbrauch im Straßenverkehr. Der Rückgang liegt demnach zwischen sieben und 25 Prozent.

Zusammengenommen liegt der Bedarf an Flüssigkraftstoffen für Verbrennungsmotoren damit auch im Jahr 2025 immer noch bei mindestens 95 Prozent. Die Alternativen Strom, Wasserstoff und Erdgas/CNG erreichen maximal fünf Prozent.

Der Anteil der Dieselmotoren im Straßenverkehr steigt von 57 Prozent im Jahr 2010 auf 66 bis 76 Prozent 2025. Der Anteil der Otto-

kraftstoffe sinkt hingegen von 43 Prozent auf 24 bis 30 Prozent. Ursachen für diese Entwicklung sind vor allem das Wachstum im Straßengüterverkehr und die steigende Nachfrage nach Dieselmotoren. Absolut betrachtet sind allerdings auch beim Dieselmotorenverbrauch nicht zwangsläufig Zuwächse zu erwarten – im BMU-Basiszenario sinken sie sogar leicht.

Die dargestellten Szenarien geben Auskunft über den Bedarf nach Dieselmotoren, Ottomotoren, CNG, Strom und Wasserstoff. Mit welchen konkreten Energieträgern diese Nachfrage bedient wird, darüber treffen sie keine Aussage. So wird beispielsweise der künftige Absatz von Dieselmotoren betrachtet, aber nicht differenziert nach fossilem Diesel, Biodiesel, BtL, hydrierten Pflanzenölen und -fetten etc.

④ Relevante Kraftstoff- und Antriebspfade für Pkws, Lkws und Busse.

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Szenario für den Energiebedarf im Straßenverkehr entwickelt. Im Folgenden wird nun erörtert, welche Energieträger zur Deckung dieses Bedarfs zur Verfügung stehen. Dabei konzentriert sich dieses Hintergrundpapier auf solche Optionen, die nach heutigem Stand des Wissens und der Technik im Betrachtungszeitraum zur Marktreife gelangen und in nennenswertem Umfang zur Verfügung stehen. Neben spezifischen Vor- und Nachteilen werden auch Potenziale und Grenzen der Nutzung und der Bereitstellung der einzelnen Kraftstoffoptionen aufgezeigt.

4.1 Marktreife Kraftstoff- und Antriebspfade bis 2025.

Jede Antriebstechnologie erfordert einen bestimmten Kraftstoff. Die Einsatzmöglichkeiten eines Kraftstoffs sind wiederum auf eine oder wenige Antriebsarten beschränkt. Dies gilt auch für die regenerativ erzeugten Substitute konventioneller Kraftstoffe. Außerdem sind die verschiedenen Antriebs- und Kraftstoffkombinationen mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen nicht für jedes Einsatzgebiet gleichermaßen gut geeignet.

Ottomotor sowie Ottokraftstoffe.

Bei den Verbrennungsmotoren ist vor allem zwischen Selbstzündern (Dieselmotor) und Fremdzündern (Ottomotor) zu unterscheiden: Bei Letzterem wird der Kraftstoff mittels einer Zündquelle entzündet, eine Selbstzündung ist nicht erwünscht. Eingesetzt wird im Ottomotor bislang vor allem fossiles Benzin. Als regeneratives Substitut mit ähnlichen Eigenschaften kommen in erster Linie der Alkohol Ethanol in Frage bzw. das hieraus weiterveredelte und höherwertige Ethyltertbutylether (ETBE). Im Ottomotor können aber – einige Anpassungen vorausgesetzt – auch Erdgas (CNG), Flüssiggas (LPG) und Wasserstoff eingesetzt werden.

Benzin

Benzin und Superbenzin sind leichte Mineralölprodukte, die sich für den Einsatz in Ottomotoren eignen. Hauptbestandteil sind relativ kurze Kohlenstoffketten. Ottokraftstoffe verfügen über eine hohe Klopfestigkeit, d. h. eine geringe Neigung zur Selbstzündung. Dies ist wichtig, da beim Ottomotor eine kontrollierte Zündung durch den Zündfunken erfolgen soll.

Ethanol

Ethanol wird durch die Vergärung zucker- oder stärkereicher Pflanzenbestandteile und anschließende Destillation gewonnen. Künftig werden vermehrt Verfahren zum Einsatz kommen, die auch eine Nutzung weiterer Pflanzenbestandteile (Lignozellu-

lose) erlauben (Ethanol der zweiten Generation). Ethanol lässt sich wie Benzin in Ottomotoren einsetzen – allerdings mit Einschränkungen. Problematisch ist vor allem die Eigenschaft des Ethanols, Wasser anzuziehen. Heutige Fahrzeuge vertragen eine Beimischung von zehn Prozent Ethanol zum Benzin. Für die Zukunft ist eine Beimischung von 20 bis 25 Prozent denkbar – eine gleichbleibend hohe Qualität des Grundkraftstoffs vorausgesetzt.

FlexFuel-Fahrzeuge fahren mit jeglicher Mischung von null bis 85 Prozent Ethanol. Verglichen mit Fahrzeugen, die auf einen einzigen Kraftstoff hin optimiert sind (und daher nur geringere Beimischungen vertragen), schöpfen sie ihre Effizienzpotenziale allerdings nicht aus. Der erforderliche Sensor zur Ermittlung des Alkoholgehalts, der Einsatz besonders alkoholresistenter Materialien im Kraftstoffkreislauf sowie die schlechteren Kälteeigenschaften des Ethanols verursachen zudem höhere Kosten.

Dieselmotor sowie Dieselmotorkraftstoffe.

Im Gegensatz zum Ottomotor basiert der Dieselmotor mit seinem bis zu 20 Prozent höheren Wirkungsgrad auf einer Selbstzündung, die durch die Einspritzung des Kraftstoffs in die verdichtete heiße Luft erreicht wird. An den Kraftstoff werden daher gänzlich andere Anforderungen gestellt als bei Ottomotoren. Eingesetzt wird bislang vor allem fossiler Diesel. Als regenerative Substitute kommen zunächst Produkte auf Basis von Pflanzenölen und -fetten in Frage. Heute sind dies Biodiesel und hydrierte Pflanzenöle und -fette, in Zukunft auch synthetisch erzeugter Diesel.

Diesel

Diesel ist ein Mitteldestillat, nah verwandt mit Kerosin und leichtem Heizöl. Die Kohlenstoffketten sind länger als beim Ottokraftstoff. Diesel hat eine hohe Bereitschaft zur Selbstzündung.

Biodiesel

Biodiesel wird aus ölreichen Pflanzenbestandteilen hergestellt – in Deutschland vor allem aus Rapssaat. Biodiesel ist chemisch nicht identisch mit Diesel, hat jedoch ähnliche Eigenschaften und lässt sich diesem in geringen Mengen beimischen. Bis zu sieben Prozent sind heute allgemein technisch akzeptiert.

Hydrierte Pflanzenöle und -fette (HVO)

Durch eine katalytische Reaktion mit Wasserstoff lassen sich Pflanzenöle und -fette so umwandeln, dass Kraftstoffe entstehen, die dem fossilen Diesel stark ähneln – sogenannte HVO (Hydro-treated Vegetable Oils). Daher können sie Dieselmotorkraftstoffen zu großen Anteilen beigemischt werden oder diese vollständig

ersetzen. Ein Vorteil gegenüber fossilem Diesel sind die geringen Luftschadstoffemissionen bei der Verbrennung und die hohe Zündwilligkeit (Cetanzahl). Die Hydrierung kann entweder durch eine Mitverarbeitung in Mineralölraffinerien erfolgen oder aber in eigenen HVO-Raffinerien.

Biomass to Liquid (BtL)

Mit BtL (Biomass to Liquid) werden synthetisch hergestellte Dieselmotorkraftstoffe auf pflanzlicher Basis bezeichnet. Die Herstellung ist zwar aufwendiger und energieintensiver als bei herkömmlichem Biodiesel oder auch bei hydrierten Pflanzenölen. Dafür können aber nicht nur fettreiche Pflanzenbestandteile (Ölsaaten und -früchte) verwendet werden, sondern ganze Pflanzen bzw. jegliche Art von Biomasse. Rohstoffbasis und Rohstoffausbeute sind daher deutlich größer, der Flächenverbrauch geringer. Es stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, deren großtechnische Umsetzung derzeit allerdings noch aussteht. BtL und HVO sind im Gegensatz zu Biodiesel so hochwertige Substitute für Diesel, dass sie von der Automobilindustrie zur dauerhaften Einhaltung künftiger Emissions- und Verbrauchsvorgaben als ausgesprochen hilfreich eingestuft werden.

Weitere langfristige Alternativen zum fossilen Diesel

Neben Biodiesel, HVO und BtL werden noch weitere Rohstoffe und zugehörige Herstellungsverfahren erforscht und erprobt. Vielversprechend für einen Einsatz im Betrachtungszeitraum bis 2025 sind z. B. Vergärungs-/Fermentationsverfahren mittels Hefen zu paraffinischen Komponenten oder Verfahren auf der Basis von Mikroorganismen wie Algen.

