Öko-Institut e.V.
Institut für angewandte Ökologie
Institute for Applied Ecology

Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr

Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes zum Forschungsvorhaben „Verkehr 2050 - Entwicklung von Parametern und Skizzierung eines vereinfachten Energie- und Emissionsszenarios“

FKZ 363 01 400
Gz.: Z6 – 69422/1

Berlin, 15.02.2013

Autoren:
Ruth Blanck
Peter Kasten
Florian Hacker
Moritz Mottschall

Öko-Institut e.V.
Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 17 71
79017 Freiburg. Deutschland
Hausadresse
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg. Deutschland
Tel. +49 (0) 761 - 4 52 95-0
Fax +49 (0) 761 - 4 52 95-288

Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt. Deutschland
Tel. +49 (0) 6151 - 81 91-0
Fax +49 (0) 6151 - 81 91-133

Büro Berlin
Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin. Deutschland
Tel. +49 (0) 30 - 40 50 85-0
Fax +49 (0) 30 - 40 50 85-388

www.oeko.de

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Umweltbundesamtes unter dem Förderkennzeichen 363 01 400 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Zusammenfassung

Bis zum Jahr 2050 müssen die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor signifikant gemindert werden. Unter anderem die bisher starke Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen sowie die hohen prognostizierten Wachstumsraten des Güterverkehrs sind Faktoren, welche deutlich machen, dass eine grundlegende Transformation des Verkehrssektors notwendig ist.

Verschiedene Studien untersuchen im Kontext der gesamten Energieversorgung Deutschlands auch Szenarien für den Verkehrssektor bis zum Jahr 2050[1]. Betrachtete Optionen zur Transformation des Verkehrssektors umfassen dabei unter anderem Elektroantriebe, Brennstoffzellenantriebe und den Einsatz von stromerzeugtem Methan.

Die vorliegende Studie steht im Kontext des Projekts „Treibhausgasneutrales Deutschland" des Umweltbundesamtes. In einem „Basisszenario" wird zunächst aufgezeigt, wie bei einem Ausbleiben der notwendigen Transformationen im Verkehrssektor weder der Endenergiebedarf noch die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 signifikant gegenüber dem Jahr 2010 gesenkt werden. Mit dem Zielszenario („Hauptszenario") wird im Unterschied zu bisherigen Studien ein Szenario entwickelt, welches neben dem zunehmenden Einsatz von elektrischen Antrieben vor allem auf stromerzeugten Flüssigkraftstoffen (aus Strom und CO_2) basiert. Unter der Voraussetzung, dass die Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 vollständig regenerativ erfolgt, kann dadurch nahezu[2] eine Treibhausgasneutralität des Verkehrssektors erreicht werden.

Neben den technischen Optionen werden bei der Ausgestaltung des Hauptszenarios auch verkehrsvermeidende und -verlagernde Maßnahmen berücksichtigt, welche gemeinsam mit den effizienten Elektroantrieben im Jahr 2050 zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor von 33 % gegenüber dem Basisszenario führen. Beim Endenergiebedarf im Verkehrssektor im Jahr 2050 in Höhe von 1.623 PJ entfallen dabei 80% auf stromerzeugte Flüssigkraftstoffe. Diese haben gegenüber den meisten anderen Optionen den Vorteil, dass bestehende Antriebstechnologien weiter genutzt werden können und auch der Einsatz im Schwerlastverkehr denkbar ist. Selbst bei hohen Wirkungsgraden der Herstellung stromerzeugter Kraftstoffe auf Basis von Strom und CO_2 ergibt sich im Jahr 2050 jedoch ein Strombedarf in Höhe von 2.345 PJ. Der Strombedarf des Verkehrssektors liegt damit im Jahr 2050 sogar über dem heutigen Stromverbrauch aller Sektoren in Deutschland, welcher sich im Jahr 2010 auf 1.859 PJ belief. Ein treibhausgasneutraler Verkehrssektor erfordert daher eine entsprechend hohe zusätzliche Bereitstellung von regenerativ erzeugtem Strom bzw. eine noch deutlichere Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehr als bereits im Hauptszenario unterstellt.

---

1 z.B. [LEITSTUDIE 2011], [ENERGIESZENARIEN 2011], [WWF 2009]

2 Die Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien verursacht keine direkten Emissionen. Gemäß der in dieser Studie verwendeten Methodik werden auch die indirekten Emissionen der Stromerzeugung (z.B. beim Anlagenbau) betrachtet.

Eine detaillierte Analyse der Effekte von großen Mengen stromerzeugter Kraftstoffe auf den Kraftwerkspark und die Stromerzeugung war im Rahmen dieser Studie nicht möglich, sollte aber insbesondere unter dem Aspekt der Möglichkeit des Ausgleichs von unkontrollierten Stromerzeugungsspitzen und der Verfügbarkeit von entsprechenden Mengen an CO_2 für die Kraftstoffherstellung Teil zukünftiger Fragestellungen sein.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 3

2 Vorüberlegungen zur Treibhausgasneutralität des Verkehrssektors ... 5

3 Annahmen und Methodik ... 7

3.1 Sozioökonomische Rahmendaten ... 7
3.2 Bilanzraum und betrachtete Verkehrsträger ... 7
3.3 Kraftstoffe ... 7
3.4 Modell ... 8
3.5 Emissionsberechnung ... 10

4 Basisszenario ... 11

4.1 Einleitung ... 11
4.2 Einflussgrößen auf die Verkehrsnachfrage ... 11
4.3 Technologie- und Effizienzentwicklung ... 15
4.4 Energieträger und Kraftstoffe ... 19
4.5 Ergebnisse des Basisszenarios ... 24

5 Hauptszenario ... 29

5.1 Einleitung ... 29
5.2 Maßnahmen zur Förderung eines treibhausgasneutralen Verkehrssektors ... 30
5.3 Wirkung der Maßnahmen auf die Verkehrsnachfrage ... 34
5.4 Technologie- und Effizienzentwicklung ... 35
5.5 Energieträger und Kraftstoffe ... 39
5.6 Ergebnisse des Hauptszenarios ... 45

6 Sensitivitäten ... 54

6.1 Elektrolyse ... 54
6.2 Brennstoffzellenfahrzeuge ... 55

7 Bewertung der Ergebnisse ... 59

8 Vergleich mit anderen Studien ... 62

8.1 Energieszenarien für ein Energiekonzept ... 62

8.2 Modell Deutschland 63
8.3 Leitstudie 2011 63
8.4 Endenergiebedarf im Vergleich 64

9 Literatur 66

10 Anhang: Tabellen 70

10.1 Verkehrsnachfrage 70
10.2 Endenergiebedarf 74
10.3 Strombedarf 76
10.4 Treibhausgasemissionen (rein erneuerbarer Strom für PtL) 77
10.5 Treibhausgasemissionen (Emissionen für PtL nach Kraftwerksparkentwicklung) 79

Abbildungen

Abbildung 1: Übersicht über das Modell TEMPS 8
Abbildung 2: Vergleich der Einwohnerkilometerzahl in Verkehrsszenarien 12
Abbildung 3: Parameter zur Entwicklung des Luftverkehrsszenarios 14
Abbildung 4: Personenverkehrsleistung im Basisszenario nach Verkehrsträger 24
Abbildung 5: Güterverkehrsleistung im Basisszenario nach Verkehrsträger 25
Abbildung 6: Energiebedarf im Basisszenario nach Verkehrsart 26
Abbildung 7: Energiebedarf im Basisszenario nach Energieträgern 27
Abbildung 8: Treibhausgasemissionen des Verkehrs im Basisszenario 28
Abbildung 9: Neuzulassungsstruktur Pkw im Hauptszenario 37
Abbildung 10: Treibhausgasemissionsfaktoren fossiler und stromerzeugter Kraftstoffe (Sensitivität 2) im Vergleich 44
Abbildung 11: Personenverkehrsleistung im Hauptszenario 45
Abbildung 12: Fahrleistung der Pkw im Hauptszenario nach Antriebstyp 46
Abbildung 13: Güterverkehrsleistung im Hauptszenario 47
Abbildung 14: Lkw-Fahrleistung nach Antriebstyp (Hauptszenario) 48
Abbildung 15: Bestandsstruktur Lkw im Jahr 2050 (Hauptzenario) 48
Abbildung 16: Endenergiebedarf im Hauptszenario nach Verkehrsart 49
Abbildung 17: Endenergiebedarf im Hauptszenario nach Energieträgern 50
Abbildung 18: Strombedarf im Hauptszenario (Endenergie und Kraftstofferzeugung, ohne Seeschifffahrt) 51
Abbildung 19: Treibhausgasemissionen im Hauptszenario (Sensitivität 1: rein erneuerbarer Strom für PtL) 52
Abbildung 20: Treibhausgasemissionen im Hauptszenario (Sensitivität 2: Emissionen nach Kraftwerkspark für PtL) 53
Abbildung 21: Strombedarf in der „Sensitivität Elektrolyse“ (Endenergie sowie Kraftstofferzeugung) 54
Abbildung 22: Pkw-Fahrleistung nach Antriebstyp (Sensitivität Brennstoffzelle) 56
Abbildung 23: Lkw-Fahrleistung nach Antriebstyp (Sensitivität Brennstoffzelle) 57
Abbildung 24: Endenergiebedarf in der Sensitivität Brennstoffzelle 57
Abbildung 25: Strombedarf des Verkehrs in den Szenarien im Jahr 2050 im Vergleich (stromerzeugte Kraftstoffe einschließlich Strombedarf zur Herstellung; ohne Seeverkehr) 59
Abbildung 26: Studienvergleich zum Endenergiebedarf 2050 im Verkehr (ohne Seeverkehr) 64

Tabellen

Tabelle 1: Treibhausgasemissionsfaktoren konventioneller Kraftstoffe 21
Tabelle 2: Treibhausgasemissionsfaktoren von Biokraftstoffen 22
Tabelle 3: Mittlere Emissionsfaktoren der Stromerzeugung in Deutschland – Basisszenario 23
Tabelle 4: Wirkungsgrade der Wasserstoffelektrolyse (Bestandsanlagen) 40
Tabelle 5: Anteile der Elektrolyseprozesse für die PtL-Produktion 41
Tabelle 6: Wirkungsgrade (MJ Kraftstoff / MJ Strom) stromerzeugter Kraftstoffe 41
Tabelle 7: Mittlere Emissionsfaktoren der Stromerzeugung in Deutschland – Hauptszenario 43
Tabelle 8: Neuzulassungsstruktur Pkw in der Sensitivität Brennstoffzellenfahrzeuge 55
Tabelle 9: Charakteristika ausgewählter Studien im Vergleich 62
Tabelle 10: Verkehrsleistung Personenverkehr 70
Tabelle 11: Verkehrsleistung Güterverkehr 71
Tabelle 12: Fahrleistung der Pkw nach Antriebstypen 72
Tabelle 13: Fahrleistung der Lkw nach Antriebstypen 73
Tabelle 14: Endenergiebedarf nach Verkehrsträgern 74
Tabelle 15: Endenergiebedarf nach Kraftstoffen 75
Tabelle 16: Strombedarf 76
Tabelle 17: Treibhausgasemissionen im Basis- und Hauptszenario (Sensitivität 1: rein erneuerbarer Strom für PtL) 77
Tabelle 18: Treibhausgasemissionen in den Sensitivitäten (Sensitivität 1: rein erneuerbarer Strom für PtL) 78
Tabelle 19: Treibhausgasemissionen in den Szenarien (Sensitivität 2: Emissionen für PtL nach Kraftwerksparkentwicklung) 79

1 Einleitung

Angesichts des fortschreitenden globalen Klimawandels ist in den kommenden Dekaden eine drastische Minderung der Treibhausgasemissionen erforderlich, um die Wahrscheinlichkeit einer Erderwärmung von mehr als 2 °C gegenüber vorindustriellem Niveau zu minimieren. EU-Ziel ist es, die Treibhausgasemissionen bis 2050 in Industrieländern gegenüber 1990 um 80-95 % zu senken.

Während in anderen Sektoren bereits deutliche Fortschritte erzielt werden konnten, stellt sich die Situation im Verkehrssektor besonders schwierig dar. Einerseits sollen die Mobilitäts- und Nutzungsbedürfnisse weiterhin umfassend befriedigt werden, andererseits bleibt bislang die starke Bindung an fossile Energieträger bestehen. Effizienzverbesserungen im Verkehr wurden in den vergangenen Jahren durch einen Anstieg der Transportleistung nahezu kompensiert. Auch bezüglich einer Reduktion der Verkehrsleistung und einer Verlagerung hin zu umweltfreundlichen Verkehrsträgern hat sich in der jüngeren Vergangenheit in Deutschland nicht viel geändert.

Zahlreiche Studien im nationalen und internationalen Kontext beschäftigen sich damit, wie eine kohlenstoffarme Gesellschaft im Jahr 2050 aussehen könnte. Bereits vorliegende Studien beziehen sich jedoch entweder hauptsächlich auf den Energiesektor, so dass der Verkehrssektor nicht im Mittelpunkt der Betrachtung steht (WWF 2009, EK 2010, LEITSTUDIE 2011) oder fokussieren nicht auf Deutschland (SULTAN 2010, GHG-TRANSPORD 2009). Im Rahmen des Projektes Renewbility (REN II) wurde das Treibhausgasminderungspotenzial des deutschen Verkehrssektors umfassend untersucht; allerdings nur bis zum Jahr 2030. Um die notwendigen Transformationen des Verkehrssektors adäquat abzubilden, ist der Zeithorizont 2050 besser geeignet. Unter anderem für die Planung und Gestaltung einer zukunftsweisenden Infrastruktur und die Forschung in Bezug auf alternative Technologien scheint eine solch langfristige Perspektive angebracht.

Die vorliegende Studie konzentriert sich daher auf den deutschen Verkehrssektor mit Zeithorizont 2050. Sie steht im Kontext des Projekts „Treibhausgasneutrales Deutschland“ des Umweltbundesamtes, in dessen Rahmen ein Szenario für eine bis zum Jahr 2050 vollständig treibhausgasneutrale Gesellschaft entwickelt wird. Die zentralen Fragen für den Verkehrssektor sind dabei: Wie kann es gelingen, eine nachhaltige und zukunftsfähige Mobilität zu gewährleisten und diese gleichzeitig bis zum Jahr 2050 treibhausgasneutral zu gestalten? Welche Optionen mit welchen Potenzialen gibt es zur Erreichung dieses Zieles und in welchem Verhältnis sollten diese stehen?

Der in dieser Studie dargestellte Pfad ist daher keine Prognose, sondern ein vom Ziel eines im Jahr 2050 treibhausgasneutralen Verkehrssektors her definiertes Hauptszenario. Es soll aufgezeigt werden, wie im Verkehrssektor ein möglicher Pfad zu einem treibhausgasneutralen Deutschland aussehen könnte – und an welchen Stellen Handlungsbedarf besteht, um diese Ziel zu erreichen. Ergänzend dienen Sensitivitäten[3]

[3] Sensitivitäten stellen Variationen einzelner Parameter dar. Sie werden betrachtet, um Unsicherheiten zu quantifizieren und ihren Einfluss auf das Gesamtergebnis zu verdeutlichen.

dazu, die Auswirkung relevanter Annahmen transparent zu machen und Unsicherheiten abzubilden.

Nach einigen Vorüberlegungen zur Treibhausgasneutralität des Verkehrssektors (Kapitel 2) und einer Darstellung der verwendeten Annahmen und Methodik (Kapitel 3) wird dafür zunächst ein Basisszenario als Referenz entwickelt (Kapitel 4). Davon ausgehend wird ein mit Maßnahmen hinterlegtes Hauptszenario (Kapitel 5) dargestellt sowie zusätzlich eine Sensitivität mit Brennstoffzellenfahrzeugen betrachtet (Kapitel 6). Anschließend erfolgt eine Bewertung der Ergebnisse (Kapitel 7) sowie ein Vergleich zu den Szenarien anderer Studien (Kapitel 8). Tabellarische Übersichten über die Ergebnisse finden sich im Anhang.

2 Vorüberlegungen zur Treibhausgasneutralität des Verkehrssektors

Ziel dieser Studie ist es, ein Szenario zu entwickeln, in dem der Verkehrssektor im Jahr 2050 keine Treibhausgasemissionen mehr verursacht. Dazu muss bis 2050 vollständig auf konventionelle, fossile Kraftstoffe verzichtet werden. Zudem werden im Hauptszenario Biokraftstoffe aufgrund der derzeitig viel diskutierten und umstrittenen Treibhausgasbewertung im Jahr 2050 nicht berücksichtigt. Vielmehr liegt der Schwerpunkt auf der Nutzung erneuerbar hergestellten Stroms, um das entwickelte Szenario in die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ des Umweltbundesamts integrieren zu können.

Mehrere Optionen zur direkten und indirekten Nutzung von Strom im Verkehr sind aus heutiger Perspektive denkbar und werden in dieser Studie betrachtet:

- direkte Nutzung von Strom
    - ohne Zwischenspeicherung (z.B. über Oberleitungen)
    - mit Zwischenspeicherung (z.B. in Batterien von elektrisch betriebenen Fahrzeugen)
- indirekte Nutzung von Strom zur Erzeugung von Kraftstoffen (z.B. Wasserstoff, synthetische Flüssigkraftstoffe, stromgeneriertes Methan).

Die genannten Optionen weisen teils sehr unterschiedliche Charakteristika hinsichtlich Nutzungsrestriktionen, Energieeffizienz, Entwicklungsstand der Anwendungstechnologien, benötigter Infrastruktur, Möglichkeiten zur Stromspeicherung und Kosten auf. Einige dieser Aspekte sollen im Folgenden kurz beleuchtet werden.

Energieeffizienz und Speicherung:

Bei der Erzeugung von Kraftstoffen aus Strom fallen prozessbedingte Verluste an, so dass die direkte Nutzung von Strom energieeffizienter ist. Andererseits kann die Erzeugung von stromgenerierten Kraftstoffen als Speicher für unkontrollierte Spitzen in der Strombereitstellung genutzt werden. Wenn solche Energieträger als chemische Energiespeicher zum Ausgleich von Spitzen in der Strombereitstellung ohnehin benötigt werden, ist die direkte Nutzung als Kraftstoff energieeffizienter als eine Rückverstromung.

Nutzungsrestriktionen:

Auf Grund der begrenzten Reichweite sind reine Batteriefahrzeuge für die Langstreckenmobilität weniger geeignet. Eine mögliche Alternative stellen Plug-In-Hybridfahrzeuge dar.

Im Straßengüterverkehr sind für die mit leichten Nutzfahrzeugen (LNF) und kleinen Lkw abgewickelten Zulieferverkehre und Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP) sowohl Batterie- als auch Brennstoffzellenfahrzeuge denkbar. Im Schwerlastverkehr sind dagegen weder Batterie- noch Brennstoffzellenfahrzeuge eine plausible Option. Aktuell wird daher die Elektrifizierung der wichtigsten Autobahntrassen mit Oberleitungen diskutiert. In der vorliegenden Studie wird diese Möglichkeit nicht berücksichtigt. Stattdessen kommen im Hauptszenario dieser Studie im Schwerlastverkehr synthetische Flüssigkraftstoffe zum Einsatz.

Beim Luftverkehr ist die direkte Nutzung von Strom bis zum Jahr 2050 eher unwahrscheinlich bzw. maximal auf kleine Regionalflugzeuge begrenzt. Ebenso wenig scheint sie für die Schifffahrt eine plausible Option.

Technologien: Innovationen bei Fahrzeugen oder Kraftstoffen?

Elektrisch betriebene Fahrzeuge sind derzeit im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen sehr teuer. Für die Marktdurchdringung sind daher die durch Forschung und Entwicklung (z.B. bei der Batterietechnologie) realisierbaren Kostendegressionen entscheidend. Dies gilt in noch stärkerem Maß für Brennstoffzellenfahrzeuge.

Demgegenüber kann die Option der Nutzung konventioneller Fahrzeuge mit erneuerbaren Flüssigkraftstoffen auf bestehende Fahrzeugtechnologien zurückgreifen und benötigt keine zusätzliche Infrastruktur. Hier ist jedoch die Erzeugung von synthetischen Flüssigkraftstoffen auf Basis von Strom und atmosphärischem CO_2 noch nicht Stand der Technik und erfordert weitere Forschung (siehe Abschnitt 5.5.3).

Weitere Umwelteffekte

Wegen der durch die Zielvorgabe bedingten Fokussierung dieser Studie auf die Treibhausgase können weitere ökonomische, ökologische und soziale Effekte nicht umfassend berücksichtigt werden. Die Lärmbelastung beispielsweise kann durch den Einsatz von konventionellen Fahrzeugen mit Flüssigkraftstoffen nicht reduziert werden. Innerhalb von Städten würde eher die Nutzung von Elektrofahrzeugen und die Einführung von Tempolimits zu einer Minderung der Lärmemissionen führen. Auch der Ressourcenverbrauch (z.B. für die Batterien der Elektrofahrzeuge bzw. für den Infrastrukturaufbau) kann im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet werden.

3 Annahmen und Methodik

3.1 Sozioökonomische Rahmendaten

Basisjahr für die vorliegende Studie ist das Jahr 2010, so dass die Ausgangsdaten für das Jahr 2010 aus offiziellen Statistiken übernommen werden. Preise werden durchgängig in €$_{2010}$ ausgewiesen. Die sozioökonomischen Rahmendaten werden aus der Studie „2050: 100% Erneuerbarer Strom“ (UBA 2010) übernommen und entsprechen damit denjenigen der Studie [WWF 2009].