Erdgas und Biomethan.

Erdgas/CNG

Im Unterschied zu Diesel- und Ottokraftstoff ist Erdgas kein Mineralölprodukt, sondern wird aus eigenen Lagerstätten gewonnen. Hauptbestandteil ist Methan. Methan besitzt eine hervorragende Klopfestigkeit. Das Verhältnis zwischen Wasserstoff- und Kohlenstoffatomen ist doppelt so groß wie beim flüssigen Ottokraftstoff (4:1 beim Methan, ca. 2:1 bei flüssigem Kraftstoff). Dadurch ergeben sich deutliche Vorteile bei den CO₂-Emissionen der Verbrennung. Erdgas wird in erster Linie in Ottomotoren eingesetzt, aber auch eine Beimischung in Dieselmotoren von Nutzfahrzeugen ist möglich (Dual Fuel). In der Regel wird Erdgas in gasförmigem Zustand transportiert und genutzt. Für den Einsatz bzw. die Speicherung in Fahrzeugen wird es komprimiert (kurz CNG für Compressed Natural Gas). Ein entscheidender Vorteil dieser Option ist das Vorhandensein der Verteilungs- und Versorgungsinfrastruktur.

LNG

Durch Abkühlung auf $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist bei Erdgas bzw. Methan auch eine Verflüssigung möglich. Vorteil dieses Liquefied Natural Gas (LNG) ist seine höhere Dichte. Bisher wird die Verflüssigung hauptsächlich für den Schiffstransport von Erdgas über weite Distanzen genutzt; der hohe Energieaufwand für die Abkühlung fällt hier nicht stark ins Gewicht. Aber auch eine direkte Nutzung von LNG in Nutzfahrzeugen findet zunehmend Beachtung, da die höhere Dichte noch größere Reichweiten erlaubt.

Methan aus erneuerbaren Quellen

Alternative Pfade der Herstellung, insbesondere von CNG, sind die heute bereits etablierte Vergärung von Biomasse zu Biomethan und künftig auch die Methanisierung von Wasserstoff (Power-to-Gas). Wenn die Methanisierung einer Wasserstoffherzeugung aus erneuerbarem Strom (Elektrolyse) direkt nachgeschaltet wird, kann so Wind- und Sonnenenergie genutzt werden, die sich in Phasen schwacher Nachfrage oder von Netzengpässen nicht einspeisen bzw. durchleiten lässt.

Flüssiggas (LPG).

Flüssiggas (kurz LPG für Liquefied Petroleum Gas) fällt vor allem bei der Erdgas- und Erdölförderung an, aber auch als Nebenprodukt in Mineralölraffinerien. Hauptbestandteile sind Butan und Propan, wodurch sich das Flüssiggas vom Erdgas unterscheidet. Es kann ebenfalls in Ottomotoren eingesetzt werden.

Elektromotor sowie elektrische Energie.

Obwohl bisher erst eine geringe Zahl von Fahrzeugen am Markt ist, steht die Elektromobilität seit einigen Jahren im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit, wenn es um die Reduktion verkehrsbedingter Klimagasemissionen geht. Das liegt an den Vorteilen, die der Elektromotor gegenüber dem Verbrennungsmotor hat: Bei der Nutzung von Strom im Elektromotor – der Umwandlung der elektrischen in Bewegungsenergie – fallen lokal keine CO₂- oder sonstige Schadstoffemissionen an. Die Nutzung von Strom als Energieträger bietet zudem die Perspektive sehr hoher regenerativer Anteile. Außerdem verfügt der Elektromotor über einen großen Wirkungsgrad: Während Verbrennungsmotoren nicht einmal 50 Prozent der aufgewendeten Endenergie in Bewegung umsetzen, sind es beim Elektromotor über 90 Prozent.

Dem stehen allerdings auch spezifische Nachteile gegenüber: Die benötigten Akkumulatoren sind teuer und schwer. Ihre begrenzte Kapazität limitiert die möglichen Reichweiten der Fahrzeuge bisher stark. Zudem ist die Aufladung zeitintensiv und nicht im

Rahmen spontaner, kurzer Betankungsstopps realisierbar. Elektromobilität benötigt eine spezielle Energieinfrastruktur.

Viele der genannten Nachteile gelten so nur für Fahrzeuge, die ausschließlich über einen batteriegespeisten Elektromotor verfügen. Das Feld der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge ist indes größer. Bei Hybridfahrzeugen werden ein Verbrennungsmotor und ein Elektromotor kombiniert: Der „Mild Hybrid“ verfügt nur über einen kleinen Elektromotor zur Ergänzung des konventionellen Hauptantriebs. Der „Full Hybrid“ hat einen stärkeren Elektromotor und einen größeren Akku, der im Falle des „Plug-in-Hybrids“ auch über die Steckdose aufgeladen werden kann.

Entscheidend für die Klimaverträglichkeit von Strom als Antriebsenergie ist die Vorkette, d. h. der Weg der Stromproduktion. Aufgrund des Strommixes in Deutschland sowie der Verluste beim Leistungstransport und der Speicherung ist die CO₂-Bilanz per se noch nicht günstiger als bei konventionellen Verbrennungsmotoren.

Elektromotoren mit Brennstoffzellen und Wasserstoff.

Den zuvor genannten Elektroantrieben gemeinsam ist die Nutzung eines Akkus zur Speicherung der Energie und Speisung des Elektromotors. Einen anderen Weg gehen Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Hier dient Wasserstoff als Energieträger. Ein Brennstoffzellensystem im Fahrzeug wandelt die im Wasserstoff gespeicherte chemische in elektrische Energie um. Den Vortrieb leistet dann ebenfalls ein Elektromotor.

Hierbei fallen keine direkten CO₂- oder Schadstoffemissionen an. Wie beim Strom entscheidet aber auch beim Wasserstoff der Pfad der Erzeugung über die Umwelt- und Klimaverträglichkeit. Die Elektrolyse erlaubt die Produktion von Wasserstoff aus Wasser, erfordert aber elektrische Energie. Sinnvoll ist dieser Weg vor allem, wenn so regenerativ erzeugter Strom genutzt werden kann, der sich zu Spitzenzeiten von Wind oder Sonnenschein teilweise nicht ins Netz einspeisen lässt. Als (chemischer) Speicher für elektrische Energie kann Wasserstoff einen Beitrag zu einer der großen Herausforderungen der Energiewende liefern.

Technisch etabliert ist neben der Elektrolyse vor allem das Verfahren der Dampfreformierung. Als Rohstoffe kommen dabei Erdgas, andere fossile Kohlenwasserstoffe oder Biomasse in Frage, wobei erst der Einsatz von Biomasse für eine günstige Klimabilanz sorgt.

Erforscht wird derzeit auch die Kultivierung von Algen, die Wasserstoff als Nebenprodukt der Photosynthese erzeugen. Zudem können zur Gewinnung von Wasserstoff biogene Reststoffe eingesetzt werden. Dieses Verfahren kann künftig die Möglichkeit eröffnen, große Mengen Wasserstoff zu wirtschaftlichen Kosten regenerativ zu erzeugen.

Die dargestellten Antriebe und Kraftstoffe sind aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften für einige Verkehrsmittel auf der Straße besser, für andere weniger oder gar nicht geeignet. Von Nischenanwendungen einmal abgesehen, gibt Abbildung 3 einen Überblick hierüber.

	Ottomotor (inklusive Hybride)				Dieselmotor (inklusive Hybride)				Elektroantrieb	
	Benzin / Super	Ethanol (Beimischung)	Erdgas / reg. Methan	Flüssiggas (LPG)	Diesel	Biodiesel (Beimischung)	BtL	hydr. Öle / Fette (HVO)	Strom	Wasserstoff
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	●	●	● (LNG)	●	● (inkl. Dual Fuel)	●	●	●	●	●
	●	●	●	●	● (inkl. Dual Fuel)	●	●	●	●	●

● bis 2025 gut geeignet

● bis 2025 bedingt geeignet

● bis 2025 ungeeignet

● bis 2025 bedingt geeignet, aber längerfristig Potenzial

● bis 2025 ungeeignet, aber längerfristig Potenzial

Abbildung 3: Eignung ausgewählter Kraftstoff-/Antriebskombinationen für den Straßenverkehr bis 2025.

Die Übersicht verdeutlicht verkehrsmittelspezifische Unterschiede. Demnach kann die künftige Versorgung mit Kraftstoffen nicht auf wenige Optionen begrenzt, sondern muss vielmehr den unterschiedlichen Anforderungen der einzelnen Verkehrsmittel differenziert gerecht werden.

4.2 Vor- und Nachteile von Biokraftstoffen.

Fossile Kraftstoffe stehen seit vielen Jahren in der Kritik. Bei ihrer Verbrennung werden Klimagase in erheblichen Mengen freigesetzt. Ihre Verfügbarkeit ist begrenzt, und ein Großteil der Lagerstätten befindet sich außerhalb Europas bzw. Deutschlands. Demnach ist die Versorgung von Unsicherheiten und tendenziell steigenden Preisen geprägt. Als mögliche Alternative kommen Biokraftstoffe zum Einsatz bzw. in Betracht. Diese weisen folgende Vor- und Nachteile auf:

CO₂-Reduktion.

Die Nutzung regenerativer Kraftstoffe erlaubt eine Diversifizierung der Kraftstoffbasis und kann so einen wichtigen Beitrag zur künftigen Versorgungssicherheit des Verkehrssektors leisten. Primäres Ziel für ihre Nutzung ist jedoch die Senkung verkehrsbedingter Klimagasemissionen. So wird zwar bei der Verbrennung von Biokraftstoffen – ebenso wie bei den fossilen Kraftstoffen – CO₂ freigesetzt. Die Pflanzen, aus denen die Biokraftstoffe produziert wurden, haben aber dieses CO₂ zuvor aus der Atmosphäre aufgenommen. Ob und wie klimafreundlich ein erneuerbarer Kraftstoff tatsächlich ist, zeigt daher erst ein Blick auf die gesamte Nutzungskette „well-to-wheel“ (von der Quelle bis zum Rad). Dabei werden nicht nur große Unterschiede zwischen den einzelnen regenerativen Kraftstoffen sichtbar, sondern auch zwischen verschiedenen Pfaden ihrer Erzeugung sowie zwischen verschiedenen Herkunftsregionen (vgl. Abbildung 4).

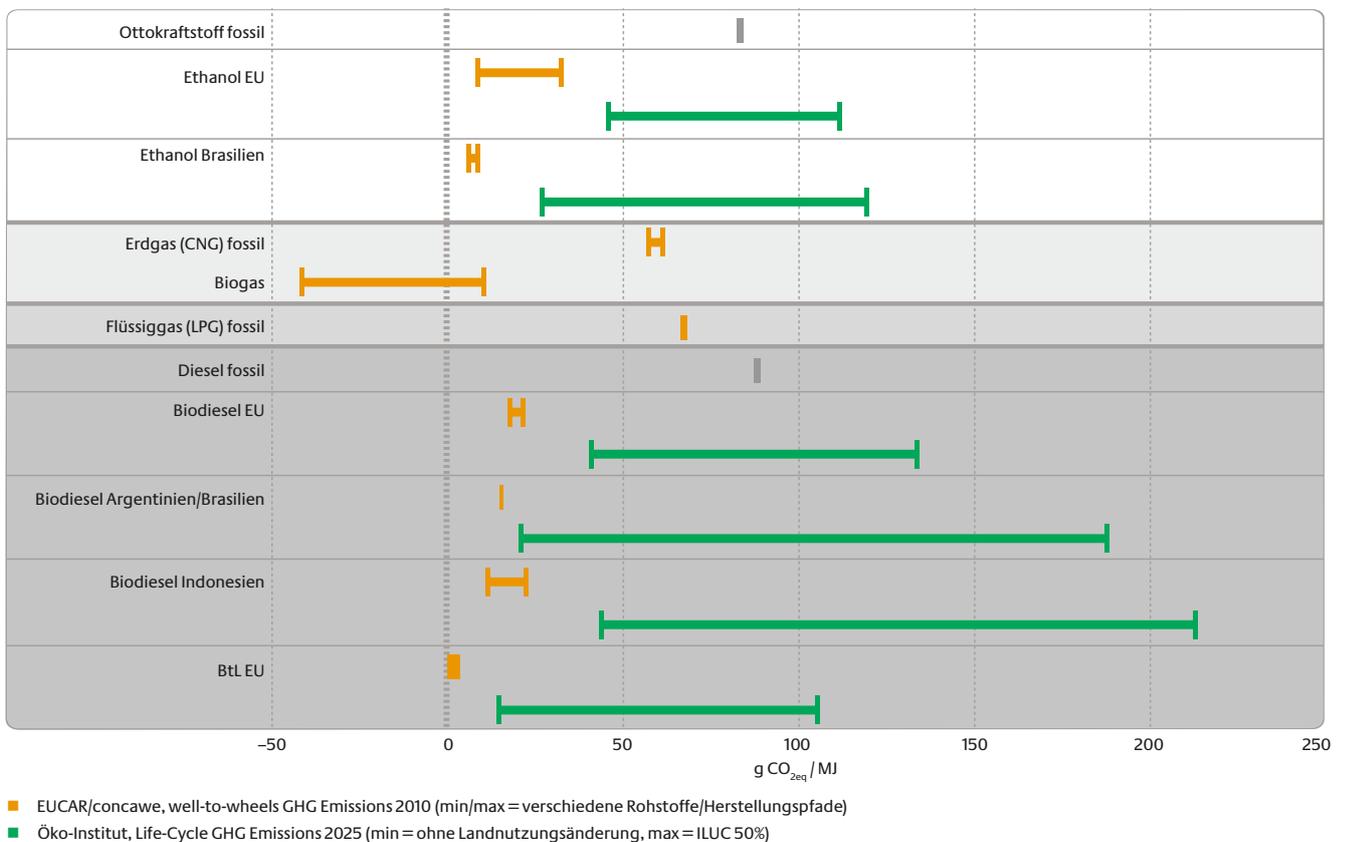


Abbildung 4: Spektrum der CO₂-Emissionen ausgewählter Kraftstoffoptionen inkl. Vorkette.

Insbesondere beim Biodiesel bieten viele Herstellungs- und Herkunftspfade kein CO₂-Reduktionspotenzial, sobald auch indirekte Landnutzungsänderungen (Erläuterung siehe unten) berücksichtigt werden. Erst beim synthetischen Produkt BtL fällt die Klimabilanz deutlich günstiger aus.

Eine Besonderheit stellt das Biogas dar: Wird zur Herstellung Gülle verwendet, so werden Methanemissionen vermieden, die sonst bei der Güllelagerung anfallen. Da Methan um ein Vielfaches klimaschädlicher ist als CO₂, kann der Einsatz von Biogas in diesem Fall sogar zu einer effektiven Klimaverbesserung führen.

Die Erzeugung und der Einsatz von regenerativen Kraftstoffen gehen aber auch mit spezifischen Herausforderungen einher:

Nutzungskonkurrenzen.

Biomasse bzw. entsprechende Anbauflächen stehen weder in Deutschland noch in Europa oder global in unbegrenztem Ausmaß zur Verfügung – vor allem, wenn ökologische und soziale Nachhaltigkeitsanforderungen an die Flächennutzung gestellt werden. Ist Biomasse bzw. Anbaufläche jedoch ein knappes Gut, so resultieren daraus entsprechende Nutzungskonkurrenzen. Zum einen sind dies Konkurrenzen zwischen der Nutzung von Biomasse als Energierohstoff und der Produktion von Nahrungsmitteln („Teller vs. Tank“) sowie der stofflichen Nutzung. Zum anderen sind es Konkurrenzen innerhalb der energetischen Nutzung: Biomasse wird nicht nur für die Biokraftstoffproduktion, sondern auch für die Strom- und Wärmeerzeugung verwendet. Schließlich sind auch zunehmende Nutzungskonkurrenzen innerhalb des Verkehrssektors, d. h. zwischen den einzelnen Verkehrsmitteln, zu erwarten.

Soziale Probleme.

Die Nutzung von Nahrungsrohstoffen für die Kraftstoffproduktion kann nicht nur Konsequenzen für die weltweite Lebensmittelversorgung haben. Sie kann auch soziale Probleme verursachen. Vor allem in Entwicklungs- oder Schwellenländern setzen einige Akteure zum Teil massiven Druck sowie unfaire Methoden ein, um sich von der ortsansässigen Bevölkerung Land für die gewinnbringende, exportbestimmte Agrarproduktion anzueignen („land grabbing“).

Landnutzungsänderungen.

Seit einigen Jahren wird intensiv eine mögliche indirekte Landnutzungsänderung (kurz ILUC für „Indirect Land Use Change“) infolge der Biokraftstoffproduktion diskutiert. Dabei wird

angenommen, dass die heimische Nutzung von Biokraftstoffen in Drittländern zur Umwandlung von Waldflächen in Anbauflächen führt – und zwar unabhängig davon, ob auf diesen neuen Agrarflächen überhaupt Energierohstoffe angebaut werden. Im Ergebnis werden so Treibhausgasenken vernichtet. In einer globalen und langfristigen Perspektive verschlechtert dieser Effekt daher die Klimabilanz von Biokraftstoffen. Der ILUC-Effekt – vor allem seine Quantifizierung – ist umstritten. Die EU erwägt derzeit, einen „ILUC-Faktor“ in die gesetzliche Qualifizierung von Biokraftstoffen zu integrieren. Dieser soll allerdings pauschal gelten, d. h. ohne Berücksichtigung verschiedener Herkunftsregionen und verschiedener Biomassebasen.

Beeinträchtigungen für Biodiversität und Böden.