Die Bevölkerung in Deutschland sinkt bis zum Jahr 2050 auf 72,2 Mio. Einwohner. Die zu Grunde liegenden Annahmen sind eine gleichbleibende Geburtenrate (1,4), eine mittlere Steigerung der Lebenserwartung und ein Wanderungssaldo von jährlich 150.000 Personen. Damit liegt die Einwohnerzahl etwas über dem Szenario 1-W1 der 12. Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes (vgl. DESTATIS 2009), welches bei einem etwas niedrigeren Wanderungssaldo von 100.000/Jahr 69,4 Mio. Einwohner im Jahr 2050 prognostiziert. Trotz sinkender Einwohnerzahl nimmt das reale Bruttoinlandsprodukt (BIP) jährlich im Mittel um 0,7 % zu.

3.2 Bilanzraum und betrachtete Verkehrsträger

Neben dem inländischen Verkehr (Straße, Schiene, Binnenschiff, Fuß- und Fahrradverkehr) wurden im Rahmen der vorliegenden Studie auch Szenarien für den Flugverkehr und Seegüterverkehr entwickelt. Beim binnenländischen Verkehr erfolgt die Abgrenzung nach dem Inlandsprinzip, d.h. ermittelt werden Verbräuche und Emissionen für die in Deutschland erbrachte Verkehrsleistung.

Beim Seeverkehr und dem internationalen Flugverkehr ist das Inlandsprinzip nicht sinnvoll anwendbar. Für den Flugverkehr wird in Übereinstimmung mit der Methodik der Treibhausgasinventare nach dem flight stage Prinzip bilanziert, d.h. einbezogen wird die Verkehrsleistung aller abgehenden Flüge bis zur ersten Landung. Dies entspricht der Vorgehensweise in TREMOD[4] und wird dort als „Standortprinzip“ bezeichnet. Der internationale Seeverkehr wird dagegen zunächst global prognostiziert und dann über den Anteil der deutschen Wirtschaftsleistung an der Weltwirtschaftsleistung Deutschland zugerechnet.

3.3 Kraftstoffe

Zwei Dimensionen sind beim Kraftstoffeinsatz im Kontext der Szenarioentwicklung zu beachten: Zum einen die Kategorisierung der betrachteten Kraftstoffe im Hinblick auf ihre

[4] TREMOD (Transport Emission Estimation Model) ist das vom Umweltbundesamt, den Bundesministerien, dem Verband der Deutschen Automobilindustrie sowie der Deutschen Bahn AG genutzte Modell zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland.

vom Verkehrsträger und Antriebstyp abhängigen Einsatzmöglichkeiten und zum anderen der Herstellungspfad.

Die Qualitätsanforderungen an die Kraftstoffe sind dabei verkehrsträgerabhängig sehr unterschiedlich. Flugkerosin muss den hohen internationalen Anforderungen gemäß dem „Jet A1“-Standard genügen; demgegenüber können als Schiffstreibstoff eine Vielzahl unterschiedlicher Qualitäten zum Einsatz kommen.

Für die Energie- und Treibhausgasbilanz sind die Herstellungspfade des jeweiligen Kraftstofftyps und die zu Grunde liegenden Energieträger relevant. Bei der Herstellung wird in dieser Studie differenziert nach den drei Kategorien fossil, biogen und stromerzeugt. Bei stromerzeugten Kraftstoffen wird der Strombedarf für die Herstellung explizit berechnet und ausgewiesen. Auch bei der Gewinnung und Raffinierung von fossilen und biogenen Kraftstoffen wird Strom benötigt. Dieser Anteil ist allerdings gering und wird daher nicht separat als Strombedarf ausgewiesen.

3.4 Modell

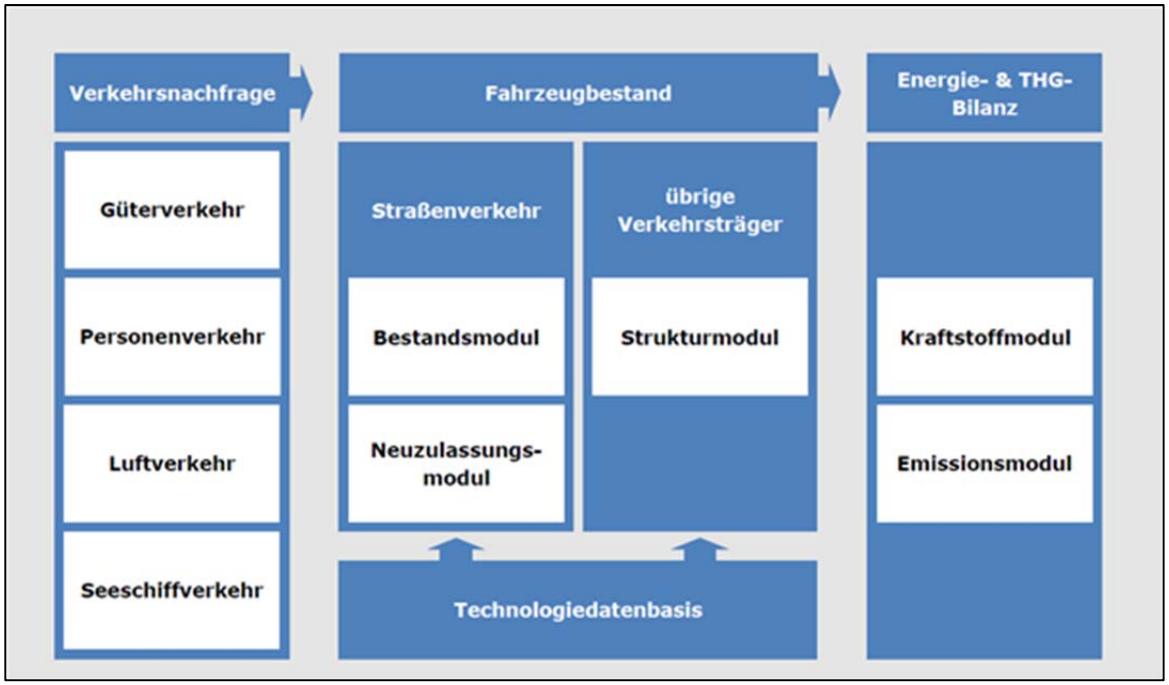

Abbildung 1: Übersicht über das Modell TEMPS

Für die Berechnung der Technologieentwicklung, des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen wird das Modell TEMPS[5] des Öko-Instituts verwendet. Das Modell besteht aus den drei Komponenten Verkehrsnachfrage, Fahrzeugbestand, Energie- &

[5] **T**ransport **Em**issions and **P**olicy **S**cenarios.

Treibhausgas-Bilanz (Abbildung 1). Alle Entwicklungen werden dabei in jahresfeinen Schritten bis 2050 modelliert.

Die Komponente „Verkehrsnachfrage“ ermittelt zunächst auf Grundlage der sozioökonomischen Rahmendaten ein Verkehrsleistungsszenario bis 2050. Dies wird auf Grund der teils unterschiedlichen Bilanzräume bzw. Rahmendaten in vier Modulen umgesetzt – getrennt nach Güterverkehr (Lkw / Leichte Nutzfahrzeuge, Bahn, Binnenschiff), Personenverkehr (Pkw, Kraftrad, Bus, Bahn, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen (SSU), Fuß- und Fahrradverkehr), Luftverkehr (national und international) und Seeverkehr.

Die Komponente „Fahrzeugbestand“ dient dazu, die Technologie- und Effizienzentwicklung abzubilden. Dies erfolgt bei Pkw und Lkw detailliert auf Fahrzeugebene; für die übrigen Verkehrsträger wird die Entwicklung auf einer aggregierteren „Systemebene“ modelliert. Auf diese beiden Berechnungspfade wird im Folgenden kurz eingegangen.

Wegen der besonderen Relevanz der Pkw und Lkw für die Treibhausgasemissionen im Verkehr wird bei diesen die Effizienzentwicklung des Bestandes sowie die Marktdurchdringung alternativer Technologien über ein Neuzulassungs- und Bestandsmodul abgebildet. Dazu wird zunächst über den Parameter Auslastung aus der Verkehrsleistung die Fahrleistung berechnet. Im Neuzulassungsmodul wird in Abhängigkeit von Inputgrößen wie Verkehrsnachfrage und den Marktanteilen verschiedener Antriebstechnologien in Jahresschritten die Zusammensetzung der Neuzulassungen ermittelt. Das Bestandsmodul berechnet mittels spezifischer Überlebensraten der Fahrzeuge und durchschnittlichen Fahrleistungen den nach Größenklasse und Antriebsart differenzierten Bestand. Daten zum Altbestand, Überlebenskurven der Fahrzeuge und durchschnittlichen Fahrleistungen basieren dabei auf [TREMOD 5.25] und [MiD 2008]. Bei der Bestandsmodellierung ist zu beachten, dass es sich nicht tatsächlich um den deutschen, sondern um einen „fiktiven Bestand“ handelt, da die nach dem Inlandsprinzip ermittelten Fahrleistungen teils auch mit ausländischen Fahrzeugen erbracht werden. Dies trifft besonders für den Straßengüterverkehr zu: Der Anteil der mit ausländischen Fahrzeugen erbrachten Fahrleistung an der Gesamtfahrleistung der europäischen Lkw (>3,5 t) in Deutschland lag im Jahr 2010 bei über 45 % (KBA 2012). Implizit wird also die Annahme getroffen, dass im Ausland zugelassene Fahrzeuge, die in Deutschland gefahren werden, dieselbe Effizienz besitzen wie in Deutschland zugelassene Lkw. Die Effizienzentwicklung der einzelnen Fahrzeugklassen im Straßenverkehr ist differenziert nach Größenklassen in der Technologiedatenbank hinterlegt.

Im Gegensatz zum Straßenverkehr setzen z.B. beim Schienenverkehr Effizienzmaßnahmen nicht nur beim einzelnen Fahrzeug, sondern auch auf Systemebene an. Ein Beispiel dafür ist die Rückspeisung von Bremsenergie ins Netz bei Straßenbahnen. Daher wird für den Schienenverkehr kein Bestand berechnet, sondern die Entwicklung der Verbräuche auf „Systemebene“ ermittelt. Dieser einfachere Ansatz wird auch bei den übrigen Verkehrsträgern (Schiff, Flugzeug, Bus, Kraftrad) verwendet, da die für eine Bestandsmodellierung benötigten Daten nicht vorhanden sind bzw. der Beitrag zu den Emissionen so gering ist, dass ein höherer Detailgrad für eine Gesamtbetrachtung nicht erforderlich ist.

Die Ergebnisse für den Straßenverkehr und die übrigen Verkehrsträger werden schließlich zusammengeführt, um im Emissionsmodul den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen berechnen zu können. Dazu sind Emissionsfaktoren für die einzelnen Kraftstofftypen in Jahresschritten hinterlegt.

3.5 Emissionsberechnung

Um den Beitrag verschiedener Treibhausgasemissionen auf zukünftige Klimaveränderungen vergleichen zu können, ist deren Verweilzeit in der Atmosphäre von entscheidender Bedeutung. Darüber hinaus sind auch weitere Aspekte, wie z.B. die geographische Verteilung bzw. – insbesondere beim Luftverkehr – die Höhe des Ausstoßes relevant. Dieser Aspekt wird in dem makroskopischen Ansatz dieser Studie allerdings nicht berücksichtigt.

Zur Quantifizierung der Klimawirkung verschiedener Treibhausgasemissionen im Verkehr existieren unterschiedliche Maße für verschiedene Anwendungen (für eine ausführliche Übersicht siehe [FUGLESTEVEDT 2009]). Über das im Kyoto-Protokoll verwendete relative Treibausgaspotenzial (Global Warming Potential/GWP) hinaus werden auch alternative Maße wie das Global Temperature Change Potential (GTP) diskutiert.

Für die vorliegende Studie wird als Maß zum Vergleich der Effekte verschiedener Treibhausgase das GWP verwendet. Das absolute Treibhausgaspotenzial AGWP ist dabei definiert als der über einen Zeitraum von 100 Jahren aufsummierte spezifische Strahlungsantrieb eines Treibhausgases unter Berücksichtigung der Verweilzeit. Das relative Treibhausgaspotenzial (GWP) drückt dies in Bezug zum Referenzgas CO_2 aus, wodurch sich Faktoren zur Berechnung der CO_2-Äquivalente (CO_2-eq.) ergeben. Verwendet werden in dieser Studie nicht die ursprünglichen Faktoren aus dem Kyoto-Protokoll, sondern die aktuelleren Werte aus [FOSTER et al. 2007][6].

[6] Die Treibhausgaswirkung von Methan (CH_4) wird demnach mit 25 CO_2-Äquivalenten bilanziert und diejenige von Distickstoffoxid (N_2O) mit 298 CO_2-Äquivalenten.

4 Basisszenario

4.1 Einleitung

Das Basisszenario stellt eine Entwicklung dar, welche bestehende Trends ohne Strukturbrüche fortschreibt. Es bildet die Referenz zur Einordnung des Hauptszenarios und ermöglicht darüber hinaus Vergleiche mit anderen Studien.

Der aktuelle Stand der gesetzlichen Regulierung wird im Szenario berücksichtigt. Für die weitere Entwicklung von Verkehrsnachfrage und Emissionen wird davon ausgegangen, dass sich die Globalisierung und europäische Integration ungebremst fortsetzen, keine weiteren Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung oder -verlagerung umgesetzt werden und die Verkehrsnachfrage somit weiter zunimmt. Auch alternative Antriebe und Kraftstoffe können sich in diesem Szenario nur in sehr geringem Maße durchsetzen.

Gemäß der drei Komponenten des Modells (siehe Abschnitt 3.4) wird im Folgenden zunächst auf die Verkehrsnachfrage, anschließend auf Technologie-und Effizienzentwicklung und schließlich auf die verfügbaren Kraftstoffe und deren Emissionsfaktoren eingegangen.

4.2 Einflussgrößen auf die Verkehrsnachfrage

Die zukünftige Entwicklung der Verkehrsnachfrage für einen Zeithorizont von fast 40 Jahren ist mit großer Unsicherheit verbunden, so dass das Basisszenario als eine mögliche, aber nicht zwangsläufige Entwicklung zu interpretieren ist. Die Herleitung des Verkehrsnachfrageszenarios erfolgt für die inländischen Verkehrsträger Straße, Schiene und Binnenschiff sowie den nicht-motorisierten Individualverkehr (NMIV), parameterbasiert über die Parameter „Einwohnerkilometerzahl“ im Personenverkehr (PV) bzw. „Transportintensität“ im Güterverkehr (GV). Grundlage dafür sind Ergebnisse des Basisszenarios von Renewbility II (vgl. REN II). Die Seeverkehrsprognose erfolgt in Anlehnung an die Studie der International Maritime Organization [IMO 2009]. Für den Luftverkehr wird eine Trendfortschreibung hinterlegt. Wegen der unterschiedlichen Charakteristika und Vorgehensweisen wird im Folgenden zunächst auf den inländischen Personen- und Güterverkehr und im Anschluss auf den Flug- und Seeverkehr eingegangen.

4.2.1 Personenverkehr (inländisch)

Die Ableitung eines Szenarios für den inländischen Personenverkehr erfolgt über den Parameter „Einwohnerkilometerzahl“, welcher definiert ist als die pro Einwohner im Jahr erbrachte Verkehrsleistung (pkm/Einwohner). Die Gesamtverkehrsleistung im Personenverkehr resultiert dann aus der Verknüpfung von Bevölkerungsentwicklung und Einwohnerkilometerzahl.

Für das Basisjahr 2010 wird die Verkehrsleistung in Personenkilometern aus den Daten des statistischen Bundesamtes [DESTATIS 2012a] übernommen. Die Verkehrsleistungen im Fahrrad- und Fußverkehr basieren auf der Studie Mobilität in Deutschland [MiD 2008].

Der Parameter Einwohnerkilometerzahl wird bis zum Jahr 2030 aus den Ergebnissen des Basisszenarios von Renewbility II abgeleitet. Bedingt durch die Effizienzsteigerungen der Pkw und eine damit einhergehende Minderung der MIV-Wegekosten verzeichnet der motorisierte Individualverkehr (MIV) und damit die Einwohnerkilometerzahl im Basisszenario von Renewbility II insgesamt starke Wachstumsraten. Für den Zeitraum nach 2030 scheint ein ungebremstes Wachstum von gleichbleibender Größenordnung nicht plausibel. Vielmehr ist davon auszugehen, dass Begrenzungen bei der in Mobilität investierten Zeit und beschränkte Haushaltsbudgets zu Sättigungseffekten führen. Daher wird für den Zeitraum bis 2050 davon ausgegangen, dass sich das Wachstum der Einwohnerkilometerzahl ab 2030 abschwächt und ab dem Jahr 2040 nicht weiter wächst.

In Abbildung 2 ist die resultierende Entwicklung im Vergleich zu anderen Studien dargestellt. Diese gehen überwiegend von einer bis zum Jahr 2050 annähernd konstanten Einwohnerkilometerzahl aus.

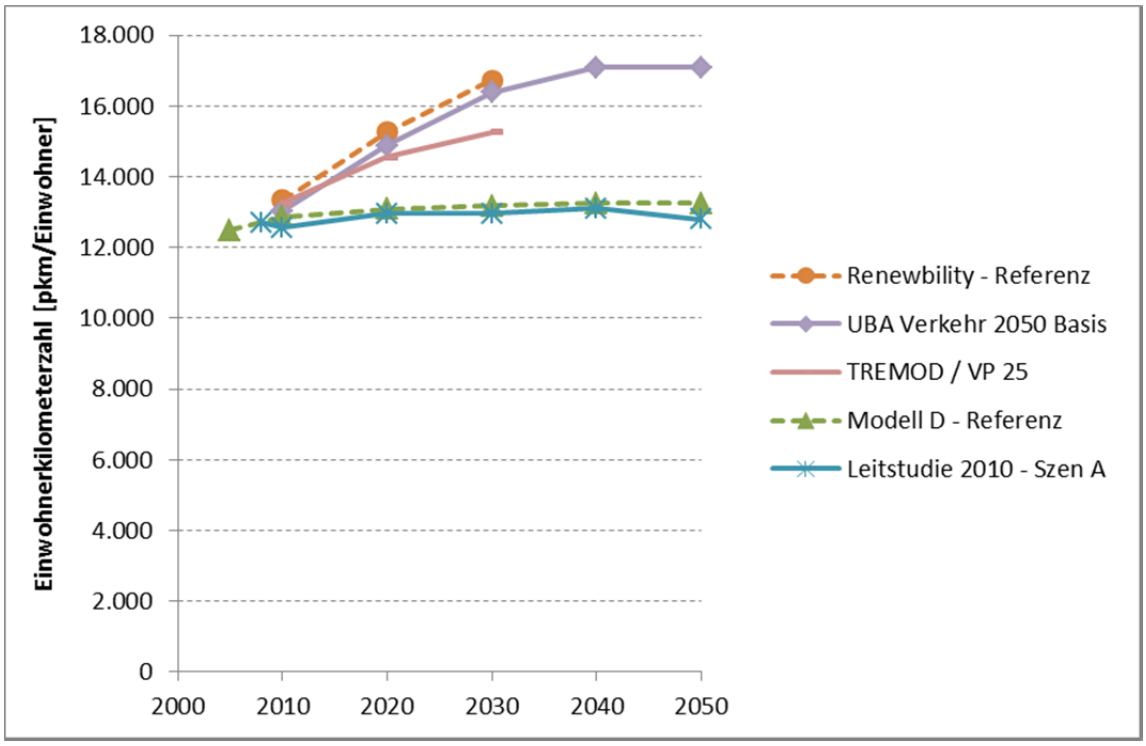

Abbildung 2: Vergleich der Einwohnerkilometerzahl in Verkehrsszenarien

Dass die Einwohnerkilometerzahl wie in Renewbility II und in der vorliegenden Studie in Zukunft weiter zunimmt, ist zwar keine zwangsläufige Entwicklung, vor dem Hintergrund von zunehmender Altersmobilität, europäischer Integration und Rebound-Effekten durch zunehmende Effizienz der Pkw ist dies aber ein in sich konsistenter und möglicher Pfad.

In einem weiteren Schritt wird die Verteilung auf die Verkehrsträger (Modal Split) ermittelt. Dieser wird für das Basisjahr 2010 an den offiziellen Statistiken (vgl. DESTATIS 2012a) kalibriert. Um ein konsistentes Szenario zu erhalten, werden die Veränderungen im Modal

Split aus Renewbility bis zum Jahr 2030 übernommen. Dies hat einen Modal Shift zu Gunsten des Straßenverkehrs zur Folge. Nach 2030 wird der Modal Split konstant gehalten.

4.2.2 Güterverkehr (inländisch)

Die Vorgehensweise im Güterverkehr ähnelt derjenigen im Personenverkehr. Die Ableitung des Verkehrsnachfrageszenarios bis zum Jahr 2050 erfolgt hier über den Parameter leistungsbezogene Transportintensität (tkm/€ BIP).

Analysen zeigen, dass die leistungsbezogene Transportintensität in den vergangenen Jahren zugenommen hat [DESTATIS 2011, DESTATIS 2012d]. Dies ist auf eine Zunahme der durchschnittlichen Transportweiten zurückzuführen. Die aufkommensbezogenen Transportintensitäten (t/€ BIP) sind in den letzten 20 Jahren zwar gesunken, die durchschnittlichen Transportweiten (tkm / t Transportgut) sind jedoch überproportional gestiegen. Gründe für die Zunahme der Transportweiten liegen unter anderem im Wachstum des grenzüberschreitenden Verkehrs sowie Güterstrukturverschiebungen mit dem Trend zu Gütergruppen mit hohen charakteristischen Transportweiten.

Die Fortschreibung der leistungsbezogenen Transportintensität bis zum Jahr 2030 setzt auf die Ergebnisse aus dem Basisszenario von Renewbility II auf. Dieses ist von einem weiteren starken Wachstum der Transportintensität geprägt. Zurückzuführen ist diese Entwicklung unter anderem auf Effizienzsteigerungen im Straßenverkehr und damit verbundenen sinkenden Kilometerkosten.