Neben der Klimawirkung werden seit einigen Jahren auch ökologische Risiken von Biokraftstoffen diskutiert. So kann der landwirtschaftliche Anbau von Energiepflanzen mit einer Intensivierung bisher nur extensiv oder gar nicht genutzter Flächen verbunden sein und Auswirkungen auf die Biodiversität haben. Zusätzliche Monokulturen, Grünlandumbruch, Entwässerung von Moorböden, Wiederbewirtschaftung von Stilllegungsflächen – all dies kann eine Bedrohung für die Arten- und Biotopvielfalt darstellen.

Die genannten Risiken können aber nicht allen Biokraftstoffen pauschal und gleichermaßen angelastet werden. So sind sie bei Biokraftstoffen der zweiten Generation wie BtL sowie beim Biogas deutlich geringer: Da hier ganze Pflanzen oder biogene Abfallstoffe verwertet werden und nicht öl- oder stärkereiche Pflanzenbestandteile, ist der Flächenbedarf viel geringer.

4.3 Vorzüge und Probleme bei der Nutzung von Biokraftstoffen im Fahrzeug.

Die meisten Biokraftstoffe weisen ähnliche Eigenschaften wie ihre fossilen Pendanten auf, sind aber chemisch nicht identisch mit ihnen. Ihr Einfluss auf die Antriebs- und Fahrzeugtechnik z. B. bei Wirkungsgrad, Langzeitverhalten und Schadstoffemissionen kann daher die Nutzung von Biokraftstoffen limitieren. Die Beimischung der einfachen Biokraftstoffe Ethanol und Biodiesel ist daher heute auf zehn bzw. sieben Prozent begrenzt.

Ethanol

Ethanol kann Dichtungen angreifen und zur Korrosion von Bauteilen aus Aluminium führen. Diese Themen sind in heutigen Fahrzeugen bereits berücksichtigt und gelöst. Ethanol verbrennt

jedoch auch sehr sauber und seine hohe Oktanzahl (d. h. die geringe Neigung zur unerwünschten Selbstentzündung) spricht aus motortechnischer Sicht sogar für diesen Kraftstoff. So hält sich bei einer Anhebung des Ethanolanteils auf bis zu 25 Prozent der technische Mehraufwand in Grenzen, während die Oktanzahl von 95 auf ca. 102 ansteigt. Die Automobilindustrie sieht beim Ethanol daher schon kurzfristig ein antriebsseitiges Beimischungspotenzial von bis zu 25 Prozent. Dies setzt eine gleichbleibend hohe Qualität des fossilen Grundkraftstoffs zwingend voraus. Da Heizwert und Dichte beim Ethanol geringer sind als bei Benzin, ist allerdings der volumenbezogene Kraftstoffverbrauch etwas höher.

Untersuchungen der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) haben ergeben, dass im Sinne der CO₂-Reduktion ein fester Ethanolanteil von 20 bis 25 Prozent als Standard-Ottokraftstoff einer Nutzung der gleichen Ethanolmenge in einer entsprechend geringeren Anzahl von E85-Fahrzeugen (flexible fuel) eindeutig vorzuziehen ist (FVV 2012). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der positive Effekt auf die Klopffestigkeit bei einer Erhöhung des Ethanolanteils nicht linear zunimmt.

Demnach würde der E85-Pfad erst dann sinnvoll, wenn nach einer weitgehenden Umstellung des Fahrzeugbestands auf E20-25 immer noch große Mengen Ethanol zusätzlich verfügbar wären. Dies entspricht der heutigen Situation in Brasilien. Bei höheren Beimischraten von biogenen Anteilen wie Ethanol wird auch die Qualität des Grundkraftstoffs immer wichtiger. So sind besonders zukünftige Anforderungen an die Emissionen wie die Partikelanzahl, unkontrollierte Verbrennungseignisse und Anforderungen durch hybridisierte Antriebskonzepte zu berücksichtigen.

Biodiesel

Biodiesel stellt aufgrund seines Lösungsmittelverhaltens höhere Anforderungen an treibstoffführende Teile als fossiler Diesel. Seine größere Zähflüssigkeit kann die Einspritztechnik beeinträchtigen. Eine besondere Hürde stellen zudem die Schadstoffemissionen dar: Biodiesel ist zwar praktisch schwefelfrei, vor dem Hintergrund geltender und kommender EU-Abgasnormen (derzeit Euro 5, ab 2014 Euro 6) setzen jedoch unter anderem die Stickoxidemissionen einer Beimischung von Biodiesel enge Grenzen. Die Verwendung von Partikelfiltern stellt zwar technisch grundsätzlich kein Problem mehr dar. Aufgrund des höheren Ascheanteils im Biodiesel ist aber das Aschereinigungsintervall

beim Dieselpartikelfilter kürzer, als z. B. für Euro-6-Nutzfahrzeuge notwendig. Insgesamt sieht die Automobilindustrie auch künftig kein technisches Potenzial für eine Beimischung über die heute geltenden sieben Prozent hinaus.

Wie bei Ethanol führen auch beim Biodiesel Dichte und Heizwert zu einem Mehrverbrauch und eine entsprechend geringere Leistung im Vergleich zum fossilen Diesel. Dies kann vor allem bei Nutzfahrzeugen und Bussen kritisch sein.

Biokraftstoffe der zweiten Generation

Die genannten Einschränkungen treffen vor allem auf die konventionellen Biokraftstoffe zu. Qualitativ hochwertige Alternativen wie HVO oder BtL sind als reine Kohlenwasserstoffe ein ohnehin natürlicher Bestandteil des fossilen Diesels und lediglich durch ihre niedrigere Dichte bei der Zumischung zu Diesel nach DIN EN 590 begrenzt. Ihre Beimischung zu Diesel hat insbesondere keine negativen Auswirkungen auf das Abgasnachbehandlungssystem, sodass auch die Einhaltung der Emissionsgrenzen und die verbrauchsoptimale Verbrennung gewährleistet sind.

Methan, Strom und Wasserstoff aus regenerativen Quellen

Unproblematisch ist schließlich die Nutzung von regenerativ erzeugtem Methan und Wasserstoff. Unabhängig von den Ausgangsstoffen und dem Pfad ihrer Herstellung sind sie chemisch identisch mit ihren nicht regenerativen Pendanten. Auch beim Strom ist die Herkunft für die fahrzeugtechnische Eignung irrelevant.

Abbildung 5 gibt einen Überblick über die antriebstechnischen Beimischungsgrenzen im Fahrzeug aus heutiger Sicht.

Ethanol, Ethyltertbutylether (ETBE)	20–25 %
Ethanol in FlexFuel-Fahrzeugen	85 %
regenerativ erzeugtes Methan	100 %
Biodiesel	7 %
hydrierte Pflanzenöle und -fette (HVO)	100 %
Biomass to Liquid (BtL)	100 %
regenerativ erzeugter Strom	100 %
regenerativ erzeugter Wasserstoff	100 %

Abbildung 5:
Antriebstechnische Beimischungspotenziale regenerativer Kraftstoffe bis 2025.

Fahrzeuge haben eine lange Betriebsdauer – bei Pkws sind es in Deutschland knapp zwölf Jahre. Folglich durchdringen Neufahrzeuge mit höherer Effizienz und/oder alternativen Antrieben den Gesamtbestand nur sehr langsam, während ältere Fahrzeuge den Bestand noch lange dominieren. Wenn eine Beimischung regenerativer Kraftstoffe nicht erst langfristig zu einer signifikanten CO₂-Minderung führen soll, muss sie daher auch mit älteren Fahrzeugen kompatibel sein. Umso interessanter sind folglich Optionen, die aus antriebstechnischer Sicht zu 100 Prozent sogar in heutigen Fahrzeugen einsetzbar sind.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich auch durch den künftig zunehmenden Anteil an Hybridfahrzeugen: Da der Verbrennungsmotor hier seltener zum Einsatz kommt, steigt die Verweildauer der Kraftstoffe im Tank und in kraftstoffführenden Leitungen. Hieraus resultieren höhere Anforderungen an ihre chemische Stabilität und Sauberkeit. Dieses Problem trifft in besonderem Maße den Biodiesel, aber auch die Qualität fossiler Kraftstoffe und Additive wird möglicherweise neu zu regeln sein.

4.4 Potenziale und Grenzen der Verfügbarkeit von Biokraftstoffen.

Nach derzeitigem Forschungs- und Entwicklungsstand stehen bis 2025 zur Dekarbonisierung von fossilem Diesel Biodiesel

der ersten Generation, BtL (und anderer Biodiesel der zweiten Generation) sowie hydrierte Öle und Fette (HVO) als Substitutionsalternativen zur Verfügung. Zur Dekarbonisierung von Benzin und Superbenzin kann bis 2025 Bioethanol der ersten und zweiten Generation eingesetzt werden. Biomethan sowie synthetisches Methan aus Power-to-Gas-Herstellung auf Basis regenerativer Energieträger (Wind, Sonne, Wasser) kommen zur Substitution von Erdgas in Frage.

Szenarien der Biomasseverfügbarkeit.

Zur Abschätzung von Biomasepotenzialen und verfügbaren Flächen zu ihrer Bereitstellung liegen mittlerweile zahlreiche Studien vor. Diese weisen zum Teil starke Unterschiede auf hinsichtlich der getroffenen Annahmen und unterstellten Rahmenbedingungen. Hierzu zählen beispielsweise die betrachteten Rohstoffe (Energiepflanzen vs. biogene Abfall- und Reststoffe), die Anbaufläche (vollwertiges Ackerland vs. ungenutzte bzw. frei werdende Flächen), die Anbau- sowie Verarbeitungsverfahren, die zugrunde gelegten Nachhaltigkeitsanforderungen und nicht zuletzt auch Nutzungskonkurrenzen zur Nahrungsmittelproduktion sowie zur Strom- und Wärmeerzeugung. Die Ergebnisse sind folglich nur eingeschränkt miteinander vergleichbar (vgl. DBFZ, IUP 2011; Fritsche u. a. 2004; EEA 2006, 2012; IC et al. 2012; SRU 2007; Thrän u. a. 2005, WBGU 2009).



Rechtsnormen für Biokraftstoffe.

Der Einsatz von Biomasse sowie die Nutzung von Biokraftstoffen unterliegen einer Vielzahl nationaler, europäischer bzw. internationaler Ziele und Regelungen. Dabei spielen bei der Formulierung und Implementierung agrar- und wirtschaftspolitische Aspekte eine ebenso wichtige Rolle wie Versorgungssicherheit oder umwelt- und klimapolitische Überlegungen.

Der Einsatz von Biomasse im Kraftstoffbereich bzw. die Nutzung von Biokraftstoffen wird derzeit durch die Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen geregelt. Diese wird hierzulande im Rahmen des Biokraftstoffquotengesetzes umgesetzt. Entsprechend der EU-Richtlinie 2009/28/EG muss der Anteil des Energieverbrauchs aus erneuerbaren Energien im Verkehrssektor bis 2020 zehn Prozent betragen. Dabei kann

dieser Anteil sowohl über Biokraftstoffe wie auch durch andere regenerative Energieträger realisiert werden. Die seit 2010 geltende Biokraftstoffquote sieht einen Biokraftstoffmindestanteil von 6,25 Prozent bezogen auf den Energiegehalt jährlich in Deutschland abgesetzter Kraftstoffe bis 2014 vor. Ab 2015 wird die Biokraftstoffmindestquote durch die sogenannte Treibhausgasmindestquote ersetzt. Im Rahmen dieser Dekarbonisierungsstrategie wird die Mineralölwirtschaft verpflichtet, eine ausreichend hohe Menge an Biokraftstoffen auf den Markt zu bringen, um 2015 mindestens drei Prozent, 2017 4,5 Prozent und 2020 sieben Prozent Treibhausgasmindestquote gegenüber dem Einsatz fossiler Kraftstoffe zu erreichen. In ihrem Nationalen Biomasseaktionsplan 2009 geht die Bundesregierung davon aus, dass die THG-Mindestquote von sieben Prozent einem energetischen Anteil der Biokraftstoffe von ca. zwölf Prozent entspricht.

Das vorliegende Hintergrundpapier geht von einer eher konservativen Schätzung der regional und global verfügbaren Biomassepotenziale für Biokraftstoffe aus. Die zugrunde gelegte Studie (Zeddies 2010, im Auftrag der Volkswagen AG) wurde unter Berücksichtigung der EU-Richtlinie zur Nachhaltigkeitszertifizierung erarbeitet. Dabei werden unterschiedliche Potenzialszenarien für Biomasse und Biokraftstoffe differenziert nach Ländergruppen und Fortschreibungsperioden berechnet. Verfügbare Flächen für Agrarrohstoffe werden dabei ebenso betrachtet wie Produktmengenpotenziale, die nach bilanzieller Sicherstellung der Welternährung noch für die Erzeugung von Biokraftstoffen verbleiben. Eine zentrale Voraussetzung der Studie ist dabei allerdings, dass die geschätzten Biomassepotenziale ungeachtet politischer Förderprogramme vorrangig als Biokraftstoffpotenziale zur Verfügung stehen. Konkurrenzen mit der Strom- und Wärmeerzeugung bleiben also außen vor. Auf diese Weise

werden gezielt die maximal möglichen Biokraftstoffpotenziale abgebildet. Ferner wird angenommen, dass nationale und internationale Richtlinien und Abkommen bereits mittelfristig zu einem Verbot von Regenwaldrodungen und Umbruch von Grasland führen und nationale Gesetze und Verordnungen eine Umwidmung von landwirtschaftlich genutzten Flächen zu Zwecken des Umwelt- und Naturschutzes durchsetzen werden.

In der Studie werden fünf unterschiedliche Szenarien der Biokraftstoffverfügbarkeit in Deutschland gerechnet, die allesamt auf der EU-Richtlinie zur Nachhaltigkeitszertifizierung basieren und deshalb als nachhaltig bewertet werden können. Für die weitere Betrachtung wurden die Szenarien „Referenz“ und „Nachhaltigkeit Energie“ ausgewählt. Das Szenario „Nachhaltigkeit Energie“ geht dabei von einer besonders restriktiven Berücksichtigung der zugrunde gelegten Nachhaltigkeitsanforderungen aus.

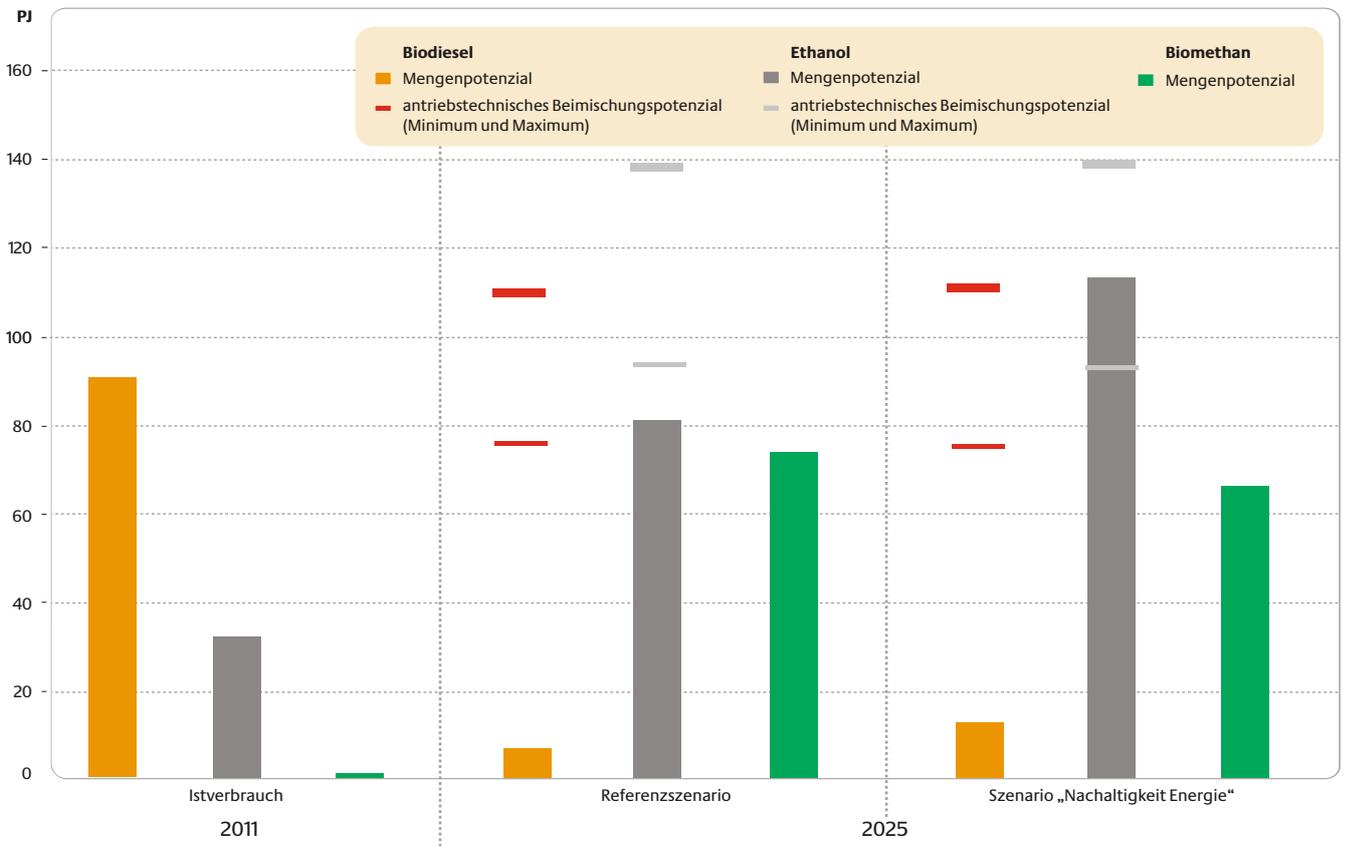


Abbildung 6: Szenarien nach Zeddies zur künftigen Verfügbarkeit von Biokraftstoffen in Deutschland bis 2025 (Quelle: Ableitung für das Jahr 2025 aus Zeddies (2010)).