Für die Modellierung wird die leistungsbezogene Transportintensität in die Faktoren aufkommensbezogene Transportintensität und Transportweite zerlegt. Diese Faktoren werden differenziert nach Binnenverkehr und grenzüberschreitendem Verkehr betrachtet. Während die aufkommensbezogenen Transportintensitäten im Basisszenario von Renewbility II im Binnenverkehr bis 2030 einen Rückgang verzeichnen, nehmen sie im grenzüberschreitenden Verkehr zu. Diese Entwicklungen, welche u.a. vor dem Hintergrund der europäischen Integration und dem Trend zu hochwertigeren, weiter verarbeiteten und leichteren Gütern (Güterstruktureffekt) plausibel erscheinen, werden für den Zeitraum nach 2030 fortgeschrieben.

Berechnungen auf Basis von Renewbility ergeben bei den Transportweiten bis 2030 eine Zunahme um 32 % gegenüber 2010 auf durchschnittlich 217 Kilometer. Von einer weiteren Zunahme nach 2030 wird aufgrund von Infrastrukturbeschränkungen und damit verbundenen natürlichen Grenzen der inländischen Transportweiten nicht ausgegangen. Die Gesamtverkehrsleistung des Basisszenarios ergibt sich durch Verknüpfung der leistungsbezogenen Transportintensität mit der BIP-Entwicklung aus den sozioökonomischen Rahmendaten. Der Modal Split wird wie beim Personenverkehr aus Renewbility II übernommen.

4.2.3 Luftverkehr

In Renewbility II wurde nur der nationale Luftverkehr modelliert. Wegen der wachsenden Bedeutung wird auch der internationale Luftverkehr in dieser Studie berücksichtigt. Daher wurde für die Modellierung des Luftverkehrs ein eigenes Modul aufgebaut, dessen Konzeption sich jedoch in der Verwendung der Parameter am inländischen Verkehr orientiert.

Dafür wird zunächst mittels linearer Regression aus der historischen Entwicklung in [TREMOD 5.25] ein Trend für die verkehrsleistungsbezogene Transportintensität bzw. die Einwohnerkilometerzahl ermittelt. Dieser lineare Trend wird bis 2030 fortgeschrieben. Ab 2030 setzt in Analogie zum inländischen Verkehr ein Sättigungseffekt ein. Die Transportintensität im nationalen Luftfrachtverkehr ist in den letzten Jahrzenten vor allem durch die Verlagerung der Luftpost auf die Straße zurückgegangen[7] und wird für das Basisszenario konstant gehalten. Die Entwicklung der jeweiligen Parameter für Personen- und Güterverkehr ist in Abbildung 3 dargestellt.

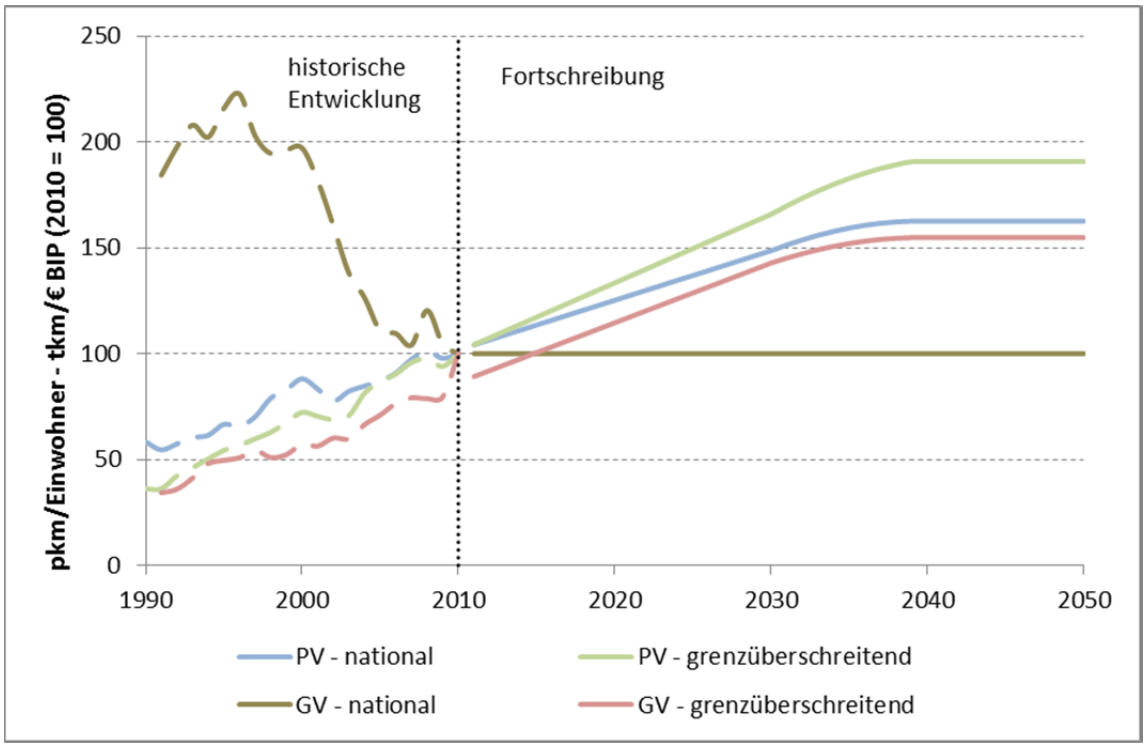

Abbildung 3: Parameter zur Entwicklung des Luftverkehrsszenarios

4.2.4 Seegüterverkehr

Die Bedeutung des Seegüterverkehrs für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen rückt zunehmend in den Fokus von Verkehrsszenarien. Im Jahr 2010 wurden nach [UNCTAD 2011] weltweit 8.408 Millionen Tonnen im Seegüterverkehr verladen. Gegenüber 1990 hat sich die Tonnage damit mehr als verdoppelt.

Die Berücksichtigung des Seeverkehrs bei einer auf Deutschland fokussierten Studie wirft noch stärker als im Luftverkehr die Frage nach einer angemessenen Abgrenzungsmethodik auf. Ein großer Anteil des deutschen Handels wird über ausländische Häfen abgewickelt, z.B. über die ZARA-Häfen (Zeebrügge, Amsterdam, Rotterdam, Antwerpen). Ein allein auf die deutschen Häfen begrenzter Bilanzraum (analog zum Flugverkehr) scheint aus diesem

[7] [TREMOD-AV 2010]

Grund nicht angemessen. Stattdessen sollte sich die Zurechnung möglichst am Verursacherprinzip orientieren.

Das Verkehrsnachfrageszenario für den Seeverkehr orientiert sich am Szenario A1B in [IMO 2009]. Dieses Szenario der Studie der International Maritime Organization (IMO) geht von einem Wachstum des globalen Seegüterverkehrs von 402% zwischen 2007 und 2050 aus, was einer jährlichen Wachstumsrate von 3,8% entspricht. Basisjahr der Studie ist 2007. Bedingt durch die Wirtschaftskrise gab es beim Seeverkehrsaufkommen im Jahr 2009 einen Rückgang um 4,5 %. Für das vorliegende Szenario wird daher die IMO-Prognose an die in [UNCTAD 2011] veröffentliche Tonnage für das Jahr 2010 angepasst.

In einem zweiten Schritt wird das daraus resultierende globale Szenario für den internationalen Seeverkehr anteilig Deutschland zugerechnet. Wegen der starken Abhängigkeit des Seegüterverkehrs von der Wirtschaftsleistung erfolgt diese Zurechnung auf Basis des Verhältnisses von deutscher zu weltweiter Wirtschaftsleistung. Diese Vorgehensweise soll zumindest eine grobe Einschätzung der Größenordnung des Energieverbrauchs im Seeverkehr bis 2050 im Vergleich zu den übrigen Verkehrsträgern ermöglichen.

Der im Basisjahr 2010 für die Zurechnung verwendete Anteil der deutschen Wirtschaftsleistung wurde den Daten aus [Weltbank 2012] entnommen und beträgt 5,2 %. Im Zeitraum bis 2050 wird der Anteil Deutschlands an der Weltwirtschaftsleistung voraussichtlich sinken. Als Quelle für die Entwicklung dieses Anteils werden die Daten aus [CIESIN 2002] herangezogen. Die Szenarien zur Entwicklung der Weltwirtschaft, welche auch der IMO-Studie zu Grunde liegen, sind darin nach Ländern differenziert. Die Auswertung der Daten und Anpassung an das Basisjahr 2010 ergibt dann, dass der Anteil Deutschlands an der Weltwirtschaftsleistung von 5,2 % auf 2,37 % im Jahr 2050 sinkt. Diese Annahme wird für die Zurechnung des global prognostizierten Seeverkehrs zu Deutschland verwendet.

4.3 Technologie- und Effizienzentwicklung

Effizienzsteigerungen sind ein wesentlicher Faktor für die Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehr. Sie können entweder durch Weiterentwicklung bestehender Antriebstechnologien oder durch neue Antriebskonzepte erreicht werden. Die im folgenden Abschnitt diskutierten Technologie- und Effizienzpotentiale sind dabei abhängig vom Verkehrsmittel. Bei Pkw und Lkw wird der Bestand explizit modelliert (siehe Modellbeschreibung in Abschnitt 3.4), weshalb bei diesen Verkehrsmitteln auch auf die Neuzulassungsstruktur, d.h. die Marktdurchdringung alternativer Antriebe, eingegangen wird.

4.3.1 Pkw

Neuzulassungsstruktur

Bei den Pkw wird unterschieden zwischen konventionellen (Diesel- und Ottomotor), Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen. Bei „Plug-In-Hybridfahrzeugen“ (HEV) handelt es

sich um Fahrzeuge mit einer Möglichkeit zum elektrischen Laden (PHEV und EREV[8]), welche ihre Energie auch zu einem überwiegenden Teil über diesen Weg beziehen. Hybridisierung bei konventionellen Fahrzeugen ohne externe Lademöglichkeit wird demgegenüber als eine von mehreren möglichen Effizienztechnologien der konventionellen Fahrzeuge berücksichtigt. Unter Elektrofahrzeugen sind batterieelektrische Fahrzeuge zu verstehen.

Für das Basisszenario wird angenommen, dass sich alternative Antriebe auf dem Pkw-Markt nur langsam und in relevantem Maße erst ab dem Jahr 2030 durchsetzen. Geprägt ist der Pkw-Markt von einem hohen Anteil konventioneller Fahrzeuge, welche jedoch durch den Einsatz diverser Technologien (z.B. Hybridisierung, Leichtbau, etc.) wesentlich effizienter werden. Erst ab dem Jahr 2030 kommen reine Elektro- und Plug-In-Hybridfahrzeuge in den Markt, wobei die Marktdurchdringung aus [OPTUM 2011] zeitversetzt übernommen wird. Weitere alternative Antriebstechnologien können sich im Basisszenario nicht durchsetzen.

Effizienzentwicklung

Für die Energieverbräuche der Pkw muss unterschieden werden nach den gemäß dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) gemessenen Werten und den Realverbräuchen. Der reale Energieverbrauch der Pkw-Neuzulassungen liegt im Durchschnitt über den Werten des NEFZ. Diese Diskrepanz nimmt seit Einführung der CO_2-Emissionsstandards sogar zu (vgl. ICCT 2012). Offizielle Statistiken sowie die Emissionsstandards beziehen sich jedoch auf den NEFZ. Daher basiert auch die Fortschreibung der Effizienzentwicklung zunächst auf dem Fahrzyklus. Dabei wird nach drei Größenklassen differenziert. Die resultierenden Verbräuche werden anschließend mit einem pauschalen Aufschlag für den Realbetrieb von 15 % versehen.

Für das Basisjahr 2010 wird der spezifische Energieverbrauch aus den Verbrauchswerten des KBA zu Pkw-Neuzulassungen in 2010[9] bestimmt. Die Fortschreibung der Effizienzentwicklung orientiert sich bis zum Jahr 2030 an Annahmen zur weiteren EU-Regulierung zu CO_2-Emissionsstandards für Pkw-Neuzulassungen, da die jeweils gültigen Zielgrößen ein wesentlicher Treiber für die weitere Effizienzsteigerung der Pkw sind. Für das Jahr 2020 ist als EU-weite Zielgröße ein Wert von 95 g CO_2/km in der Verordnung festgeschrieben. Bis zum Jahr 2030 ist mit einer weiteren Absenkung der Zielgröße zu rechnen, so dass in Anlehnung an das Renewbility-Basisszenario von 80 g CO_2/km ausgegangen wird.

Die EU-Emissionsstandards werden auf Herstellerebene angewendet und sind abhängig vom Fahrzeuggewicht. Pkw-Neuzulassungen in Deutschland liegen derzeit erheblich über dem EU-weiten Schnitt an spezifischen Emissionen (2010: ca. + 11 g CO_2/km). Es wird davon ausgegangen, dass die Neuzulassungen in Deutschland mit 108 g CO_2/km in 2020 und 95 g CO_2/km für das Jahr 2030 auch weiterhin über den angenommenen EU-Emissionsstandards liegen. Dies entspricht den Annahmen in TREMOD.

---

8 PHEV = Plug-In-Hybrid Electric Vehicle, EREV = Extended Range Electric Vehicle

9 KBA 2011

Die Realisierung der Effizienzpotenziale erfolgt über ein Bündel verschiedener Technologien, darunter Leichtbau, Hybridisierung, etc. Nach [TNO et. al 2011] ist dabei dieselbe relative Emissionsminderung bei Dieselfahrzeugen teurer als bei Ottofahrzeugen. Mittels der Kostenkurven in TNO et al. wird die kostenoptimale Verteilung der Reduktionspotenziale auf Diesel- bzw. Ottofahrzeuge ermittelt. Insgesamt entspricht dies einer Reduktion der NEFZ-Verbräuche der Neuzulassungen um 37 % im Zeitraum zwischen 2010 und 2030.

Derzeit können Fahrzeuge ohne direkte Emissionen von den Herstellern auf ihre Flottenziele als emissionsfrei angerechnet werden. Bis zum Jahr 2015 ist sogar eine Mehrfachanrechnung („Super Credits“) möglich. Wenn dieses Modell auch über diesen Zeitpunkt hinaus erhalten bliebe, würde ein hoher Anteil an Elektrofahrzeugen ab 2030 dazu führen, dass die Hersteller auch mit einer weniger ambitionierteren Entwicklung bei den konventionellen Fahrzeugen den vorgegebenen Flottendurchschnitt erreichen.

Es wird daher davon ausgegangen, dass die EU-CO_2-Regulierung spätestens für den Zeitraum nach 2030 angepasst wird. Die Fortschreibung der Effizienzentwicklung orientiert sich daher für den Zeitraum nach 2030 nicht mehr an der Gesetzgebung. Stattdessen wird bei den konventionellen Pkw angenommen, dass die maximal mögliche Reduktion nach [TNO et al. 2011] bis 2050 realisiert wird. Dies entspricht allerdings für den Zeitraum 2030-2050 gegenüber der vorigen Periode wesentlich geringeren Effizienzsteigerungen von etwa 8%.

Für die Stromverbräuche von Elektro- und Plug-In-Hybridfahrzeugen werden die Annahmen aus OPTUM bis zum Jahr 2030 verwendet und bis 2050 mit einer konstanten Effizienzsteigerungsrate fortgeschrieben. Für Plug-In-Hybridfahrzeuge wird im verbrennungsmotorischen Modus in 2010 ein Effizienzvorteil von 15 % gegenüber konventionellen Pkw angenommen, da der Verbrennungsmotor je nach Fahrzeugkonfiguration in diesen Fahrzeugen großteils im Optimalpunkt eingesetzt werden kann. Weitere Effizienzpotenziale sind bei elektrischen Pkw allerdings geringer als bei konventionellen Fahrzeugen, da die Hybridisierung als zukünftige Effizienztechnologie dort nicht berücksichtigt werden kann bzw. bereits berücksichtigt ist. Bei Plug-In-Hybridfahrzeugen wird ein elektrischer Fahranteil von 67 % angenommen, was den Ergebnissen aus dem Projekt OPTUM entspricht.

4.3.2 Lkw und leichte Nutzfahrzeuge

Neuzulassungsstruktur

Es wird im Basisszenario von keiner nennenswerten Marktdurchdringung alternativer Antriebe im Straßengüterverkehr ausgegangen, so dass im Basisszenario nur konventionelle leichte Nutzfahrzeuge und Lkw zum Einsatz kommen.

Effizienzentwicklung

Bei den Lkw ist der Grad der Auslastung für den Verbrauch relevant, weshalb unterschieden wird nach dem Verbrauch bei Leerfahrten und dem Verbrauch bei voller Beladung. Der Endenergieverbrauch wird dann in Abhängigkeit von der Auslastung berechnet. Die Energieverbräuche sind differenziert nach 5 Größenklassen in der Technologiedatenbank hinterlegt.

Für das Jahr 2010 wurden die Werte je Größenklasse auf Basis von TREMOD 5.25 und [SCHMIED 2011] bestimmt. Die Effizienzentwicklung orientiert sich bis 2030 am Basisszenario von Renewbility II. Hinterlegt ist damit ein Emissionsstandard für leichte Nutzfahrzeuge von 147 g CO_2/km in 2020 und eine moderate Fortschreibung. Für 2050 wird angenommen, dass die Maximalvariante aus der Renewbility-Datenbasis (die dort in 2030 erreicht wird) hier bis 2050 erreicht werden kann. Insgesamt führen diese Annahmen bei leichten Nutzfahrzeugen und kleinen Lkw (<7,5t zGG) zu Effizienzsteigerungen von 34 %-36 % im Zeitraum zwischen 2010 und 2050. Größere konventionelle Lkw und Sattelzüge erreichen gegenüber heute Effizienzsteigerungen von ca. 29 % bis zum Jahr 2050.

4.3.3 Flugzeuge

Es wird nicht davon ausgegangen, dass sich bis 2050 im Luftverkehr neue Antriebskonzepte etablieren können. Auf Grund langer Entwicklungs- und Nutzungszeiten von Flugzeugen ist im Luftverkehr nur mit einer langsamen Erneuerung und Effizienzentwicklung der Flotten zu rechnen.

Basis für die nach Entfernungsklassen differenzierten Energieverbräuche in 2010 ist die TREMOD-Aktualisierung [TREMOD-AV 2010]. Für TREMOD-AV wurden die Energieverbräuche zunächst in einem Bottom-up-Verfahren getrennt nach den Flugzyklen LTO (landing and take-of cycle / alle Aktivitäten unterhalb einer Höhe von 3000 Fuß) und CCD (climb, cruise, descend / Reiseflugphase) sowie nach 52 Flugzeugtypen ermittelt und dann an die Energiebilanz angepasst. Der Energieverbrauch pro Personenkilometer sinkt demnach tendenziell mit zunehmender Entfernung, was u.a. daran liegt, dass der Anteil des LTO-Zyklus am Gesamtenergieverbrauch abnimmt. Daher wird die Verkehrsleistung des Luftverkehrs nach Entfernungsklassen differenziert betrachtet und mit unterschiedlichen Effizienzen unterlegt. Zu beachten ist, dass durch die offiziellen Verkehrsstatistiken die reale Flugentfernung tendenziell unterschätzt wird und daher die Energieverbräuche je pkm über den Werten der Luftfahrtindustrie liegen.

Eine Selbstverpflichtung der International Civil Aviation Organization (ICAO) benennt das Ziel, die Effizienz der eingesetzten Flugzeuge jährlich um 2 % in Bezug auf das Kraftstoffvolumen zu verbessern. Die Air Transport Action Group (ATAG), ein internationaler Zusammenschluss von Luftverkehrsunternehmen, strebt 1,5 % Effizienzsteigerung pro Jahr an. Für das Basisszenario wird in Übereinstimmung mit Renewbility II von einer tatsächlich realisierten Effizienzsteigerung von durchschnittlich 0,9 % pro Jahr ausgegangen.

4.3.4 Seeschiffe

Die Energieverbräuche im Seeverkehr beruhen auf [IMO 2009]. Der Treibstoffverbrauch im internationalen Seeverkehr betrug nach dieser Studie in der „consensus“-Variante 333 Mio. t im Jahr 2007. Verknüpft mit dem Energiegehalt der Treibstoffe lassen sich daraus der Gesamtenergiebedarf und der Energiebedarf je Tonnenkilometer (für das Jahr 2007) bestimmen.

Verflüssigtes Erdgas (Liquid Natural Gas, LNG) wird derzeit als vielversprechender Treibstoff für die Seeschifffahrt diskutiert. Vor allem vor dem Hintergrund neuer Regulierungen von Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen stellen mit LNG betriebene Schiffe eine Alternative dar. Eine ausführliche Machbarkeitsstudie zur LNG-Infrastruktur [DMA 2012] schätzt die

Nachfrage nach LNG im Schiffverkehr auf 7 Mio. t in 2030. Aufgrund der angewandten Methodik zur globalen Prognose des Seeverkehrs, in der diese 7 Mio. t nur einen kleinen Teil der weltweiten Treibstoffnachfrage ausmachen, wird der Einsatz von LNG-Schiffen in dieser Studie nicht gesondert berücksichtigt.

Die Effizienzentwicklung bis 2050 orientiert sich an den von der IMO beschlossenen Maßnahmen. Mitte 2011 haben sich 49 Staaten im Umweltausschuss (Marine Environment Protection Committee (MEPC) dazu verpflichtet, die CO_2-Emissionen neuer Seeschiffe bis 2019 um 10 %, bis 2024 um 20 % und ab 2025 um mindestens 30 % zu reduzieren (Energy Efficiency Design Index, EEDI). Für alle Bestandsschiffe ist ein Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) verbindlich. Maßnahmen zur Umsetzung der Effizienzziele im Rahmen des EEDI und SEEMP sind z.B. größere Schiffe, Geschwindigkeitsreduktion („slow steaming“) und Verbesserungen in Schiffsdesign und -betrieb. Nach dem Beschluss des EEDI und SEEMP wurde von der IMO ein Impact Assessment durchgeführt [BAZARI 2011]. Dieses kommt zu dem Ergebnis, dass gegenüber einem Business-As-Usual-Szenario die CO_2-Emissionen durch die Effizienzsteigerungen bis 2050 um 38,7 % gegenüber 2010 reduziert werden. Auch [IMO 2009] geht von einer Effizienzsteigerung von 39 % aus. Diese Annahme wird für das Basisszenario übernommen.