Verfügbarkeit von Biodiesel / BTL.

Weitaus schwieriger zeichnet sich die Dekarbonisierung des Dieselpfads ab. Bezogen auf die abgeschätzte Gesamtnachfrage nach Dieselmotorkraftstoffen ergeben sich antriebstechnisch mögliche Beimischungsmengen zwischen 89 PJ und 106 PJ im Jahr 2020 bzw. 77 PJ und 110 PJ im Jahr 2025.

Laut Zeddies 2010 reichen die nationalen Biomassepotenziale bei weitem nicht aus, um diese Mengen Biodiesel bereitzustellen. Die sehr geringen Mengenpotenziale beim Biodiesel sind dabei in erster Linie auf einen künftig stark steigenden Speiseölbedarf sowie eine sinkende Flächenproduktivität zurückzuführen.

Zeddies rechnet zwar damit, dass BtL im Betrachtungszeitraum zur Marktreife gelangt. Dennoch bleiben auch hier die Mengen weit hinter dem Biodieselbedarf zurück – wobei aus antriebstechnischer Sicht das Nutzungspotenzial bei BtL noch weitaus höher wäre als hier dargestellt, kann es doch fossilen Diesel theoretisch zu 100 Prozent ersetzen. Beim Dieselpfad würde daher vielmehr ein Import von Biokraftstoffen (bzw. von Energiepflanzen oder Biomasse zu ihrer Erzeugung) in beträchtlichem Umfang erforderlich.

In anderen Studien fällt dieser Befund zum Teil weniger eindeutig aus. So legt beispielsweise das Referenzszenario einer Studie des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ, IUP 2011) nahe, dass der heimisch produzierte Biodiesel ausreicht, um 2020 sechs Prozent der in diesem Hintergrundpapier angenommenen Dieselnachfrage zu decken. Damit würde das Mengenpotenzial das antriebstechnisch mögliche Beimischungspotenzial geringer unterschreiten, die Unterversorgung mit heimischem Biodiesel wäre weniger ausgeprägt.

Verfügbarkeit von Biomethan.

Für den Erdgas-/CNG-Pfad – der aus antriebstechnischer Sicht vollständig mit Biomethan bedient werden könnte – sind auf Basis der betrachteten Energieszenarien keine konkreten Nutzungspotenziale quantifizierbar. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Anzahl an Fahrzeugen ist davon auszugehen, dass die heimischen Biomassepotenziale auch nach den zurückhaltenderen Schätzungen des Szenarios „Nachhaltigkeit Energie“ ausreichen, um den Bedarf vollständig zu decken.

Wie viele Biokraftstoffe über die oben dargestellten inländischen Potenziale hinaus für den deutschen Import verfügbar sein werden, wird stark von Effizienzsteigerungen in der Land-

wirtschaft abhängen, aber auch von der Entwicklung der globalen Nachfrage nach Biokraftstoffen. So ist beispielsweise davon auszugehen, dass aufgrund der EU-Vorgaben zur Treibhausgasminderung über den Einsatz von Biokraftstoffen auch die Biokraftstoffnachfrage aus dem europäischen Ausland weiter zunehmen wird. Dies kann die Importpotenziale für Deutschland schmälern.

Insgesamt wird deutlich, dass die Substitution von fossilen Kraftstoffen durch Agrarerzeugnisse und daraus abgeleitete Kraftstoffe nur einen Teil der für die Mobilität benötigten Energie zur Verfügung stellen kann. Die Energiewende im Verkehr kann nur gelingen, wenn die bisherige Fokussierung auf Agrarbiokraftstoffe durch eine Forcierung von Biokraftstoffen der nächsten Generationen und die Hinzunahme von synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien ergänzt wird.

⑤ Handlungsbedarf bei Fahrzeug- und Kraftstofftechnik.

Auf regenerative Kraftstoffe mit „Drop in“-Qualität setzen.

Bei der (Weiter-)Entwicklung regenerativer Kraftstoffe sollte großer Wert auf die Möglichkeit einer anteiligen Nutzung auch in Bestandsfahrzeugen gelegt werden. Nur so können CO₂-Minderungswirkungen schon kurz- bis mittelfristig erzielt werden. Vorteil einer entsprechenden Beimischung zu fossilen Kraftstoffen („Drop in“-Lösung) gegenüber einem separaten Biokraftstoffangebot ist auch ein geringerer Aufwand auf Seiten der Versorgungsinfrastruktur.

Regenerativem Methan als heute verfügbarer Lösung zum Durchbruch verhelfen.

Regenerativ erzeugtes Methan stellt in vielerlei Hinsicht eine hervorragende Option dar: Es ist bereits vollständig mit heutigen (Erdgas-/CNG-)Fahrzeugen kompatibel und auch schon am Markt verfügbar. Viele Nachteile anderer Biokraftstoffe insbesondere unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten – wie direkte und indirekte Landnutzungsänderungen – gelten für regeneratives Methan nicht oder in weit geringerem Maße. Diese Option braucht daher einen kräftigen An Schub. Hierzu gehört auch, dass sowohl Automobilindustrie als auch Tankstellenbetreiber mit einem höheren Angebot an CNG-Fahrzeugen und -Tankstellen den Erdgas-/CNG-Pfad für die Verbraucher attraktiver machen.

Herausforderungen des wachsenden Dieselanteils begegnen.

Der Dieselmotor hat aufgrund seines bis zu 20 Prozent höheren Wirkungsgrads deutliche Effizienzvorteile gegenüber dem Ottomotor. Der stark wachsende Dieselanteil bei der Kraftstoffnachfrage („Dieselisation“) führt jedoch auch zu Herausforderungen. Aus inländischer Mineralölproduktion wird diese Nachfrage nicht ohne Weiteres zu bedienen sein. Soll nicht ein wachsender Importanteil mit allen negativen Folgen die Konsequenz sein, bedarf es mittelfristig weiterer Anpassungen der hiesigen Raffineriestruktur zugunsten eines höheren Dieselanteils. Für einen entsprechenden Investitionsschub in der Mineralölproduktion sollten entsprechende politische Anreize geschaffen werden. Auch die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie muss diese Herausforderungen in den Blick nehmen.

Um der genannten Situation zu begegnen, sind insbesondere im Dieselmotorbereich die Anstrengungen zur Markteinführung nachhaltiger, qualitativ hochwertiger und regenerativer Alternativen zu verstärken.

Einen weiteren Beitrag zur Dämpfung der Dieselnachfrage mit entsprechender CO₂-Ersparnis kann auch die Nutzung von

AdBlue® in neuen Diesel-Pkws leisten. AdBlue® ist eine wässrige Harnstofflösung, die in einem zusätzlichen Tank mitgeführt und in den Abgasstrom eingespritzt wird. In Verbindung mit einem SCR-Katalysator (Selektive Katalytische Reduktion) reduziert AdBlue® die Stickoxidemissionen so erheblich, dass Wirkungsgradverbesserungen des Dieselantriebs um drei bis fünf Prozent mit entsprechenden Einsparungen möglich werden. Um diese Potenziale zu nutzen, muss die Verfügbarkeit von AdBlue® weiter verbessert werden.

Bei regenerativem Diesel stärker auf kommende Generationen setzen.

Da Biodiesel der ersten Generation mit vielen Nachteilen verbunden ist, kommt den folgenden Generationen eine besondere Bedeutung zu – zunächst vor allem den hydrierten Pflanzenölen und -fetten (HVO). Die wirtschaftlichsten Möglichkeiten bietet hier vor allem eine verstärkte Nutzung vorhandener Kapazitäten der Mineralölraffinerie. Eine entsprechende Mitverarbeitung von Biokomponenten erfordert, dass sich sowohl die Mineralölwirtschaft als auch die Biokraftstoffbranche stärker füreinander öffnen und dass die mitverarbeiteten Mengen auf die Quotenverpflichtung angerechnet werden.

Sinnvolle Beimischung von Ethanol weiter erhöhen.

Anders als Biodiesel bietet Ethanol noch weitere Potenziale für eine Beimischung. Sowohl technisch als auch mengenmäßig sind schon relativ kurzfristig deutlich höhere Anteile als die heutigen zehn Prozent möglich. Automobilhersteller und Mineralölindustrie sollten eine Einführung von E20 oder E25 beschleunigen. Vor dem Hintergrund der Erfahrungen bei der Einführung von E10 sollten dabei auch die Informations- und Sicherheitsbedürfnisse der Verbraucher stärker berücksichtigt werden.

Darüber hinaus sollten die Automobilhersteller auch eine mittel- bis langfristige Beimischung von Ethanol zum Diesel prüfen und ermöglichen. Dies könnte zusätzlich zu einer Entschärfung der Dieselknappheit beitragen.

Neue Kraftstoff-Anforderungen durch Hybridisierung rechtzeitig regeln.