4.3.5 Übrige Verkehrsmittel

Für die übrigen Verkehrsmittel (Bahn, Bus, Krafträder, Binnenschifffahrt) wird die Effizienzentwicklung aus [TREMOD 5.25] bis 2030 übernommen und bis 2050 mit der jährlichen Änderungsrate zwischen 2010 und 2030 fortgeschrieben. Die Werte für die Binnenschifffahrt basieren dabei auf [IFEU/ÖI 2011].

4.4 Energieträger und Kraftstoffe

Für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor sind neben der Effizienzentwicklung die eingesetzten Kraftstoffe und Energieträger relevant. Die im Basisszenario getroffenen Annahmen zu den eingesetzten Kraftstoffen sowie ihren Emissionsfaktoren werden im folgenden Abschnitt dargestellt. Außer den direkten Emissionen, die bei der Verbrennung entstehen, werden auch die (indirekten) Vorkettenemissionen der Kraftstoffe berücksichtigt.

4.4.1 Eingesetzte Kraftstoffe

Im Basisszenario kommen hauptsächlich konventionelle, fossile Kraftstoffe und im Straßenverkehr auch Biokraftstoffe zum Einsatz.

Welches Potenzial an nachhaltig erzeugten Biokraftstoffen zukünftig tatsächlich zur Verfügung steht, ist Gegenstand kontroverser Diskussion und kann an dieser Stelle nicht umfassend bewertet werden. Für das Basisszenario orientiert sich der Anteil der Biokraftstoffe im Verkehrssektor daher bis zum Jahr 2020 an der bestehenden Gesetzgebung (Biokraftstoffquotengesetz; Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen). Im Jahr 2010 betrug der Anteil der Biokraftstoffe im Verkehr (ohne Flugbenzin) 5,8 %, im Jahr 2011 5,6 % (AGEE 2012). Den größten Anteil macht dabei mit 26 TWh Biodiesel aus; Bioethanol hat mit 8,7 TWh einen geringeren Anteil. Bis zum Jahr

2014 sollen mindestens 6,25 % des Energiegehalts der Gesamtkraftstoffmenge über Biokraftstoffe zur Verfügung gestellt werden. Ab 2015 wird auf eine Treibhausgasminderungsquote umgestellt, so dass durch den Einsatz von Biokraftstoffen die Treibhausgasemissionen ab 2015 um 3 %, ab 2017 um 4,5 % und ab 2020 um 7 % gemindert werden sollen. Es wird im Basisszenario davon ausgegangen, dass der Biokraftstoffanteil im Straßenverkehr auf 10 % im Jahr 2020 steigt und danach konstant bleibt. Bei den übrigen Verkehrsmitteln wird im Basisszenario nicht vom Einsatz von Biokraftstoffen ausgegangen.

Im Luftverkehr gibt es allerdings durchaus Bestrebungen, zukünftig verstärkt Biokraftstoffe einzusetzen.[10] Bevorzugt werden dabei sogenannte „drop-in"-Kraftstoffe, d.h. solche, die den Qualitätsstandard Jet-A1 erfüllen und direkt zum Einsatz kommen können. Ein Anreiz für den Einsatz von Biokraftstoffen im Luftverkehr besteht darin, dass in diesem Fall keine Emissionszertifikate abgegeben werden müssen – d.h. die Emissionen von Biokraftstoffen werden im ETS als Nullemissionen gewertet. In dieser Studie kommen jedoch im Luftverkehr keine Biokraftstoffe zum Einsatz.

Die beschlossenen strengeren Schwefelgrenzwerte ab 2020 führen dazu, dass in der Seeschifffahrt zukünftig nicht mehr (wie bisher) überwiegend Schweröl als Treibstoff eingesetzt werden kann. Aus heutiger Perspektive scheinen zur Erfüllung der Schwefelemissionsstandards in 2020 folgende Optionen denkbar:

- Umstellung auf Destillate mit niedrigem Schwefelgehalt
- Nachrüsten von Schiffen mit Filtern („seawater scrubbing")
- Einsatz von LNG

Im Basisszenario wird angenommen, dass auch im Seegüterverkehr die Abhängigkeit von konventionellen fossilen Kraftstoffen erhalten bleibt, allerdings ab dem Jahr 2020 zu 80 % Destillate mit niedrigerem Schwefelgehalt zum Einsatz kommen.

4.4.2 Emissionsfaktoren fossiler Kraftstoffe

Die in Tabelle 1 dargestellten direkten Emissionsfaktoren für die Verbrennung fossiler Kraftstoffe wurden für die CO_2-Emissionen aus [SCHMIED 2010] und für die übrigen Treibhausgase der Datengrundlage von [REN II] entnommen. Datengrundlage für die Schiffstreibstoffe Schweröl und Destillate ist [IMO 2009].

[10] Beispielsweise wurde der Einsatz von Biokerosin ein halbes Jahr durch Lufthansa in Kooperation mit dem Biokraftstoff-Hersteller Neste Oil getestet.

	g CO_2 eq / MJ (direkt)	g CO_2 eq / MJ (indirekt)		
	2010-2050	2010	2030	2050
Benzin fossil	75,2	16,1	15,0	15,0
Diesel fossil	76,1	14,1	10,2	10,2
Kerosin	79,3	11,0	10,3	10,3
Destillate	74,9	13,5	13,5	13,5
Schweröl	78,3	14,3	14,3	14,3

Tabelle 1: Treibhausgasemissionsfaktoren konventioneller Kraftstoffe

Die indirekten (Well-To-Tank) CO_2- und THG-Emissionsfaktoren für die Bereitstellung fossiler Kraftstoffe wurden ebenfalls aus Renewbility II übernommen; für Schiffstreibstoffe (Schweröl) aus [SULTAN 2010].

Wie in Tabelle 1 ersichtlich wird, sinken die Vorkettenemissionen zwischen 2010 und 2030 je nach Kraftstoff zwischen 5 % und 28 %. Gründe dafür sind eine angenommene Reduktion von Fackelverlusten und diffusen CH_4-Freisetzungen bei der Gewinnung sowie Erhöhungen der Raffinerie-Effizienz. Die Werte beziehen sich auf den deutschen bzw. europäischen Kraftstoffbezug ohne Anteile unkonventioneller Förderung (z.B. Ölschiefer und –sände oder Fracking).

4.4.3 Emissionsfaktoren Biokraftstoffe

Da Biokraftstoffe nicht im Fokus dieser Studie liegen, wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Emissionen die Vorgaben der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV) für die Treibhausgasminderung einhalten, diese aber nicht übertroffen werden.

Mit der am 2. November 2009 in Kraft getretenen Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV) wurden die Anforderungen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (2009/28/EG) an Biokraftstoffe in nationales Recht umgesetzt. Demnach sind für Biokraftstoffe die Treibhausgasemissionen für die gesamte Prozesskette vom Anbau der verwendeten pflanzlichen Rohstoffe bis zur Verbrennung im Fahrzeug zu bilanzieren. Um Biokraftstoffe zu verwenden bzw. beimischen zu können, muss gemäß der Verordnung eine Treibhausgasminderung gegenüber dem Vergleichswert für fossile Kraftstoffe erzielt werden. Dieser wird von der Verordnung momentan auf 83,8 g CO_2eq/MJ festgelegt. Die vorgegebene Minderung beträgt derzeit 35 % und erhöht sich ab 2017 auf 50 %, wobei nach 2016 in Betrieb genommene Anlagen ab 2018 eine Treibhausminderung von 60 % nachweisen müssen.

Von den beim Anbau von Biokraftstoffkulturen möglicherweise infolge von Landnutzungsänderungen entstehenden Emissionen werden dabei von der Verordnung derzeit nur die direkten Landnutzungsänderungen erfasst. Für die momentan kontrovers diskutierte Bilanzierung der Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen durch indirekte Landnutzungsänderungen liegt gegenwärtig weder eine verbindliche Regulierung noch eine übergreifend von allen Akteuren akzeptierte Methodik vor. Ein entsprechender Gesetzesvorschlag seitens der Europäischen Kommission steht seit längerer Zeit aus. Studien im Auftrag der europäischen Kommission (z.B. IFPRI 2011) kommen jedoch zu dem

Ergebnis, dass indirekte Landnutzungsänderungen einen signifikanten Einfluss auf die Klimabilanz von Biokraftstoffen haben und daher die Klimabilanz von Biokraftstoffen negativer ausfällt, als dies die Bewertungsmethodik gemäß Biokraftstoff-NachV abbildet.

Aufgrund der hohen Unsicherheiten wird die Höhe des Effektes von indirekten Landnutzungsänderungen im Rahmen dieser Studie zwar nicht explizit quantifiziert und ist auch nicht in den Treibhausgasemissionsfaktoren in Tabelle 2 enthalten. Stattdessen wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass die Biokraftstoffe den Mindestanforderungen der Biokraftstoff-NachV entsprechen. Im Hauptszenario kommen jedoch Biokraftstoffe unter anderem. vor dem Hintergrund ihres möglicherweise geringeren Beitrags zum Klimaschutz langfristig nicht mehr zum Einsatz.

Die Methodik zur Bilanzierung der Emissionen von Biokraftstoffen wird dabei analog zu [SCHMIED 2010] folgendermaßen festgelegt: Die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen werden mit Null bilanziert, wodurch bei den direkten Emissionsfaktoren die Bindung von CO_2 in der Biomasse angerechnet wird. Die indirekten Emissionsfaktoren enthalten, wie bei konventionellen Kraftstoffen, die beim Anbau der Rohstoffe sowie der Herstellung und Bereitstellung der Biokraftstoffe entstandenen Emissionen. Der Anbau und die Art der verwendeten pflanzlichen Rohstoffe sowie der Herstellungsprozess stellen dabei die dominierenden Einflussgrößen dar.

	direkt [g CO2 eq / MJ]	indirekt [g CO2 eq / MJ]		
	2010-2050	2010	2030	2050
Biodiesel	0,0	54,5	38,6	33,5
Bioethanol	0,0	54,5	38,6	33,5

Tabelle 2: Treibhausgasemissionsfaktoren von Biokraftstoffen

Auf Basis der getroffenen Annahmen ergeben sich die Emissionsfaktoren in Tabelle 2. Demgegenüber wurden in Renewbility II noch wesentlich ambitioniertere Emissionsminderungen angenommen.

4.4.4 Emissionsfaktor Strom

Für die Bestimmung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors besitzen die bei der Stromerzeugung entstehenden Emissionen eine Bedeutung, welche sich bisher vor allem auf den Schienenverkehr beschränken, aber bei einer zunehmenden Anzahl von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb zukünftig noch relevanter werden. Die Treibhausgasfreisetzung ist abhängig vom Primärenergieeinsatz und den Verlusten bei der Stromerzeugung und Stromdistribution, so dass durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien eine Reduktion der Treibhausgasemissionen im Stromsektor zu erwarten ist.

Um für das Basisszenario einen mittleren Emissionsfaktor der Stromerzeugung in Deutschland zu ermitteln, wird auf den Primärenergieträgereinsatz des Ausstiegsszenarios aus den [ENERGIESZENARIEN 2011] zurückgegriffen, wobei in Übereinstimmung mit den Annahmen dieser Studie für den Zeitraum nach 2030 das Szenario II-B der [ENERGIESZENARIEN 2010] verwendet wird. Im Jahr 2050 entspricht dies einem Anteil an erneuerbaren Energien von 81 %.

Für die Bestimmung der Emissionen der einzelnen Kraftwerkstypen werden für die Jahre bis 2030 Emissionsfaktoren aus [GEMIS 4.7] verwendet und es wird die Annahme konstanter Emissionsfaktoren bis zum Jahr 2050 getroffen. Die Verluste im Kraftwerk und in der Stromdistribution bis zur Nutzung des Stroms durch den Endverbraucher werden zudem über Daten des statischen Bundesamtes[11] und der AG Energiebilanzen[12] abgeschätzt.

Der somit ermittelte mittlere Emissionsfaktor der Stromerzeugung sinkt bei Beachtung der Vorkettenemissionen bis zum Jahr 2050 auf 63 g $CO_{2,eq}$/kWh und ist in Tabelle 3 dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass die hier getroffene Unterscheidung zwischen direkten Emissionen (bei Kraftwerkseinsatz) und indirekten Emissionen der Vorketten sich auf die Betrachtung der Stromerzeugung bezieht. Aus Sicht des Verkehrssektors sind die direkten Emissionen Null und alle bei der Stromerzeugung anfallenden Emissionen werden als indirekte Emissionen gewertet.

Emissionsfaktor [g CO_2eq/$kWh_{el,Endenergie}$]

	2010	2020	2030	2040	2050
direkte Emissionen	550	495	270	145	31
indirekte Emissionen	59	47	41	37	32
Emissionen gesamt	609	542	311	183	63

Tabelle 3: Mittlere Emissionsfaktoren der Stromerzeugung in Deutschland – Basisszenario

[11] DESTATIS 2012b
[12] AGEB 2011

4.5 Ergebnisse des Basisszenarios

4.5.1 Verkehrsnachfrage

Auf Basis der oben beschriebenen Annahmen ergibt sich im Basisszenario sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr eine zunächst weiter stark wachsende Verkehrsleistung.

Personenverkehr

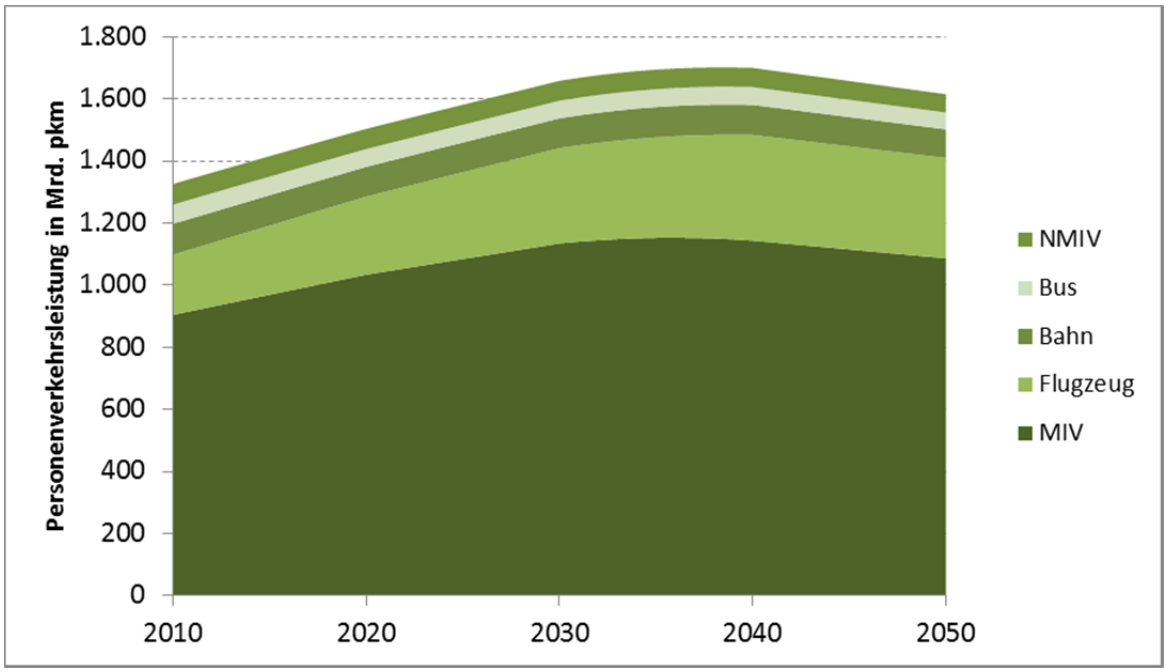

Abbildung 4: Personenverkehrsleistung im Basisszenario nach Verkehrsträger

Die in Abbildung 4 dargestellte Entwicklung des Personenverkehrs (einschließlich Luftverkehr) zeigt einen weiteren Anstieg der Personenverkehrsleistung auf ein Maximum von 1.702 Mrd. Personenkilometer im Jahr 2038. Erst danach überwiegt der Effekt der sinkenden Einwohnerzahl den Einfluss der bis zum Jahr 2040 noch ansteigenden Einwohnerkilometerzahl, sodass die Personenverkehrsleistung bis zum Jahr 2050 auf 1.616 Mrd. pkm wieder leicht zurückgeht. Dabei verzeichnet der Anteil des Luftverkehrs am Modal Split einen deutlichen Zuwachs von 14,6 % im Jahr 2010 auf 20 % im Jahr 2050. Demgegenüber verliert der nicht motorisierte Individualverkehr (NMIV) sowohl absolut gesehen als auch anteilig an Bedeutung und sinkt von 68 Mrd. pkm (2010) auf 59 Mrd. pkm (2050). Ähnliches gilt für den öffentlichen Bus- und Bahnverkehr, deren Anteil am Modal Split von 12,1 % auf 9,1 % sinkt. Der motorisierte Individualverkehr (MIV) nimmt auf 1.087 Mrd. pkm im Jahr 2050 zu.

Güterverkehr

Noch ausgeprägter als im Personenverkehr ist das Wachstum der Verkehrsleistung im Güterverkehr (siehe Abbildung 5). Insbesondere die Annahmen einer zunehmenden Globalisierung und eines weiteren Wirtschaftswachstums trotz rückläufiger Bevölkerungszahl führen zu einer Verdopplung der Güterverkehrsleistung auf Straße, Schiene, Binnenschiff und Flugzeug von 623 Mrd. tkm (2010) auf 1.270 Mrd. tkm (2050).

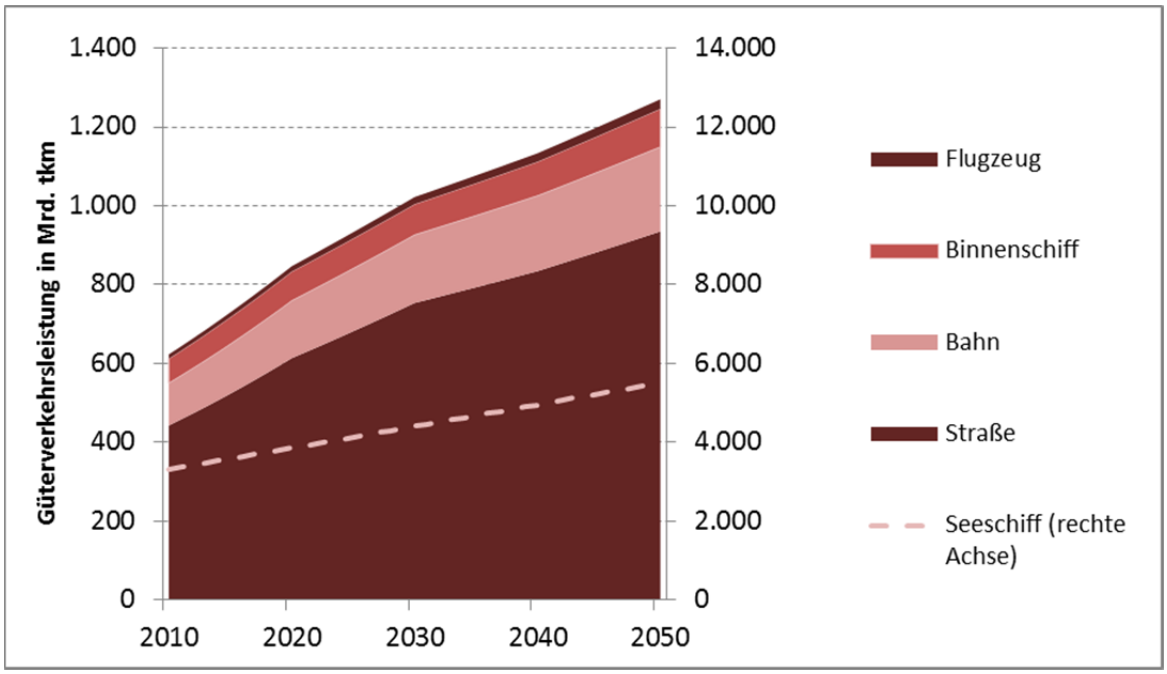

Abbildung 5: Güterverkehrsleistung im Basisszenario nach Verkehrsträger

Der Deutschland zugerechnete Seeverkehr wächst um 66 % von 3.130 Mrd. tkm auf 5.508 Mrd. tkm. Für die Einordnung des Szenarios im Seeverkehr sollten allerdings die in Abschnitt 4.2.4 erwähnten methodischen Besonderheiten berücksichtigt werden.

4.5.2 Endenergiebedarf

Im Jahr 2050 liegt der Endenergiebedarf des Verkehrs (ohne Seeschifffahrt) mit 2.412 PJ um 5,5 % unter dem Energiebedarf im Jahr 2010 (Abbildung 6). Das Verkehrsleistungswachstum kann durch die zunehmende Effizienz der Fahrzeuge teilweise kompensiert werden, was ab dem Jahr 2020 zu einem langsam sinkenden Endenergiebedarf im Verkehrssektor führt. Allerdings nimmt der Endenergiebedarf des Güterverkehrs aufgrund der hohen Wachstumsraten weiter deutlich zu und liegt im Jahr 2050 bei 1.058 PJ. Fast 80 % des Endenergiebedarfs im Güterverkehr entfallen dabei auf den Straßenverkehr (845 PJ). Der Anteil des Güterverkehrs am Endenergiebedarf nimmt zwischen 2010 und 2050 von 28 % auf 44 % zu.

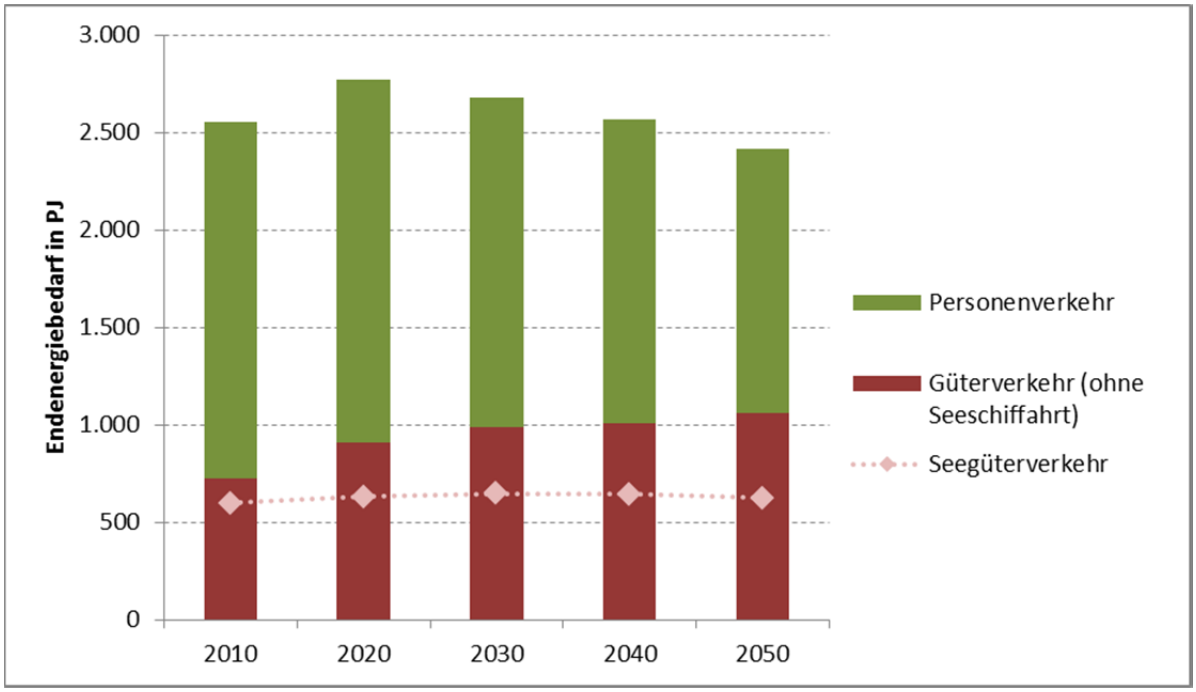

Abbildung 6: Energiebedarf im Basisszenario nach Verkehrsart

Leichte Zuwächse verzeichnet auch der Seegüterverkehr (um 26 PJ auf 625 PJ im Jahr 2050). Die zunehmende Effizienzentwicklung bei Seeschiffen führt allerdings dazu, dass der Anstieg des Endenergiebedarfs wesentlich geringer ausfällt als derjenige der Verkehrsleistung.

Ein Vergleich von Seegüterverkehr und den übrigen Verkehrsträgern ist auf Grund der unterschiedlichen Methodik nur bedingt aussagekräftig. Bezogen auf den gesamten Endenergiebedarf wächst der Anteil des Seegüterverkehrs im Zeitverlauf leicht von 19 % im Jahr 2010 auf 20,6 % im Jahr 2050.

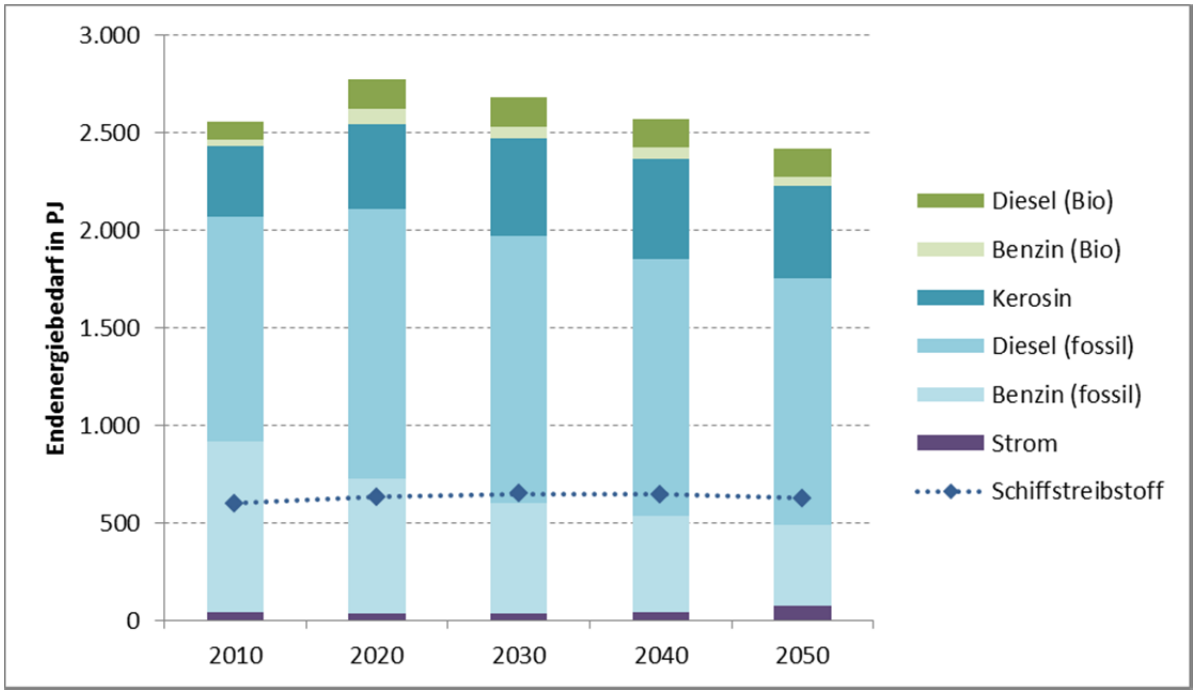

Abbildung 7: Energiebedarf im Basisszenario nach Energieträgern

Abbildung 7 macht die anhaltende Dominanz der konventionellen, fossilen Kraftstoffe im Basisszenario deutlich. Deren Anteil (ohne Schweröl) sinkt nur leicht von 94 % in 2010 auf 89 % in 2050. Strom hat demgegenüber nur einen geringen Anteil am Energiebedarf, verdoppelt sich jedoch gegenüber 2010 nahezu und liegt im Jahr 2050 bei 72 PJ. Dies ist auf die Stromnachfrage der elektrischen Pkw in Höhe von 41 PJ im Jahr 2050 zurückzuführen. Der Einsatz von Biokraftstoffen liegt im Jahr 2050 bei 187 PJ und damit leicht über dem Wert von 121 PJ im Jahr 2010.

Das Ziel der Bundesregierung, den Endenergiebedarf im Verkehrssektor bis 2050 um 40 % gegenüber 1990 zu senken, wird im Basisszenario damit deutlich verfehlt: Der Endenergieverbrauch im Verkehr lag nach der AG Energiebilanzen (ohne Schiffstreibstoffe) lag im Jahr 1990 bei 2.379 PJ und müsste, um das Ziel zu erreichen, demnach auf 1.427 PJ sinken. Im Basisszenario steigt jedoch der Endenergiebedarf gegenüber 1990 dagegen sogar noch leicht an (um ca. 1 %).

4.5.3 Treibhausgasemissionen

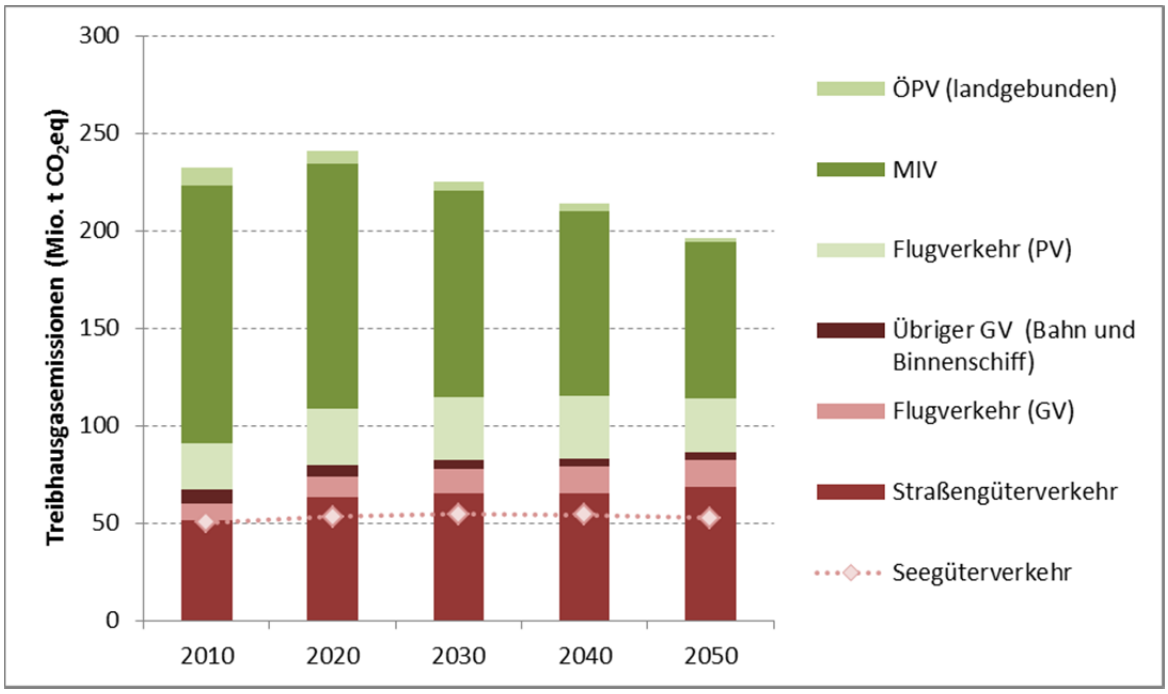

Abbildung 8: Treibhausgasemissionen des Verkehrs im Basisszenario

Bei den Treibhausgasemissionen des Basisszenarios zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim Endenergiebedarf. Gegenüber 2010 sinken die Treibhausgasemissionen (ohne Seeschifffahrt) bis 2050 um 15 % auf 196 Mio. t CO_2-eq. Dies ist vor allem auf die sinkenden Emissionen im Personenverkehr zurückzuführen, wogegen die Emissionen im Güterverkehr in diesem Zeitraum sogar noch zunehmen.

Im Vergleich zum Endenergiebedarf, der bis zum Jahr 2050 um 5,5 % zurückgeht, ist die stärkere Minderung der Treibhausgasemissionen im selben Zeitraum auf den Einsatz von Biokraftstoffen und den direkten Einsatz von Strom bei den elektrisch betriebenen Pkw zurückzuführen.

5 Hauptszenario

5.1 Einleitung

Das Hauptszenario soll einen möglichen Pfad zu einem treibhausgasneutralen Verkehrssektor bis zum Jahr 2050 aufzeigen. Dafür werden zunächst in Abschnitt 5.2 Maßnahmen zur Förderung dieses Ziels dargestellt und, soweit möglich, quantifiziert. Anschließend werden die wesentlichen Charakteristika des Hauptszenarios bezüglich Nachfrage (Abschnitt 5.3), Technologien (Abschnitt 5.4) und Kraftstoffen (Abschnitt 5.5) beschrieben, wobei ein Großteil der Annahmen auf den hinterlegten Maßnahmen basieren.

Bei der Quantifizierung der Wirkung der Maßnahmen auf Verkehrsnachfrage und Modal Split wird ein eher konservatives Vorgehen gewählt, um die Effekte nicht zu überschätzen. Dies sollte aber nicht dahingehend interpretiert werden, dass die genannten Maßnahmen für die Transformation des Verkehrssektors nicht relevant seien.

Die zukünftige technologische Entwicklung bei Antrieben und alternativen Kraftstoffen ist ebenso wie die der Verkehrsnachfrage mit großer Unsicherheit verbunden. Im vorliegenden Szenario basiert der treibhausgasneutrale Verkehrssektor im Jahr 2050 auf elektrischen Antrieben sowie stromerzeugten Flüssigkraftstoffen. Die derzeit oft diskutierte Nutzung von stromgeneriertem Methan im Verkehrssektor wird im Hauptszenario nicht berücksichtigt, da die Herstellung von Methan über eine ähnliche Prozesskette wie die Produktion von synthetischen Flüssigkraftstoffen verläuft. Da für Flüssigkraftstoffe allerdings bereits eine Infrastruktur für den Verkehrsbereich zur Verfügung steht, wird der Pfad der synthetischen Flüssigkraftstoffe dem des stromgenerierten Methans im Hauptszenario vorgezogen.

Bei der Antriebsentwicklung wird davon ausgegangen, dass sich batterieelektrische Fahrzeuge insbesondere im Pkw-Bereich, bei leichten Nutzfahrzeugen und bei Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis zu 12 Tonnen durchsetzen. In einer Sensitivität „Brennstoffzelle“ werden für diese Fahrzeugklassen zusätzlich Brennstoffzellenfahrzeuge berücksichtigt, um die Unsicherheit bezüglich des Anteils von Wasserstoff im Verkehrssektor abzubilden. Damit die übrigen verbrennungsmotorischen Fahrzeuge dem Ziel eines treibhausgasneutralen Verkehrssektors entsprechen, werden diese im Hauptszenario mit synthetischen Flüssigkraftstoffen betrieben, deren Herstellung über erneuerbaren Strom und atmosphärisches CO_2 stattfindet (siehe Abschnitt 5.5.3). Im Schiff- und Luftverkehr wird im Hauptszenario im Gegensatz zum Straßenverkehr von keiner Verschiebung zu alternativen Antrieben ausgegangen.

Der hohe Anteil synthetischer Flüssigkraftstoffe im Hauptszenario setzt eine sehr ambitionierte technologische Entwicklung voraus. Ob die für dieses Szenario benötigte Menge an synthetischen Flüssigkraftstoffen und die dafür nötigen Anlagen tatsächlich rechtzeitig zur Verfügung stehen, kann nicht mit Sicherheit beantwortet werden. Wohl aber kann abgeschätzt werden, wie hoch die dafür benötigte Menge an erneuerbarem Strom unter den getroffenen Annahmen wäre, was wiederum der Zielsetzung der Studie entspricht.

5.2 Maßnahmen zur Förderung eines treibhausgasneutralen Verkehrssektors

Damit die Zielvorgabe eines treibhausgasneutralen Verkehrssektors realisiert werden kann, ist eine Vielzahl von Maßnahmen innerhalb und außerhalb des Verkehrssektors nötig. Einerseits müssen Anreize für technologische Innovationen gesetzt werden; andererseits sind auch über technologische Lösungen hinausgehende Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung ein wesentlicher Beitrag zur Zielerreichung.

Verkehrsvermeidung ist die direkteste Möglichkeit zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Verkehr zu vermeiden und Mobilität zu ermöglichen müssen dabei nicht notwendigerweise gegensätzliche Ziele sein. Definiert man die „potentielle Mobilität" als die Anzahl der in einem gewissen Aktionsradius erreichbaren Ziele zur Erfüllung der Bedürfnisse wie Arbeit, Einkauf, Freizeit, so kann diese auch trotz einer sinkenden Einwohnerkilometerzahl zunehmen. Ein Beispiel dafür sind Siedlungsstrukturen, die Arbeiten, Einkaufen und Freizeit auf aggregiertem Raum zusammenbringen und dadurch Wege verkürzen.

Verkehrsverlagerung auf umweltgerechte Verkehrsträger ist nach der Verkehrsvermeidung der zweite wichtige Baustein eines nachhaltigen Verkehrs. Neben der Reduktion der Treibhausgasemissionen sind – besonders bei Verlagerung auf den nichtmotorisierten Individualverkehr (NMIV) – auch positive Nebeneffekte zu erwarten (z.B. durch Reduktion von Lärm und Flächenverbrauch durch Pkw-Stellplätze).

Der dritte Baustein ist die **umweltverträgliche Gestaltung des verbleibenden Verkehrs**. Darunter ist vor allem die Effizienzsteigerung der eingesetzten Fahrzeuge als auch der Einsatz von weniger CO_2-intensiven Kraftstoffen zu verstehen.

In diesem Abschnitt werden Maßnahmen zur Förderung eines treibhausgasneutralen Verkehrs beschrieben, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird. Bei der Auswahl der Maßnahmen wurde jedoch so gut wie möglich darauf geachtet, dass Mindestanforderungen hinsichtlich weiterer ökologischer, ökonomischer und sozialer Effekte erfüllt werden. Grundsätzlich liegt der Schwerpunkt des Szenarios auf einer Technik-orientierten Lösung der Zielstellung eines treibhausgasneutralen Verkehrssektors, da im Rahmen des Projekts für die Bewertung verkehrsvermeidender und -verlagernder Maßnahmen nur grobe Abschätzungen möglich waren. Die folgenden ordnungsrechtlichen, ökonomischen und flankierenden Maßnahmen wurden im Hauptszenario berücksichtigt und entsprechend der dargestellten Wirkungsweise implementiert.

5.2.1 Ordnungsrechtliche Maßnahmen

Verschärfung der Emissionsstandards

Maßnahme: Die CO_2-Emissionsstandards für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) werden in 2020 im Vergleich zum Basisszenario verschärft. Weiterhin wird von einer CO_2-Emissionsregulierung von schweren Nutzfahrzeugen (SNF) ausgegangen. Ein entsprechender Prozess auf EU-Ebene hat bereits begonnen und eine entsprechende Regulierung von SNF ist zu erwarten.

Wirkung: Bei Pkw und LNF ist das Erreichen der Zielgröße des CO_2-Emissionsstandard allein durch technische Maßnahmen an konventionellen Fahrzeugen nicht realisierbar. Es

wird ein signifikant höherer Anteil an Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen benötigt werden. Bei SNF führt die Einführung von CO_2-Emissionsstandards zu einer gegenüber der Basis ambitionierteren Effizienzentwicklung konventioneller Fahrzeuge.

Tempolimit auf Autobahnen

Maßnahme: Ab 2015 wird ein Tempolimit von 120 km/h auf Autobahnen eingeführt.

Wirkung: Die Maßnahme führt zu einer Reduktion der durchschnittlichen Verbräuche von Pkw auf Autobahnabschnitten ohne bisher existierende Geschwindigkeitsbeschränkungen. Diese Abschnitte machen laut Bundesanstalt für Straßenwesen[13] 65,5 % der Autobahnkilometer aus. Basierend auf [TRL 2009] und unter der Annahme einer Ausgangsgeschwindigkeit von 140 km/h ergibt sich dadurch abhängig von der Größenklasse eine Verbrauchsreduktion von durchschnittlich 13 % auf den Autobahnabschnitten ohne existierende Geschwindigkeitsbegrenzungen. Die Verbrauchsreduktion wird auf alle konventionellen Pkw angewendet.

Emissionsarme Innenstädte ab 2025

Maßnahme: In mehreren Etappen werden in größeren Städten emissionsarme Zonen geschaffen. Dazu wird bei Umweltzonen eine zusätzliche Stufe „U50“ eingeführt, welche nur noch mit Fahrzeugen befahren werden darf, deren CO_2-Emissionen unter 50 g CO_2/km liegen. Zusätzlich werden verkehrsberuhigte und autofreie Zonen ausgedehnt. Ab 2025 sind alle heute bestehenden Umweltzonen U50-Zonen.

Diese können nur mit Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybridfahrzeugen befahren werden. Im Weißbuch der EU[14] werden „Emissionsfreie Innenstädte“ als Maßnahme vorgeschlagen. Um auch Plug-In-Hybridfahrzeuge zu fördern, ist die „U50-Zone“ besser geeignet. Bei Range-Extendern (EREV) lässt der Betrieb im Auslegungspunkt des Verbrennungsmotors eine effiziente Schadstoff- und Emissionssteuerung bewerkstelligen, wodurch die Maßnahme einen wesentlichen Beitrag zur Schadstoffminderung leisten dürfte. Heutige Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV) lassen sich teilweise bereits auf einen rein elektrischen Betrieb für Städte einstellen.

Wirkung: Angenommen wird, dass diese Maßnahme – gemeinsam mit der Reform der Dienstwagensteuer (s.u.) – Effekte auf die Neuzulassungsstruktur der Pkw hat. Auch alle Fahrzeuge, die im innerstädtischen Lieferverkehr eingesetzt werden, sind von der Maßnahme betroffen. Daher ist auch bei leichten Nutzfahrzeugen und kleinen Lkw ein höherer Anteil an Fahrzeugen mit Elektroantrieb zu erwarten.

5.2.2 Ökonomische Maßnahmen

Erhöhung der Kraftstoffsteuer

Maßnahme: Die Kraftstoffsteuer wird im Jahr 2015 auf eine Bestimmung nach CO_2-Intensität und Energiegehalt des Kraftstoffes umgestellt. In der Bestimmung der CO_2-Intensität werden

[13] BAST 2010.
[14] WEISSBUCH 2011

die Vorketten der Emissionen mit berücksichtigt, um die geringere Treibhausgasintensität von synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien und elektrisch angetriebene Fahrzeuge steuerlich zu fördern. Die Kraftstoffsteuern werden dabei so ausgestaltet, dass sich die durchschnittlichen Kilometerkosten im MIV gegenüber der Basis um 10% erhöhen. Die dafür erforderliche Höhe der Steuer hängt demnach von der Preisentwicklung ab.