Vor allem bei Plug-in-Hybridfahrzeugen sind lange Perioden möglich, in denen der Verbrennungsmotor gar nicht genutzt wird. Aufgrund der entsprechenden Verweildauer im Tank und in den kraftstoffführenden Teilen erhöhen sich hierdurch die Qualitätsanforderungen an die Kraftstoffe. Automobilhersteller und Mineralölwirtschaft sollten diese rasch erforschen und klären.

⑥ Politische Rahmenbedingungen – Status quo und Empfehlungen.

Um die zuvor skizzierte Reduktion des Endenergieverbrauchs im Straßenverkehr sowie die Diversifizierung der Kraftstoffbasis bis 2025 – und insbesondere darüber hinaus – erzielen zu können, bedarf es flankierender politischer Maßnahmen. Diese gilt es, im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung zu konkretisieren:

Steigerung der Energieeffizienz konventioneller Antriebe und Kraftstoffe fördern.

Otto- und Dieselmotoren werden den Straßenverkehr mit Pkws, Motorrädern, Lkws und Bussen in den nächsten Jahrzehnten weiterhin dominieren. Insofern gilt es, mit einem passenden politischen Rahmen auch die Weiterentwicklung konventioneller Antriebe und Kraftstoffe zu unterstützen.

Bei verfügbaren Effizienztechnologien gilt es, mögliche Hürden für eine rasche Marktdurchdringung abzubauen. So senkt beispielsweise der Betriebsstoff AdBlue® Stickoxidemissionen und den Kraftstoffverbrauch des Dieselantriebs. Seiner weiteren Etablierung stehen aber mitunter hohe und bundesweit uneinheitliche Hürden bei der Zulassung entsprechender Zapfsäulen im Wege.

Diversifizierung technologieoffen gestalten.

Um die Energie- und Antriebsbasis im Straßenverkehr auf ein breiteres Fundament zu stellen, muss die Entwicklung einer Bandbreite von Antriebskraftstoffkonzepten gefördert werden. Denn für nur einen Lösungsansatz allein sind die technischen Möglichkeiten der unterschiedlichen Verkehrsmittel zu differenzieren, weichen Entfernungs- und Lastprofile zu stark voneinander ab oder sind Zahlungsbereitschaften der diversen Nutzergruppen zu unterschiedlich. Die gleichzeitige Förderung verschiedener Pfade ist auch nötig mit Blick auf den Anspruch, die Marktfähigkeit für den Export bestimmter Fahrzeugtechnologien unter Beweis zu stellen, selbst wenn diese für hiesige Verhältnisse nicht die optimale Lösung sind. Dabei muss sich der Grad der Anreizsetzung insbesondere danach bemessen, in welchem Maße die Technologie oder der Kraftstoff absehbar zur Reduktion des Energieverbrauchs oder der CO₂-Emissionen beitragen kann.

Weiterentwicklung von flüssigen Biokraftstoffen insbesondere der zweiten Generation stützen.

Die weiterhin bestehende Marktdominanz von Otto- und Dieselmotoren erfordert in der Konsequenz eine Verbesserung der flüssigen Biokraftstoffe. Deren erste Generation stößt an (motor-)technische Grenzen oder steht unter Wahrung von Nachhaltigkeitsanforderungen nicht in ausreichendem Maße zur Verfü-

gung. Insofern gilt es, sich HVO sowie die zwischenzeitlich aus dem Fokus geratenen Biokraftstoffe der zweiten Generation z. B. mit weiteren Forschungs- und Demonstrationsförderungen konsequent zu erschließen oder durch Investitionen in großtechnische Anlagen abzusichern.

Forschung und Entwicklung bei Kraftstoffen künftiger Generation forcieren.

Absehbar kann mit herkömmlichen und weiterentwickelten Biokraftstoffen nur ein Teil des zu erwartenden Bedarfs an Alternativen gedeckt werden. Deshalb ist es erforderlich, sich schon heute konsequent Kraftstoffquellen zu erschließen, die nicht in der klassischen Landwirtschaft und ihren Nebenprodukten liegen. Hier sind insbesondere Pfade von Algen zu synthetischem Diesel, Power-/Sonne-to-Gas- und Power-/Sonne-to-Liquid-Ansätze in Forschung, Pilot-, Demonstrations- sowie ersten kommerziellen Projekten verstärkt zu unterstützen.

Politik der nachhaltigen, erneuerbaren Kraftstoffe langfristig und qualitätsorientiert entwickeln.

Wenn CO₂-Vermeidungspotenziale ernsthaft gehoben werden sollen, sind Veränderungen bei der Beimischung von alternativen Kraftstoffen zu Diesel bzw. Benzin auf Seiten von Fahrzeugherstellern sowie Kraftstoffproduzenten mit erheblichem Veränderungsbedarf verbunden. Entsprechend lang ist der zeitliche Vorlauf. Insofern muss schon jetzt Klarheit über die Regelungen nach 2020 geschaffen werden. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die fertigen Kraftstoffe hinsichtlich Emissionen, Langzeitstabilität und Wirkungsgrad im Fahrzeug gleichwertig oder besser als heutige sind.

Vor dem Hintergrund der langen Betriebsdauer der Fahrzeuge und der langsamen Durchdringung des Gesamtbestands mit Neufahrzeugen ist bei der Regelung von Beimischungsquoten die Kompatibilität mit Bestandsfahrzeugen zu berücksichtigen. Nur so können CO₂-Minderungswirkungen schon kurz- bis mittelfristig erzielt werden. Zielführend wäre zudem eine deutlich stärkere Vereinheitlichung auf europäischer Ebene. Dies ermöglicht zum einen den Automobilherstellern, ihre Fahrzeuge konsequent auf konkrete Kraftstoffqualitäten hin zu optimieren. Zum anderen lassen sich so Unsicherheiten auf Verbraucherseite reduzieren.

Durchdringung des Verkehrssektors mit Erdgas und Biomethan flankieren.

Der Einsatz von Erdgas, Biomethan und Power-to-Gas als CNG

im Straßenverkehr bietet erhebliche energie- und klimapolitische Chancen. Dennoch und trotz einer bereits vorhandenen Fahrzeug- und Tankstellenbasis ist der Grad der Marktdurchdringung hier noch vergleichsweise gering. Um diese Alternativen weiter zu fördern, bedarf es neben einer Verlängerung der Energiesteuerermäßigung auf CNG als Kraftstoff einer Anpassung der Preisauszeichnung von Erdgas an Tankstellen im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit mit herkömmlichen Kraftstoffen sowie Anreizen zum zielgerichteten Ausbau der Tankstelleninfrastruktur. Dafür plädieren auch die in der Initiative Erdgasmobilität zusammengeschlossenen Fahrzeughersteller und Vertreter der Energie- bzw. Mineralölwirtschaft. Mit Blick auf die hohen CO₂-Vermeidungspotenziale von CNG erscheint dabei eine klare Differenzierung gegenüber Autogas (LPG) sinnvoll. Zudem sollten die Potenziale von verflüssigtem Erdgas (LNG) im Straßen(güter)verkehr in Deutschland analysiert sowie im Rahmen der Energiewende die künftige Rolle von aus (zeitweise überschüssigem) regenerativem Strom erzeugtem Methan (Power-to-Gas) weiter untersucht werden.

Parallel Elektromobilität fördern.

Der Ansatz der Elektromobilität (Batterie und Wasserstoff/Brennstoffzelle) muss konsequent weiterverfolgt werden. Erste Erfolge der batteriebasierten Elektromobilität zeigen sich bereits durch die stärkere Hybridisierung, insbesondere von Pkws oder Bussen. Erhebliche Potenziale zeichnen sich zudem im – wenn auch kleinen – Zweiradmarkt ab. Letztlich muss aber in der politischen und in der allgemeinen Öffentlichkeit der Eindruck vermieden werden, dass Elektromobilität den „Königsweg“ für den Verkehrssektor darstellt. Elektromobilität wird ihren Anteil am Antriebsmix einnehmen. Eine besondere Rolle dürfte dabei aber die Elektrifizierung des konventionellen Antriebsstrangs einnehmen. Dagegen sind rein batteriebetriebene Elektrofahrzeuge derzeit noch mit relevanten Einschränkungen bei Reichweite, Komfort und Anschaffungspreis verbunden.

Stärkeres Augenmerk auf den Güterverkehr legen.

Der Schwerlastverkehr ist bisher vollständig auf Dieselmotoren angewiesen. Zudem ist im Güterverkehr mit einem weiteren Wachstum der Transportleistung zu rechnen – wenn auch nicht im bislang vermuteten Ausmaß. Daher gibt es hier bei den Herstellern bereits besondere Anstrengungen zur Verbrauchsreduzierung. Neben der Erforschung, Entwicklung, Erprobung und Anwendung entsprechender Effizienztechnologien sollte der Fokus bei der Förderung auch auf alternative Kraftstoffoptionen wie die Beimischung von Erdgas bzw. regenerativem

Methan gelegt und politisch unterstützt werden. Insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen ist LNG eine sehr vielversprechende Option.

Lenkungswirkung von Politikinstrumenten verfolgen und gegebenenfalls anpassen.