Wirkung: Für den Güterverkehr erfolgt die Quantifizierung gemeinsam mit den anderen Maßnahmen (siehe Abschnitt 5.3.2). Um im motorisierten Individualverkehr die Wirkung der Preisänderungen auf die Nachfrage zu quantifizieren, wird wie in [UBA 2010a] eine Preiselastizität von -0,25 angenommen. Dadurch reduziert sich die Personenverkehrsnachfrage im MIV um 2,4 % gegenüber der Basis.

Abschaffung der Entfernungspauschale

Maßnahme: Die Entfernungspauschale wird zum 1.1.2015 abgeschafft.

Wirkung: Die Quantifizierung erfolgt mittels Auswertung der Längen der Arbeitswege aus [MID 2008] und in Anlehnung an die Methodik aus [UBA 2010a]. Angenommen wird, dass der Wegfall der Entfernungspauschale die Attraktivität von näher zum Arbeitsplatz gelegenen Wohnorten erhöht. Folgende Annahmen werden dazu getroffen:

- Jährlich ziehen 6 % der Arbeitnehmer um.
- Zur Vereinfachung wird die Distanz zum Arbeitsplatz in die Kategorien "nah" und "fern", <7 km bzw. >=7 km, unterteilt.
- 10 % der Arbeitnehmer berücksichtigen ab 2015 die Entfernung und ziehen in den Nahbereich (< 7 km) ihres Arbeitsplatzes.

Im Ergebnis reduzieren sich die durchschnittlichen Wegelängen zur Arbeit bis 2050 um 16 %.

Änderung der Besteuerung von Firmenwagen

Maßnahme: Die pauschale Besteuerung von Firmenwagen wird zum 1.1.2015 reformiert; bestehend aus zwei Komponenten:

- Die Absetzbarkeit von Firmenwagen durch Unternehmen wird durch die Einführung eines Klimafaktors an die CO_2-Emissionen gekoppelt.
- Die bestehende pauschale Besteuerung von Dienstwagen wird ersetzt durch eine „kombinierte Privatnutzungspauschale“, welche von der Fahrleistung und den Emissionen abhängt.

Die Ausgestaltung orientiert sich an den Vorschlägen der aktuellen Studie zur Besteuerung von Firmenwagen [FIFO 2011].

Wirkung: Die Maßnahme wirkt zusammen mit der Maßnahme „Emissionsarme Innenstädte“ auf die Neuzulassungsstruktur von Pkw. Effizientere Pkw und insbesondere Elektro- bzw. Plug-In-Hybridfahrzeuge werden dadurch gefördert.

Ausweitung und Weiterentwicklung der Lkw-Maut

Maßnahme: Ab 2015 wird die Lkw-Maut um Schadstoff- und Lärmkosten ergänzt sowie auf alle Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht ab 3,5 Tonnen und auf das gesamte Straßennetz ausgedehnt.

Wirkung: Gemeinsam mit den anderen Maßnahmen im Güterverkehr führt diese Maßnahme unter anderem zu einem Modal Shift vom durch die zusätzliche Maut betroffenen Straßengüterverkehr auf die Schiene.

Änderung der Besteuerung des Luftverkehrs

Maßnahme: Im Luftverkehr wird die Kerosinsteuer auf innerdeutsche Flüge eingeführt (vgl. [PACHE 2005]) und internationale, von Deutschland abgehende Flüge werden mehrwertsteuerpflichtig. Für die Besteuerung der internationalen Flüge müsste allerdings eine Neuregelung des Chicagoer Abkommens beschlossen werden.

Wirkung: Die Maßnahme wirkt im Personenverkehr auf die Nachfrage sowie auf die Effizienzentwicklung. Es wird angenommen, dass sich die Nutzerkosten um 19 % gegenüber dem Basisszenario erhöhen, was zu einer Nachfrageverminderung führt. Dies wird mit einer isoelastischen Preis-Nachfrage-Funktion und auf Basis von [POLITIKSZENARIEN V] mit einer Preiselastizität von -0,375 abgebildet. Relativ zur Basis reduziert sich die Verkehrsnachfrage im Personenverkehr bei internationalen Flügen demnach um 6,3 %.

Durch den höheren Preisdruck durch die erwähnten Maßnahmen wird außerdem das ICAO-Effizienzziel von 2 % pro Jahr im Hauptszenario sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr erreicht. Im Basisszenario beträgt die Effizienzsteigerung demgegenüber nur 0,9 %.

5.2.3 Flankierende Maßnahmen

Infrastrukturmaßnahmen zur Förderung von Fahrrad- und Fußverkehr

Maßnahme: Zur Förderung von Fahrrad- und Fußverkehr wird ein Bündel von Maßnahmen umgesetzt. Dazu zählen:

- Ausbau des Radverkehrsnetzes (Fahrradstraßen und Radschnellwege),
- Einführung von Fahrradstationen mit bewachten Fahrradabstellplätzen, Fahrradverleih (inkl. Pedelecs) und Fahrradreparaturdienst an Infrastrukturknotenpunkten (z.B. größeren Bahnhöfen),
- flächendeckende qualitativ hochwertige Fahrradständer nach dem Anlehnprinzip,
- vermehrte Einführung von verkehrsberuhigten Zonen und Fußgängerzonen.

Wirkung: Mittels Auswertung der Wegelängen aus [MID 2008] wird ein Verlagerungspotenzial vom MIV auf den NMIV bestimmt. Wege bis zu einer Länge von 7 Kilometern werden teilweise vom Pkw auf Fahrrad / Fußverkehr verlagert. In Abhängigkeit der Entfernungskategorie liegt das Verlagerungspotenzial zwischen 30 % (sehr kurze Strecken) und 5 %. Bis 2050 wird dieses Potenzial vollständig ausgeschöpft. Insgesamt können 2 % der MIV-Verkehrsnachfrage auf das Fahrrad und/oder auf den Fußverkehr verlagert werden.

Kapazitätssteigerung und Ausbau des Schienennetzes

Maßnahme:

- kurzfristig: betriebliche Maßnahmen (z.B. Optimierung der Leit- und Sicherungstechnik, Blockverdichtungen, Harmonisierung der Geschwindigkeiten) und

kleinere infrastrukturelle Maßnahmen (Elektrifizierung, neue Nebengleise, Optimierung der Knoten).

- mittelfristig: Schaffung zusätzlicher Trassen zur Beseitigung der Engpässe (insbesondere im Güterverkehr und zur Sicherstellung der Seehafenhinterlandanbindung); dafür Erhöhung des Investitionsvolumens und Ausrichtung des Bedarfsplans Schiene an der Beseitigung der Engpässe.
- langfristig: frühzeitige Entwicklung eines Schienenkonzepts mit Zeithorizont 2050.

Wirkung: Gemeinsam mit den anderen Maßnahmen im Güterverkehr wirkt diese Maßnahme unterstützend auf die Verlagerung von Transporten auf die Schiene.

Förderung regionaler Wirtschaftskreisläufe

Maßnahme: Hierbei handelt es sich um ein Maßnahmenpaket zur Förderung regionaler Wirtschaftskreisläufe, um den Trend der steigenden Transportweiten zu stoppen, z.B.

- Einführung einer verpflichtenden Verkehrsauswirkungsprüfung bei der Wirtschaftsförderung,
- Einführung von Mindeststandards für das Labelling regionaler Produkte, um Regionalität für den Verbraucher transparent und nachprüfbar zu gewährleisten.

Wirkung: Diese Maßnahme führt zu einer Verkürzung der durchschnittlichen Transportweiten im Güterverkehr.

Technologieförderung für stromerzeugte Kraftstoffe

Maßnahme: Förderung von Forschung & Entwicklung der Produktion stromgenerierter Kraftstoffe.

Wirkung: Diese Maßnahme unterstützt die Einführung stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehrssektor.

5.3 Wirkung der Maßnahmen auf die Verkehrsnachfrage

5.3.1 Personenverkehr

Verkehrsvermeidend wirkt die Abschaffung der Entfernungspauschale und die Anpassung der Kraftstoffsteuern. Tendenziell haben auch weitere Maßnahmen (Tempolimit, Dienstwagensteuer) eine verkehrsvermeidende Wirkung, was jedoch hier aufgrund nicht vorgenommener Quantifizierung nicht explizit berücksichtigt wird. Verkehrsverlagernd wirken die Maßnahmen zur Förderung des Fahrrad- und Fußverkehrs.

5.3.2 Güterverkehr

Wirkung auf den Güterverkehr haben die Maßnahmen „Förderung regionaler Wirtschaftskreisläufe“, „Ausweitung der Lkw-Maut“ sowie „Erhöhung der Kraftstoffsteuer“. Angenommen werden zwei wesentliche Effekte auf die Verkehrsnachfrage. Zum einen erreichen die Transportweiten ihr Maximum schon in 2020 statt in 2030. Zum anderen verändert sich der Modal Split: Im Zeitraum 2015-2030 nimmt der Anteil des Schienengüterverkehrs am verkehrsleistungsbezogenen Modal Split zu Lasten des

Straßengüterverkehrs zu und liegt im Jahr 2030 um 5 Prozentpunkte über dem Basisszenario.

5.3.3 Luftverkehr

Im Luftverkehr wirken sich die zusätzlichen Steuern nachfragemindernd aus, so dass sich die Verkehrsnachfrage im Hauptszenario gegenüber der Basis um 6,3 % reduziert.

5.3.4 Seeverkehr

Auf eine Quantifizierung von Maßnahmen für die Erreichung von Klimazielen im Seeverkehr wird im Rahmen dieser Studie verzichtet. Entsprechende Maßnahmen sollten, so weit möglich, auf internationaler oder mindestens EU-Ebene getroffen werden. Dabei darf die Bewertung von Maßnahmen im Seeverkehr nicht isoliert von den übrigen Verkehrsträgern erfolgen. Regional begrenzte Klimaschutzmaßnahmen können beispielsweise dazu führen, dass nicht betroffene Häfen stärker frequentiert werden und sich dadurch auch die Seehafenhinterlandverkehre entsprechend verlagern, was im ungünstigen Fall zu einer Verlängerung der Transportweiten führen kann.

Ein aus Klimasicht positiver Nebeneffekt eines treibhausgasneutralen Deutschlands auf den durch Deutschland verursachten Seeverkehr ist die verminderte Abhängigkeit von Kohle- und Ölimporten. Der Anteil der Gütergruppe 02 - Kohle, rohes Erdöl und Erdgas - am Güterumschlag in deutschen Häfen lag im März 2012 immerhin bei 14,2 %[15]. Wegen der globalen Zurechnungsmethodik wird dieser Effekt im Hauptszenario jedoch nicht quantifiziert.

5.4 Technologie- und Effizienzentwicklung

Die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Maßnahmen führen im Hauptszenario vor allem zu einem höheren Anteil alternativer Antriebe bei Pkw und kleinen bis mittleren Lkw. Durch die Emissionsstandards bei Lkw und leichten Nutzfahrzeugen kommt es im Straßengüterverkehr aber auch zu einer gegenüber dem Basisszenario ambitionierteren Effizienzentwicklung im Schwerlastverkehr (siehe Abschnitt 5.4.2).

5.4.1 Pkw

Neuzulassungsstruktur

Folgende Maßnahmen beeinflussen gegenüber dem Basisszenario die Neuzulassungsstruktur der Pkw:

- ab 2015: Änderung der Besteuerung von Firmenwagen. Die Beschaffung von emissionsarmen Fahrzeugen und insbesondere Plug-In-Hybridfahrzeugen wird dadurch steuerlich begünstigt.
- ab 2015: Umstellung der Kraftstoffsteuern auf eine CO_2-basierte Bemessungsgrundlage.

[15] DESTATIS 2012c

- ab 2020: Verschärfung der CO_2-Emissionsstandards.
- ab 2025: emissionsarme Innenstädte.

Durch die genannten Maßnahmen erfolgt gegenüber der Basis eine frühere Technologiediffusion von Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybridfahrzeugen. Weiter wird davon ausgegangen, dass zur Erreichung des niedrigen Emissionsstandards ab 2020 eine starke Hybridisierung auch bei konventionellen Pkw nötig ist. Angenommen wird, dass dadurch die konventionellen Pkw bei den Anschaffungskosten kaum noch einen Kostenvorteil gegenüber Plug-In-Hybridfahrzeugen haben und daher der Anteil konventioneller Pkw zu Gunsten der Plug-In-Hybridfahrzeuge stark zurückgeht. Zusätzliche Attraktivität gewinnt die Anschaffung eines Autos mit Elektroantrieb für den Nutzer durch die erhöhten Kraftstoffpreise aufgrund der veränderten Kraftstoff- und Energiebesteuerung. Diese Maßnahme führt auch dazu, dass durch die damit einhergehende höhere Dieselbesteuerung der Anteil der Fahrzeuge mit Dieselantrieb an den Neuzulassungen sinkt.

Für die Ermittlung einer Neuzulassungsstruktur von batterieelektrischen und Plug-In-Hybridfahrzeugen werden aus [OPTUM 2011] Annahmen zu Nutzerpotenzialen alternativer Antriebe abgeleitet. Angenommen wird, dass Fortschritte in der Batterietechnologie zu einer Reichweite von 250 km führen, wodurch sich in 2050 bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen ein Maximalpotenzial von 23 % (klein) bzw. 12 % (mittel) an den Neuzulassungen ergibt. Plug-In-Hybridfahrzeuge besitzen keine Nutzungsbeschränkung bezüglich Reichweite wie batterieelektrische Fahrzeuge. Ebenfalls werden sich die Kosten im Vergleich zu stark hybridisierten, konventionellen Fahrzeugen vermutlich nur unwesentlich unterscheiden. Daher ist davon auszugehen, dass das Maximalpotenzial der Plug-In-Hybridfahrzeuge nicht begrenzt ist.

Die Angebotsseite wird berücksichtigt, indem die Technologiediffusion der alternativen Antriebe mittels einer im Rahmen von OPTUM ermittelten Gompertz-Wachstumskurve (S-förmiger Verlauf) abgebildet wird. Diese gibt an, welcher Anteil des Maximalpotenzials im Markt erreicht wird. Im Jahr 2050 liegt dieser Wert bei 93 %. Daraus ergibt sich, dass nicht alle neu zugelassene Fahrzeuge batterieelektrische oder Plug-In-Hybridfahrzeuge sind. Der Neuzulassungsanteil konventioneller Fahrzeuge beträgt demnach im Jahr 2050 7 %.

	Pkw klein			
	Elektro	Hybrid	Brennstoffzelle	konventionell
2010	0%	0%	0%	100%
2020	3%	9%	0%	88%
2030	12%	39%	0%	49%
2040	18%	62%	0%	20%
2050	21%	72%	0%	7%

	Pkw mittel			
	Elektro	Hybrid	Brennstoffzelle	konventionell
2010	0%	0%	0%	100%
2020	2%	11%	0%	88%
2030	6%	44%	0%	49%
2040	10%	70%	0%	20%
2050	12%	81%	0%	7%

	Pkw groß			
	Elektro	Hybrid	Brennstoffzelle	konventionell
2010	0%	0%	0%	100%
2020	0%	12%	0%	88%
2030	0%	51%	0%	49%
2040	0%	80%	0%	20%
2050	0%	93%	0%	7%

Abbildung 9: Neuzulassungsstruktur Pkw im Hauptszenario

Effizienzentwicklung

Es wird davon ausgegangen, dass die verschärften Emissionsstandards nicht durch eine ambitionierte Entwicklung bei den konventionellen Fahrzeugen eingehalten werden, sondern – unterstützt durch die Anreize auf der Nachfrageseite – durch einen höheren Anteil an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.

Die Effizienzentwicklung der konventionellen Fahrzeuge orientiert sich daher an derjenigen des Basisszenarios. Ein Unterschied besteht allerdings darin, dass durch die Einführung des Tempolimits auf Autobahnen die Verbräuche der konventionellen Fahrzeuge ab dem Jahr 2015 um 3 % niedriger ausfallen, was durch einen gegenüber der Basis entsprechend reduzierten Realaufschlag auf die NEFZ-Werte umgesetzt wird.

5.4.2 Lkw und leichte Nutzfahrzeuge

Neuzulassungsstruktur

Im Hauptszenario kommen neben den konventionellen Fahrzeugen auch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben zum Einsatz. Hauptgründe dafür sind die im Vergleich zum

Basisszenario eingeführte bzw. verschärfte CO_2-Emissionsregulierung sowie die Einführung emissionsarmer Innenstadtzonen ab 2025.

Zur Bestimmung einer Neuzulassungsstruktur wird dasselbe Vorgehen wie bei Pkw gewählt. Nach Festlegung eines Maximalpotenzials wird die Neuzulassungsstruktur der Fahrzeuge im Straßengüterverkehr über eine Technologiediffusionskurve abgeleitet.

Studien wie [SAFARIANOVA 2009] und [NRC 2008] weisen darauf hin, dass bei großen Lkw alternative Antriebsoptionen (vollelektrisch, Plug-In-Hybrid, Brennstoffzelle) technologiebedingt auch langfristig keine großen Marktanteile erreichen werden. Da die notwendige Antriebs- und Speichertechnologie in Bezug auf das Gewicht und das Volumen bei alternativen Antriebstechnologien bei großen Lkw zu stark ins Gewicht fallen und somit die Beladungsmöglichkeiten dieser Fahrzeuge reduzieren würde, wird im Hauptszenario für Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 t bis 2050 von rein konventionellen Fahrzeugen ausgegangen, die mit synthetischen Flüssigkraftstoffen angetrieben werden.

Für kleinere Lkw wird in 2050 von einem Maximalpotenzial an Plug-In-Hybridfahrzeugen von 100 % ausgegangen, da zur Einhaltung der CO_2-Emissionsstandards eine Hybridisierung der Fahrzeuge stattfinden wird und somit kostenmäßig kein großer Unterschied zwischen Plug-In-Hybridfahrzeugen und konventionellen Hybrid-Lkw besteht. Zudem besteht durch die Maßnahme der emissionsarmen Innenstadtzonen die Notwendigkeit, für die Zulieferverkehre in Städten Fahrzeuge mit der Möglichkeit zum Elektrobetrieb anzuschaffen.

Leichte Nutzfahrzeuge besitzen bei regelmäßigen Nutzungsprofilen (z.B. Kurierdienste) das Potenzial, vollelektrisch betrieben zu werden. Daher wird auf Basis von [KLOESS 2011] ein Maximalpotenzial von 20 % angenommen. Die Markteinführung startet 2015. Bei Plug-In-Hybridfahrzeugen gibt es dagegen theoretisch keine Nutzungsrestriktionen (Reichweite etc.).

Effizienzentwicklung

Durch die Einführung einer CO_2-Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge wird von einer ambitionierten Effizienzentwicklung ausgegangen. Diese orientiert sich für konventionelle Fahrzeuge am technisch maximal möglichen Effizienzszenario gemäß [NRC 2010] und liegt mit einer durchschnittlichen Effizienzsteigerung von 50 % bis 2050 deutlich über der Effizienzentwicklung des Basisszenarios.

Bei Lkw bis zu einem zulässigen Gesamtgewicht von 12 t werden für die Bestimmung der Energieverbräuche von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben Daten aus [SULTAN 2010] genutzt, indem die dortigen relativen Effizienzvorteile und -entwicklungen von alternativen gegenüber konventionellen Antrieben im Zeitraum 2010-2050 auf die in dieser Studie verwendeten Diesel-Referenzfahrzeuge angewendet werden.

5.4.3 Flugzeuge

Angenommen wird, dass das ICAO-Ziel der jährlichen Effizienzsteigerung um 2 % auf Grund des durch die Kerosinsteuer entstehenden Preisdruckes realisiert wird. Über einen Zeitraum von 40 Jahren entspricht dies einer Reduktion von über 60 %. Vom Einsatz alternativer Antriebe wird im Flugverkehr allerdings nicht ausgegangen.

5.4.4 Seeschiffe

Im Bereich des Seeverkehrs wird, wie schon in Abschnitt 4.3.4 erwähnt, aufgrund der Regulierung der Schwefel- und Stickoxidemissionen derzeit der Einsatz von LNG als Treibstoff diskutiert. Unter der Maßgabe der kompletten Treibstoffbereitstellung über erneuerbaren Strom ist die direkte Umsetzung in einen synthetischen Flüssigkraftstoff effizienter als eine Methanisierung mit darauf folgender Verflüssigung (siehe dazu Abschnitt 5.5), so dass im Hauptszenario auch im Seeverkehr synthetische Kraftstoffe und kein LNG zum Einsatz kommen. Bei der Effizienzentwicklung ist im Hauptszenario – ebenso wie im Basisszenario - der mittlere Pfad von [IMO 2009] (Effizienzsteigerung um 39% zwischen 2007 und 2050) hinterlegt.

5.4.5 Übrige Verkehrsmittel

Für die übrigen Verkehrsmittel werden keine spezifisch auf die Effizienz- oder Technologieentwicklung wirkenden Maßnahmen hinterlegt, so dass hier die Entwicklung aus dem Basisszenario übernommen wird. Auch hier werden konventionelle Kraftstoffe zunehmend durch synthetische Flüssigkraftstoffe ersetzt.

5.5 Energieträger und Kraftstoffe

5.5.1 Eingesetzte Kraftstoffe

Im Gegensatz zum Basisszenario ist der Verkehrssektor im Hauptszenario bis zum Jahr 2050 dominiert von synthetisch erzeugten Flüssigkraftstoffen (auch bezeichnet als Power-to-Liquid-Kraftstoffe, PtL). Diese kommen entsprechend der Annahmen ab dem Jahr 2020 in den Markt. Im Jahr 2050 werden gemäß dem Ziel eines treibhausgasneutralen Verkehrssektors 100 % der benötigten Flüssigkraftstoffe über die PtL-Technologie zur Verfügung gestellt.

Grundlage für die Herstellung von synthetischen Flüssigkraftstoffen ist die Wasserstoffelektrolyse. Der zusätzliche Prozessschritt zur Umwandlung von Wasserstoff in Flüssigkraftstoffe ist gegenüber dem direkten Einsatz von Wasserstoff mit Umwandlungsverlusten verbunden, besitzt jedoch gegenüber der Verwendung in der Brennstoffzelle den Vorteil, dass bestehende Fahrzeugtechnologien weiter genutzt werden können und so auch ein Einsatz im Güterverkehr möglich ist. Außerdem stehen für die Lagerung und den Transport bewährte Technologien zur Verfügung. In der Sensitivität mit Brennstoffzellenfahrzeugen (siehe Abschnitt 6) kommt Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen allerdings auch direkt zum Einsatz.

Der Einsatz von Biokraftstoffen entwickelt sich zunächst wie im Basisszenario. Ab 2020 verlieren jedoch Biokraftstoffe im Verkehrssektor an Bedeutung und ab dem Jahr 2040 werden keine Biokraftstoffe mehr eingesetzt.

5.5.2 Wasserstoff

Wasserstoff wird derzeit vor allem von der Industrie verwendet und zumeist über zentrale Gasreformierung direkt am Einsatzort hergestellt.[16] Theoretisch ist eine Vielzahl von Prozessen zur Herstellung von Wasserstoff auf Basis unterschiedlicher Primärenergieträger möglich. Der Einsatz von Wasserstoff im Verkehr ist aus Klimasicht jedoch nur dann sinnvoll, wenn Wasserstoff erneuerbar hergestellt wird.

Im Hauptszenario erfolgt die Herstellung von Wasserstoff über Elektrolyse. Die derzeit dominierende Technik ist die alkalische Elektrolyse, einen geringen Beitrag liefert die PEM-Elektrolyse. Im Hauptszenario wird außerdem ab dem Jahr 2020 die Hochtemperaturelektrolyse (SO-Elektrolyse) berücksichtigt, die sich derzeit allerdings noch in der Grundlagenforschung befindet.

Einen besonders hohen Wirkungsgrad kann die Hochtemperaturelektrolyse erzielen, falls Prozessabwärme (wie sie z.B. bei der Fischer-Tropsch-Synthese zur Erzeugung von Flüssigkraftstoffen anfällt, siehe Abschnitt 5.5.3) zur Überwindung der Verdampfungsenthalpie genutzt werden kann. Unter dieser Voraussetzung sind Wirkungsgrade um 90 % bei der SO-Elektrolyse denkbar[17]. Über Annahmen zu steigenden Wirkungsgraden von neuen Elektrolyseuren werden die Wirkungsgrade des Bestandes für die Wasserstoffelektrolyse abgeleitet (Tabelle 4). Neben der Hochtemperaturelektrolyse ist auch der Wirkungsgrad der alkalischen Elektrolyse (A-EL) sowie der PEM-Elektrolyse angegeben. Da die technologische Entwicklung der SO-Elektrolyse mit hoher Unsicherheit verbunden ist, wird außerdem eine Sensitivität mit einem weniger ambitionierten Wirkungsgrad der SO-Elektrolyse betrachtet.

	A-EL	PEM-EL	SO-EL	SO-EL (Sens.)
2020	54%	54%	77%	76%
2030	57%	59%	79%	77%
2040	61%	67%	83%	80%
2050	65%	70%	88%	82%

Tabelle 4: Wirkungsgrade der Wasserstoffelektrolyse (Bestandsanlagen)

Für den direkten Einsatz von Wasserstoff im Verkehr ist eine Verflüssigung notwendig. Der zusätzliche Energieaufwand dafür wird auf Basis von [WIETSCHEL 2010] mit 0,31 MJ_{el}/MJ_{H2} in 2015 und 0,2 MJ_{el}/MJ_{H2} veranschlagt.

5.5.3 Synthetische Flüssigkraftstoffe (PtL)

Synthetische Flüssigkraftstoffe lassen sich über die Prozesskette Elektrolyse (Produkt: Wasserstoff) mit CO_2 und der Wassergas-Shift-Reaktion (Produkt: Synthesegas), Fischer-Tropsch-Synthese (Produkt: Kohlenwasserstoffketten) und den finalen Raffinierungsschritt herstellen.

[16] NITSCH 2003
[17] SUNFIRE 2012.

Es wird davon ausgegangen, dass CO_2 in ausreichender Menge zur Verfügung steht und für die Bereitstellung von CO_2 kein zusätzlicher Energieaufwand anfällt.[18]

Im Hauptszenario wird angenommen, dass ab dem Jahr 2020 PtL-Kraftstoffe produziert werden, wobei dies zunächst zum überwiegenden Teil auf Basis der PEM-Elektrolyse geschieht, jedoch vermehrt die Hochtemperaturelektrolyse zum Einsatz kommt (Tabelle 5). Bei letzterer wird die Abwärme des exothermen Fischer-Tropsch-Prozesses genutzt.

	PEM-EL	SO-EL
2020	70%	30%
2030	53%	47%
2040	37%	63%
2050	20%	80%

Tabelle 5: Anteile der Elektrolyseprozesse für die PtL-Produktion

Für die Wirkungsgradverluste nach dem Prozessschritt der Elektrolyse bis zum Kraftstoff werden gemäß von SUNFIRE durchgeführten Simulationsläufen zunächst 25 %-Punkte, in 2050 nur noch 20 %-Punkte angenommen; in der Sensitivität werden 35 %-Punkte (2020) bzw. 30 %-Punkte (2050) angenommen.

5.5.4 Vergleich von Wasserstoff- und PtL-Technologie

Für den Vergleich des Einsatzes von stromerzeugtem Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im Verkehr ist der gesamte Strombedarf für Erzeugung und Bereitstellung (d.h. bis zur Tankstelle) relevant. Wie in Tabelle 6 dargestellt, steigt der Wirkungsgrad der PtL-Herstellung durch die effiziente SO-Elektrolyse auf insgesamt 64 % im Jahr 2050 und liegt damit etwa ab dem Jahr 2035 über dem Wirkungsgrad der Wasserstoffbereitstellung. Gründe für den wachsenden Vorteil der PtL-Technologie gegenüber dem direkten Einsatz von Wasserstoff im Verkehr ist vor allem der hohe Anteil der effizienten SO-Elektrolyse bei der PtL-Produktion. Beim Wasserstoff ist demgegenüber der Wirkungsgrad durch den hohen Energiebedarf für die Verflüssigung beschränkt.

	PtL	H_2	PtL (Sens.)	H_2 (Sens.)
2020	36%	44%	26%	44%
2030	45%	47%	35%	47%
2040	55%	52%	43%	52%
2050	64%	59%	50%	58%

Tabelle 6: Wirkungsgrade (MJ Kraftstoff / MJ Strom) stromerzeugter Kraftstoffe

[18] Dies ist allerdings eine sehr vereinfachende Annahme. Für zukünftige Szenarien sollte das tatsächliche Potential zur Bereitstellung von CO_2 für die PtL-Produktion und der möglicherweise anfallende zusätzliche Energiebedarf genauer geprüft werden.

Als Sensitivität sind in Tabelle 6 außerdem die Wirkungsgrade für die oben beschriebene weniger ambitionierte Entwicklung der SO-Elektrolyse und einen höheren Energieaufwand für den Prozessschritt der Elektrolyse bis zum Kraftstoff dargestellt. Dadurch ergibt sich, dass sich der direkte Einsatz von Wasserstoff gegenüber den Flüssigkraftstoffen energieeffizienter gestalten lässt. Unter dieser Voraussetzung ist der Einsatz von stromerzeugtem Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen energieeffizienter als die Verwendung stromerzeugter Flüssigkraftstoffe in konventionellen Fahrzeugen, weshalb eine Variante des Hauptszenarios mit einer weniger ambitionierten Entwicklung der SO-Elektrolyse und dem Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen betrachtet wird (Abschnitt 6).

5.5.5 Strom

Ziel dieser Studie ist es, ein Szenario eines möglichst treibhausgasneutralen Verkehrssektors im Jahr 2050 zu entwickeln. Eine Maßgabe dabei ist die vollständig erneuerbare Energieerzeugung im Stromsektor in 2050. Bei einer verstärkten Stromnachfrage, wie bei der Nutzung von PtL-Kraftstoffen im Verkehrssektor, stellt sich die Frage nach den Wechselwirkungen zwischen Verkehrs- und Stromsektor. Grundsätzlich ist der Einsatz stromgenerierter Kraftstoffe aus Klimagesichtspunkten nur dann sinnvoll, wenn der dafür benötigte Strom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung gestellt wird.

Im Rahmen dieser Studie konnte jedoch keine detaillierte Analyse durchgeführt werden, wie die Entwicklung der Stromerzeugung von 2010 bis zu einer vollständig erneuerbaren Stromerzeugung in 2050 aussehen und welche Wechselwirkungen zwischen Verkehrs- und Stromsektor entstehen könnten. Daher werden zwei mögliche Entwicklungen der Stromversorgung und ihre jeweilige Auswirkung auf die Treibhausgasemissionen dargestellt, um eine mögliche Spannbreite aufzuzeigen. Beide Sensitivitäten münden in einen vollständig erneuerbaren Stromsektor im Jahr 2050 und unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Strombereitstellung bei der Herstellung der PtL-Kraftstoffe bis zum Jahr 2050.

In beiden Sensitivitäten wird für die übrige Stromnachfrage aus dem Verkehrssektor (durch Elektromobilität und Bahnverkehr) ein deutscher Strommix angenommen. welcher folgendermaßen hergeleitet wird:

Für das Jahr 2050 wird die Struktur der Stromerzeugung dem Szenario „Regionenverbund“ aus [UBA 2010] entnommen, in welchem der Strom im Jahr 2050 vollständig erneuerbar erzeugt wird. Da in dieser Studie keine Entwicklungsstufen bzw. Zwischenjahre angegeben sind, werden bis zum Jahr 2030 die Emissionsfaktoren des Basisszenarios übernommen. Für den Zeitraum von 2030 bis 2050 schlägt sich dann der gegenüber dem Basisszenario angenommene höhere Anteil von erneuerbaren Energien in niedrigeren Vorkettenemissionsfaktoren aller Kraftwerkstypen nieder, weshalb für das Hauptszenario die Emissionsänderungsrate des Zeitraums von 2020 bis 2030 für die Fortschreibung der Emissionsfaktoren aus GEMIS 4.7. nach 2030 verwendet wird. Die in Tabelle 7 dargestellten Emissionsfaktoren für die Stromerzeugung in Deutschland ergeben sich dann aus der veränderten Zusammensetzung des Kraftwerksparks. Die vorgelagerten Emissionen einiger EE-Anlagen (v.a. Photovoltaik) sind teilweise höher als bei thermischen Kraftwerken. Daraus ergeben sich gegenüber dem Basisszenario bis zum Jahr 2050 etwas höhere spezifische indirekte Emissionen. Es ist jedoch zu beachten, dass in Verbindung mit einer stärkeren Nutzung von Elektromobilität auch die Klimaschutzziele und die Ziele für den Ausbau der

erneuerbaren Energien zur Stromversorgung angepasst werden sollten, um einen „echten“ Klimaschutzbeitrag zu erzielen.

Emissionsfaktor [g CO_2eq/kWh$_{el,Endenergie}$]

	2010	2020	2030	2040	2050
direkte Emissionen	550	495	270	111	0
indirekte Emissionen	59	47	41	41	41
Emissionen gesamt	609	542	311	153	41

Tabelle 7: Mittlere Emissionsfaktoren der Stromerzeugung in Deutschland – Hauptszenario

Sensitivität 1: rein erneuerbarer Strom für PtL

In dieser Sensitivität wird davon ausgegangen, dass bei der PtL-Herstellung nur erneuerbare Energien eingesetzt werden, die keine direkten Emissionen aufweisen. Die dafür eingesetzten Anlagen müssen daher eine Zusätzlichkeit zu der in Tabelle 7 aufgeführten Kraftwerksparkentwicklung aufweisen. Aufgrund der Menge an benötigtem Strom ist davon auszugehen, dass der für die PtL-Produktion eingesetzte Strom vorwiegend an günstigen Solar- und Windstandorten auch außerhalb Deutschlands produziert wird. Die Entwicklung für die indirekten Emissionen aus der Anlagenproduktion und -entsorgung wird für diese Anlagen allerdings mit den Werten aus Tabelle 7 beibehalten. Vernachlässigt werden in der Betrachtung zudem mögliche Treibhausgasemissionen der notwendigen Bereitstellung von CO_2 für die Kraftstoffproduktion. Somit stellt diese Sensitivität eine Untergrenze für die Entwicklung der Treibhausgasfreisetzung durch PtL-Kraftstoffe dar.

Sensitivität 2: Emissionen für PtL nach Kraftwerksparkentwicklung

Um die Unsicherheit der Strombereitstellung für PtL-Kraftstoffe darzustellen, wird eine zweite Sensitivität mit Emissionsfaktoren entsprechend Tabelle 7 gerechnet. Im Jahr 2050 erfolgt auch in dieser Sensitivität die Strombereitstellung vollständig aus erneuerbaren Energien und entspricht damit der Sensitivität 1. Der Unterschied besteht hinsichtlich des Pfades zur Zielerreichung in 2050: Die Sensitivität 2 stellt den (theoretischen) Fall dar, dass die zusätzliche Stromnachfrage für die PtL-Herstellung zu Beginn noch nicht vollständig mit erneuerbaren Energien gedeckt werden kann, sondern sich die Strombereitstellung gemäß dem Kraftwerkspark und der Emissionsfaktoren aus Tabelle 7 entwickelt.

Unter dieser Annahme und den Annahmen zu den Wirkungsgraden der PtL-Herstellung sind die bei der Nutzung von stromerzeugten Kraftstoffen verursachten Treibhausgasemissionen erst ab dem Jahr 2038 niedriger als diejenigen von fossilem Benzin (siehe Abbildung 10).

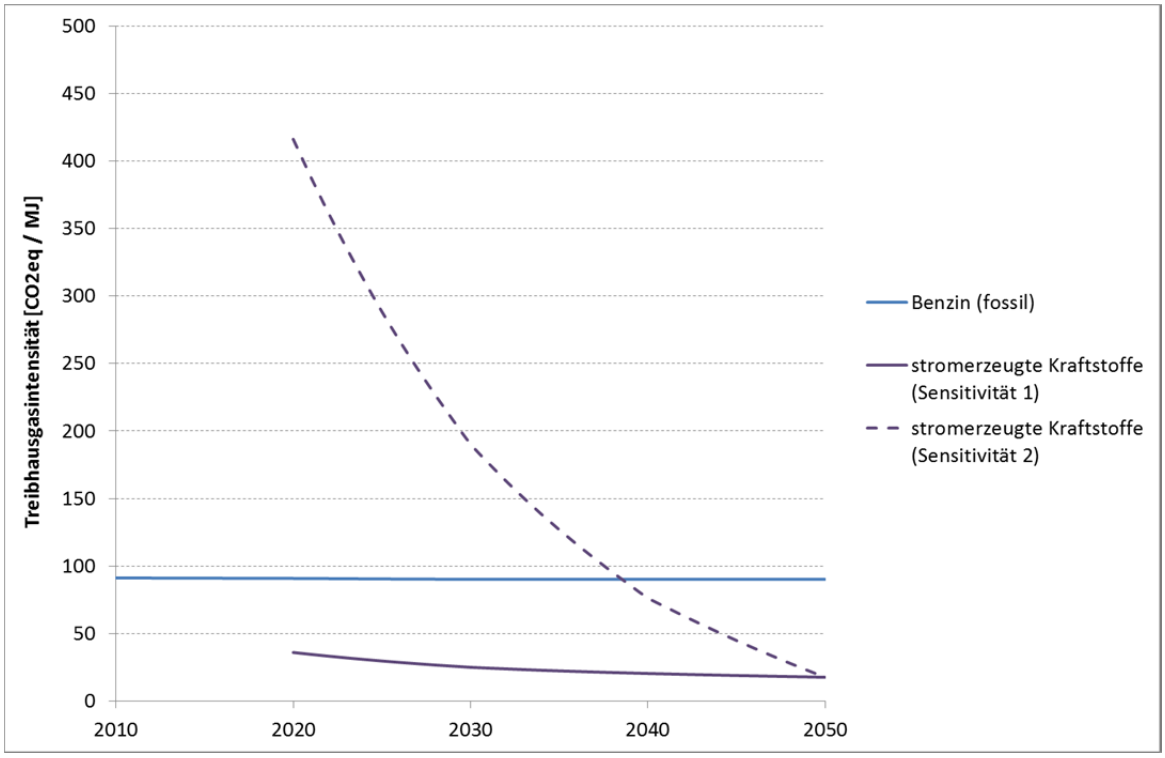

Abbildung 10: Treibhausgasemissionsfaktoren fossiler und stromerzeugter Kraftstoffe im Vergleich

Es wird also deutlich, dass es für die Minderung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors nicht ausreicht, allein auf einen Zielhorizont (wie beispielsweise 2050) zu fokussieren. Vielmehr müssen bei allen Optionen zur Transformation des Verkehrssektors auch die Wechselwirkungen zwischen Verkehr und Stromerzeugung betrachtet werden, um einen möglichst emissionsarmen Pfad zu identifizieren.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass bei beiden Sensitivitäten davon ausgegangen wird, dass bei der Herstellung der stromgenerierten Kraftstoffe CO_2 gebunden wird, welches sonst in die Atmosphäre freigesetzt würde und daher den stromerzeugten Kraftstoffen nur die indirekten Emissionen durch die Stromerzeugung anzurechnen sind.

Mögliche zusätzliche Energieaufwendungen und Emissionen für die Bereitstellung des CO_2 (beispielsweise bei der Gewinnung von atmosphärischem CO_2) sind dabei noch nicht berücksichtigt.

5.6 Ergebnisse des Hauptszenarios

5.6.1 Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsleistung im Hauptszenario nimmt sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr weniger stark zu als im Basisszenario. Die konservativen Annahmen bei der Quantifizierung der Maßnahmen führen allerdings zu nur relativ moderaten verkehrsvermeidenden Effekten.

Personenverkehr

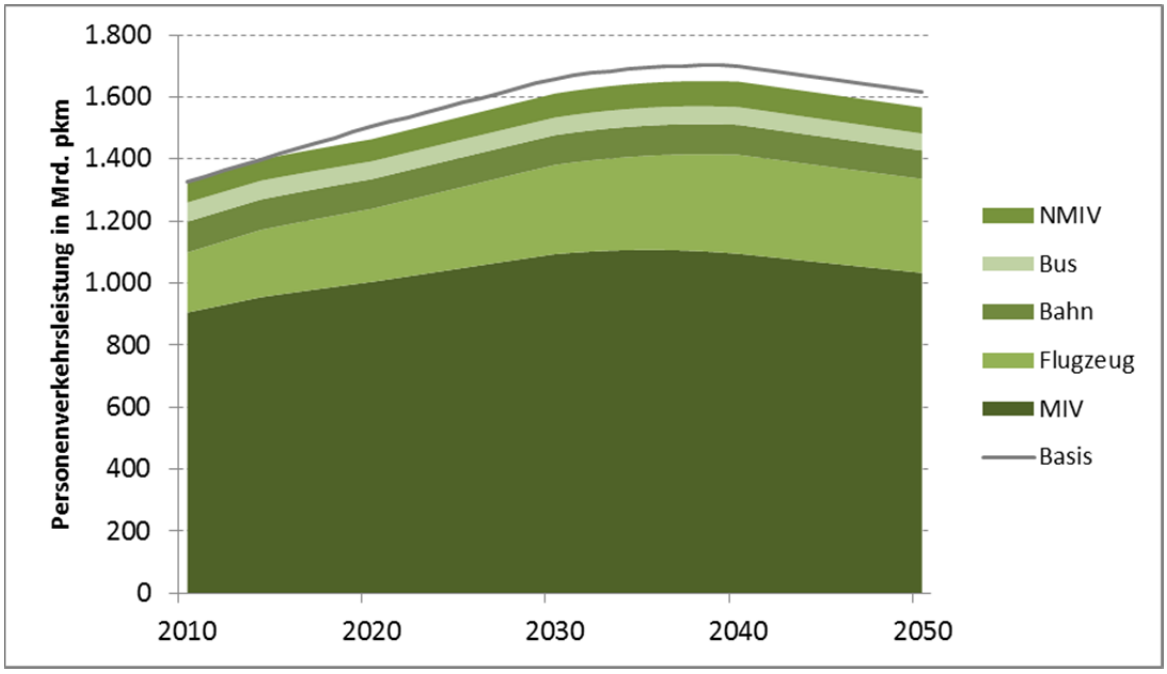

Abbildung 11: Personenverkehrsleistung im Hauptszenario

Wie in Abbildung 11 dargestellt, setzen im Personenverkehr die verkehrsvermeidenden und -verlagernden Effekte ab 2015 ein und führen dazu, dass im Jahr 2050 die Verkehrsleistung mit 1.566 Mrd. pkm um 3,1 % niedriger liegt als im Basisszenario. In der Personenverkehrsleistung enthalten ist dabei auch der NMIV, der im Hauptszenario deutlich an Bedeutung gewinnt und im Jahr 2050 mit 84 Mrd. pkm um 42 % höher liegt als im Basisszenario (59 Mrd. pkm). Wesentlich dafür ist die Förderung von Fahrrad- und Fußverkehr. Die Anteile des Luftverkehrs und des MIV am Modal Split im Jahr 2050 reduzieren sich gegenüber dem Basisszenario jeweils leicht (von 67,3 % auf 65,9 % bzw. von 20 % auf 19,4 %).