Zentrales politisches Instrument zur Steuerung des Angebots an energieeffizienten Fahrzeugen ist derzeit vor allem die europäische CO₂-Gesetzgebung für Pkws und leichte Nutzfahrzeuge. Politisch genutzte Hebel zur Steuerung der Nachfrage nach energieeffizienten Fahrzeugen oder alternativen Antrieben bzw. Energieträgern sind im Wesentlichen die Besteuerung von Kraftstoffen, die CO₂-basierte Kfz-Steuer, die Energieverbrauchskennzeichnung von Neuwagen und Reifen sowie seit Neuestem – durch eine Sonderregelung für die Elektromobilität – die Dienstwagenbesteuerung. Ob und in welchem Maße diese Instrumente ihre gewünschte Lenkungswirkung zugunsten des Absatzes energieeffizienter Fahrzeuge oder alternativer Antriebe bzw. Kraftstoffe entfalten und wo gegebenenfalls nachgebessert werden muss, bedarf in Zukunft eines konsequenten Monitorings.

Ganzheitlichen Ansatz bei der Betrachtung von Kraftstoffen und Antrieben stärken.

Bei den konventionellen Motortechnologien bzw. Kraftstoffen Benzin und Diesel konnte bei vergleichbarer Vorkette bislang eine Bewertung „Tank-to-Wheel“ ausreichen. Mit der beabsichtigten Diversifizierung der Kraftstoff- und Antriebsbasis entscheiden aber insbesondere Gewinnung und Produktion der Energie, aber auch die Herstellung von Energiespeichern bzw. die Realisierung neuer Fahrzeugkonzepte über Vor- oder Nachteile der jeweiligen Alternativen. Insofern gilt es, mit geeigneten politischen Rahmenbedingungen künftig insbesondere den Ansätzen zum Durchbruch zu verhelfen, die über den gesamten Produktlebensweg optimal sind. So können zwar Regulierungen sinnvoll nur auf einzelnen Akteursebenen ansetzen: Die Mineralölwirtschaft kann die Effizienz von Kraftstoffen „Well-to-Tank“ gewährleisten, die Automobilhersteller die Effizienz von Fahrzeugen „Tank-to-Wheel“. Die politische und strategische Bewertung von Kraftstoffen und Antrieben sollte jedoch verstärkt die gesamte Kette in den Blick nehmen und einer Well-to-Wheel-Betrachtung folgen.

Veränderungen in der Energieinfrastruktur planen.

Der angestrebte Umbau der Energiebasis im Verkehr erfordert auch einen passenden politischen Rahmen bei der Energie-

infrastruktur. Denn sowohl Investitionen in großtechnische Anlagen zur Produktion von Biokraftstoffen der zweiten bzw. zukünftiger Generationen als auch Investitionen in Pipelines beispielsweise für den Transport von Wasserstoff bzw. Power-to-Gas oder der Ausbau der Tankstellenanzahl für Erdgas als Kraftstoff erfordern Anschlag und Investitionssicherheit. Die EU-Kommission hat den Handlungsbedarf erkannt und nun eine entsprechende Richtlinie auf den Weg gebracht. Insofern sollte die Verkehrswegeplanung in Deutschland künftig konsequent um energieinfrastrukturelle Aspekte ergänzt werden.

In öffentlichen Flotten mit gutem Beispiel vorangehen.

Die öffentliche Hand betreibt auf Bundes-, Landes- und Kommunalebene eine große Zahl eigener Pkw-, Lkw- und Busflotten. Hier sollten über die europäische Richtlinie zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge hinaus Regelungen initiiert werden, die diesen Betreibern einen Anreiz geben, energieeffiziente Fahrzeuge mit alternativen Kraftstoffen und Antrieben einzusetzen.

Zunahme der Verkehrsnachfrage durch verkehrspolitische Maßnahmen wirksam auffangen.

In der Vergangenheit konnte die Energieeffizienz von Fahrzeugen durch technologische Innovationen erheblich gesteigert werden. Diese Entwicklungskurve wird in Zukunft tendenziell flacher verlaufen. Gleichzeitig wird die Nachfrage nach Personen- und insbesondere Güterverkehrsleistungen weiter zunehmen. So werden sinkende Verbräuche durch Verbesserungen der Fahrzeugtechnologie teilweise durch eine Zunahme der Verkehrsleistung aufgezehrt. Insofern wird eine Reduzierung des Energieverbrauchs im Verkehr bis 2050 gegenüber 2005 um 40 Prozent nicht ohne Reduktion der Fahrleistungen auskommen. Einen zentralen Stellenwert sollte dabei neben einer Verlagerung von Verkehr vor allem eine bessere Vernetzung der Straße mit den anderen Verkehrsträgern haben. Weitere Ansätze gibt es nach wie vor zur Erhöhung der Auslastung – nicht nur im Güterverkehr mit Lkws, sondern auch im motorisierten Individualverkehr mit Pkws. Zudem bieten Maßnahmen zur Optimierung des Verkehrsflusses noch erhebliche Potenziale, etwa durch die Einrichtung „grüner Wellen“ oder die Car-to-X-Kommunikation.

7 Literaturverzeichnis.

AG Energiebilanzen (2010):

Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Berlin.
<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=63>. Online 2012

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2012):

Erneuerbare Energien 2011. Daten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2011 auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare-Energien-Statistik (AGEE-Stat).
http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_deutschland_graf_tab.pdf. Online 2012

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2011):

Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011.
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf. Online 2012

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2011):

Verkehr in Zahlen 2010/2011. 39. Jahrgang, Hamburg.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2012):

Zweite Verbändeveranstaltung zum Bundesverkehrswegeplan 2015. Vorstellung der Szenario-Entwürfe für die Verkehrsprognose 2030.
<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/92032/publicationFile/64451/bvwp-praesentationsunterlagen-zweites-verbandedespraech.pdf>

Bundesregierung (2009):

Der Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und FDP. Wachstum. Bildung. Zusammenhalt. 17. Legislaturperiode. <http://www.cdu.de/doc/pdf/091026-koalitionsvertrag-cducsu-fdp.pdf>. Online 2011

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) et al. (2011):

Entwicklung einer Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie für Deutschland – Voruntersuchung, Berlin.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2011):

Absichtserklärung Initiative Erdgasmobilität, Berlin.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2011):

Ungeliebt, aber unentbehrlich. Bedarf und Produktion von Mineralöl im künftigen Energiemix, Berlin.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2012):

Verkehr. Energie. Klima. Alles Wichtige auf einen Blick, Berlin.

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ) und Institut für Umweltplanung (IUP) (2011):

Identifizierung strategischer Hemmnisse

und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassenutzung. DBFZ Report Nr. 4. Edel M u.a. Gefördert vom BMU. Leipzig, Hannover.

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ) (2010):

Analyse zur Erreichung des Mindestziels von 10% erneuerbare Energien im Verkehrssektor. Kurzstudie für den WWF, Leipzig.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE) (2012):

Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Stuttgart, Kassel und Teltow.

Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FFV) (2012):

Alternative Kraftstoffe DI-Ottomotoren. Untersuchung und Bewertung von alternativen Kraftstoffen für den Einsatz in modernen DI-Ottomotoren. Heft Nr. 964-2012, Frankfurt a. M.

JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration (2011):

Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Well-to-Wheels Report. Version 3c, Brüssel.

Kraftfahrt-Bundesamt (2011):

Bestand an Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen (FZ 13), Flensburg.

Öko-Institut (2010):

The „iLUC Factor“ as a Means to Hedge Risks of GHG Emissions from Indirect Land Use Change, Darmstadt.

Shell Deutschland Oil GmbH (2009):

Shell-Pkw-Szenarien bis 2030. Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität, Hamburg.

Shell Deutschland Oil GmbH (2010):

Shell-Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030, Hamburg.

Umweltbundesamt (UBA) (2012):

Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960 – 2030. TREMOD, Version 5.25.

WWF Deutschland (2009):

Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken, Berlin.

Zeddies, J., Schönleber, N. und Gamer, W. (2010):

Biomassepotenzial für Biokraftstoffe unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitskriterien. Endbericht. August 2010. Universität Hohenheim. Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre (410 B). Projektleiter Volkswagen AG: Dr. Susanne Leifheit, Team Umweltsteuerung Produkt, K-EFUP Umwelt-Produkt.

8 Abkürzungen.

BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BtH	Biomass to Hydrogen
BtL	Biomass to Liquid
CNG	Compressed Natural Gas
CO₂	Kohlendioxid
CO₂eq	Kohlendioxid-Equivalente
ETBE	Ethyltertbutylether
FAME	Fettsäuremethylester
FQD	Fuel Quality Directive
HVO	Hydrotreated Vegetable Oils
ILUC	Indirect Land Use Change
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum/Propane Gas
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PJ	Petajoule
Pkw	Personenkraftwagen
RED	Renewable Energy Directive
SCR	Selektive Katalytische Reduktion
THG	Treibhausgas
TREMOT	Transport Emission Model

ISBN 978-3-9813760-9-8



9 783981 376098