Größere Unterschiede zwischen Basisszenario und Hauptszenario bestehen bei den eingesetzten Antrieben, insbesondere bei Pkw. Die in Abbildung 12 dargestellte Verteilung

der Fahrleistung auf Antriebstypen zeigt eine deutliche Verschiebung zu Gunsten der Elektro- und Hybridantriebe.[19]

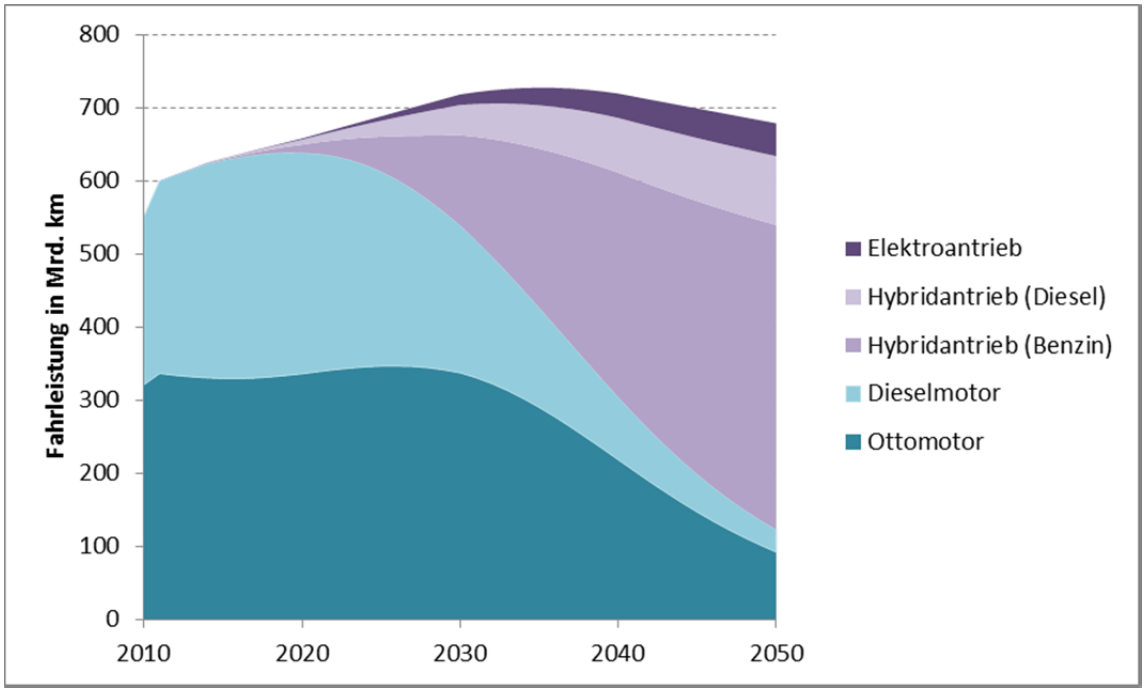

Abbildung 12: Fahrleistung der Pkw im Hauptszenario nach Antriebstyp

Im Jahr 2050 wird bei den Pkw 82 % der Fahrleistung von Plug-In-Hybridfahrzeugen und Elektrofahrzeugen erbracht. Da Plug-In-Hybridfahrzeuge nicht nur im elektrischen Fahrmodus eingesetzt werden, entspricht dies bei dem angenommenen elektrischen Fahranteil von Plug-In-Hybridfahrzeugen (67 %) einer elektrischen Fahrleistung von 57 % an der Pkw-Fahrleistung (387 Mrd. km).

Güterverkehr

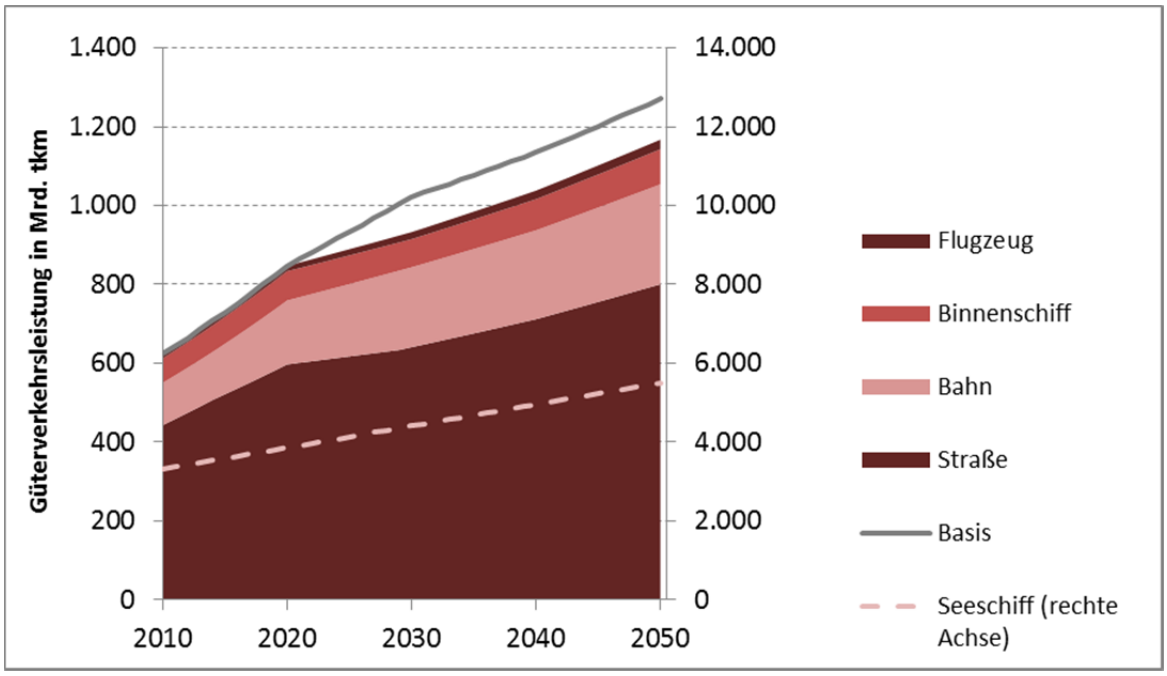

Abbildung 13: Güterverkehrsleistung im Hauptszenario

Im Güterverkehr liegt die Verkehrsleistung im Hauptszenario im Jahr 2050 bei 1.143 Mrd. tkm und damit um 8,3 % niedriger als im Basisszenario (siehe Abbildung 13). Dies ist vor allem auf einen deutlichen Rückgang des Straßengüterverkehrs um 134 Mrd. tkm gegenüber der Basis zurückzuführen, was auch eine entsprechend niedrigere Lkw-Fahrleistung mit sich bringt (siehe Demgegenüber nimmt der Schienengüterverkehr um 39 Mrd. tkm auf 253 Mrd. tkm zu. Im Umweltgutachten 2012 des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU 2012) wird eine Transportleistung des Schienengüterverkehrs von 300 Mrd. bis 500 Mrd. tkm bei konsequenter Umsetzung verschiedener Maßnahmen bis zum Jahr 2050 für möglich gehalten. Im Seeverkehr wurden im Hauptszenario keine verkehrsvermeidenden Maßnahmen angenommen, weshalb die Verkehrsleistung dem Basisszenario entspricht.

In Abbildung 15 ist dargestellt, wie sich der Lkw-Bestand im Jahr 2050 zusammensetzt. Bei den leichten Nutzfahrzeugen gibt es bis dahin nur noch einen geringen Anteil konventioneller Dieselfahrzeuge. Allerdings ist zu beachten, dass die schweren Lkw und Sattelzüge, bei denen sich keine alternativen Antriebe durchsetzen können, auf Grund ihrer hohen Jahresfahrleistung einen wesentlich stärkeren Anteil an der Fahrleistung des Straßengüterverkehrs besitzen.

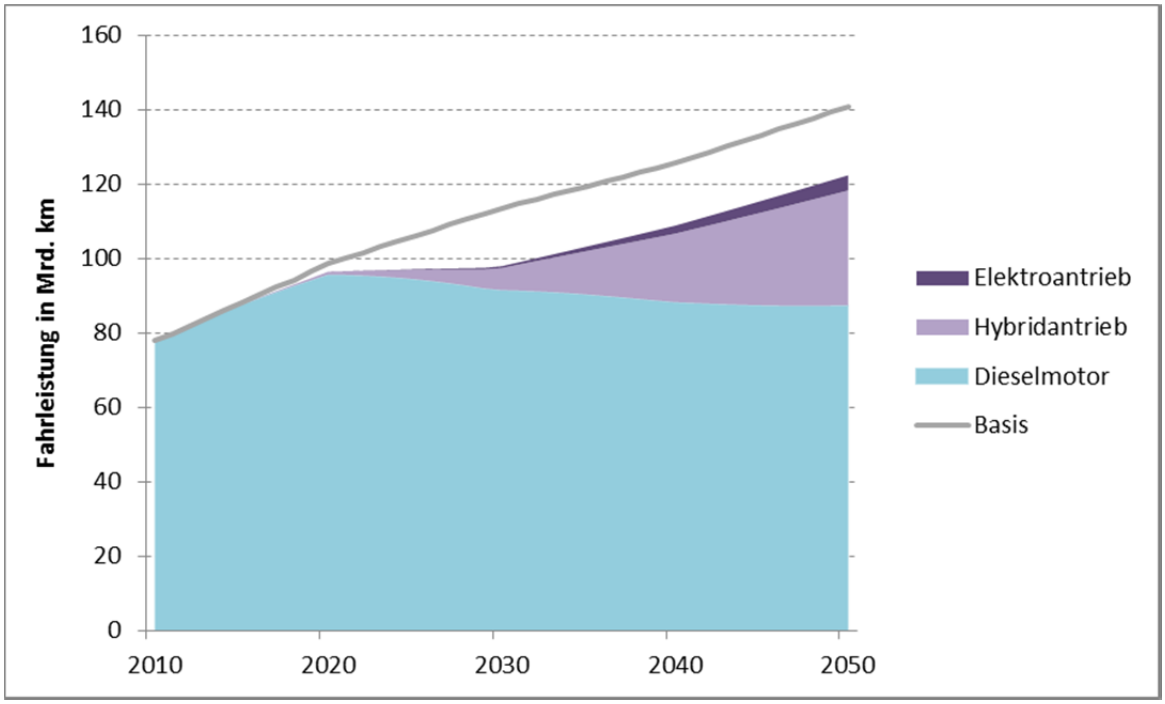

Abbildung 14: Lkw-Fahrleistung nach Antriebstyp (Hauptszenario)

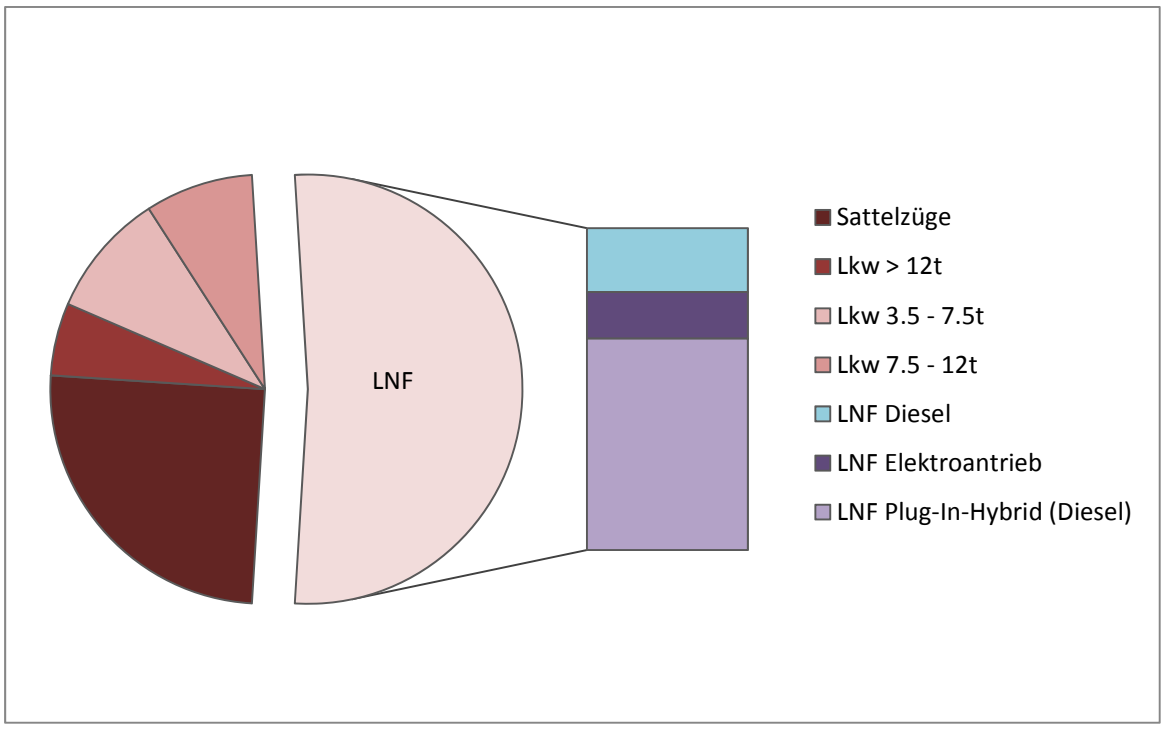

Abbildung 15: Bestandsstruktur Lkw im Jahr 2050 (Hauptzenario)

5.6.2 Endenergiebedarf

Im Hauptszenario liegt der Endenergiebedarf im Verkehrssektor bei 1.623 PJ (ohne Seeschifffahrt) und damit 33 % unter dem Endenergiebedarf des Basisszenarios (Abbildung 16). Wesentliche Gründe dafür sind neben der etwas geringeren Verkehrsleistung und dem Modal Shift zu energieärmeren Modi vor allem der höhere Anteil von elektrisch betriebenen Fahrzeugen im Straßenverkehr. Gegenüber dem Jahr 2010 wird im Hauptszenario dadurch eine Reduktion von 36,3 % erreicht. Einen wesentlichen Beitrag dazu leistet der Güterverkehr: Im Gegensatz zum Basisszenario, wo der Endenergiebedarf des Güterverkehrs zwischen 2010 und 2050 um 46 % zunimmt, kann im Hauptszenario durch die geringere Verkehrsleistung, die Verkehrsverlagerung und die höhere Effizienz der Lkw der Endenergiebedarf des Güterverkehrs nach einem vorübergehenden Anstieg bis zum Jahr 2050 auf 664 PJ gesenkt werden. Dies entspricht gegenüber 2010 einer Reduktion um 8 % und gegenüber dem Endenergiebedarf im Jahr 2050 des Basisszenarios einer Reduktion um 37 %. Der Personenverkehr verzeichnet gegenüber dem Basisszenario durch Verkehrsverlagerungen und effizientere Fahrzeuge ebenfalls deutliche Minderungen in Höhe von 29%: Dadurch hat der Endenergiebedarf des Personenverkehrs im Jahr 2050 mit 958 PJ einen Anteil von 59 % am Endenergiebedarf des Verkehrs (Basis: 56 %).

Für den Seeverkehr wurden keine Maßnahmen hinterlegt, so dass der Endenergiebedarf hier dem Basisszenario entspricht.

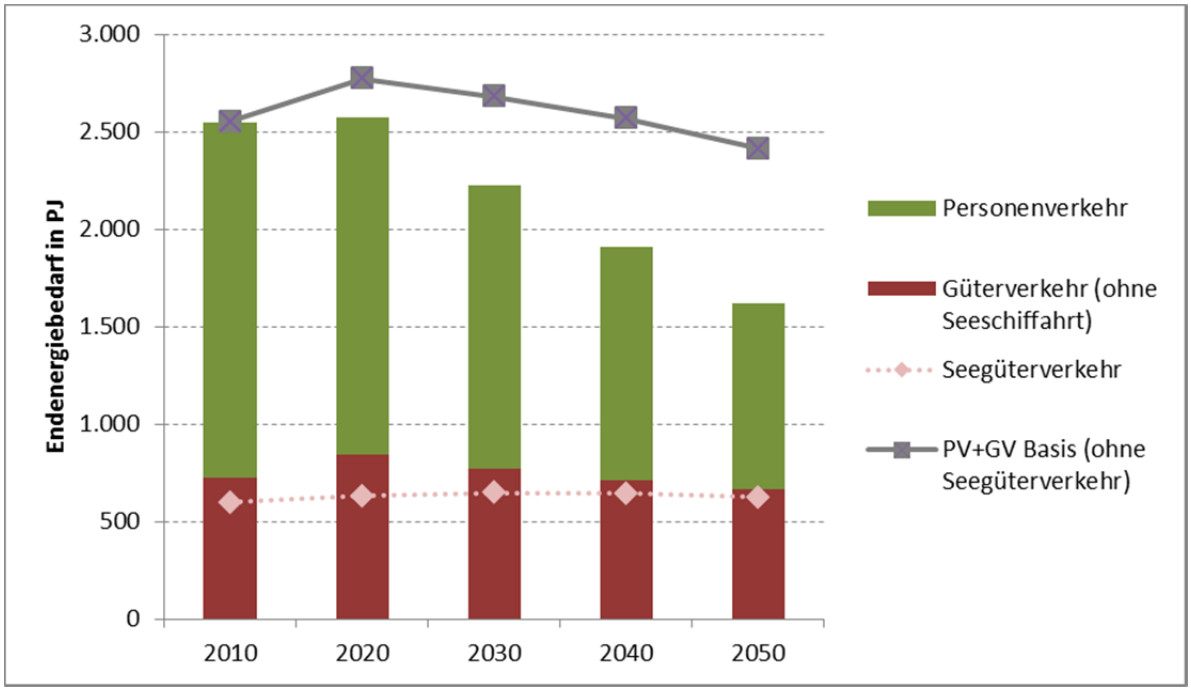

Abbildung 16: Endenergiebedarf im Hauptszenario nach Verkehrsart

Im Jahr 2050 basiert der Verkehr im Hauptszenario zu 20 % auf dem direkten Einsatz von Strom und zu 80 % auf stromerzeugten Kraftstoffen (Abbildung 17). Dieser hohe Anteil von stromerzeugten Kraftstoffen ist darauf zurückzuführen, dass zwar bei den Pkw bis zum Jahr

2050 57 % der Fahrleistung elektrisch erbracht wird, jedoch die Restriktionen beim Schwerlastverkehr sowie der Einsatz von stromgenerierten Kraftstoffen bei den übrigen Verkehrsmitteln (insbesondere bei Flugzeugen) zu einem hohen Anteil von Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben führen.

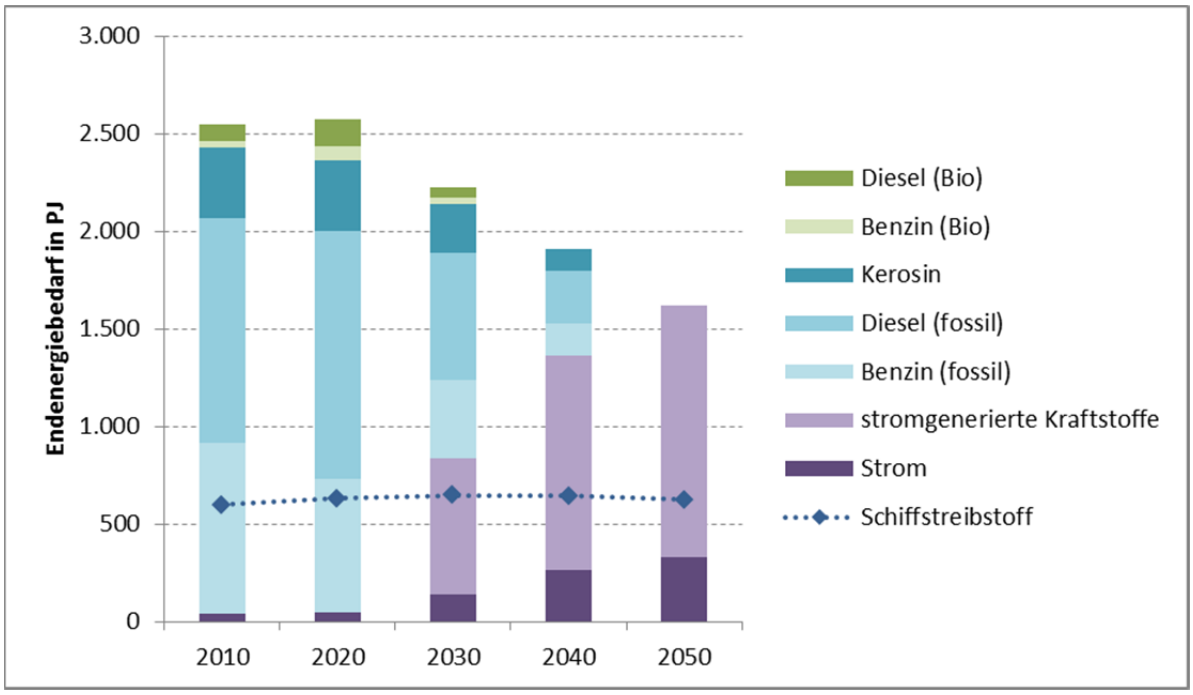

Abbildung 17: Endenergiebedarf im Hauptszenario nach Energieträgern

5.6.3 Strombedarf

Zu beachten ist, dass es sich bei dem oben erwähnten Endenergiebedarf in Höhe von 1.623 PJ um den Endenergiebedarf, d.h. den Energiegehalt der eingesetzten Kraftstoffe und des Fahrstroms, handelt. Bei der Erzeugung synthetischer Kraftstoffe aus Strom fallen jedoch hohe Umwandlungsverluste in der Kraftstoffherstellung an. Da in dieser Studie der gesamte Strombedarf des Verkehrssektors für ein treibhausgasneutrales Deutschland abgeschätzt werden soll, wird im Folgenden nochmals gesondert auf den Strombedarf einschließlich der Umwandlungsverluste eingegangen.

Einschließlich der Umwandlungsverluste in der PtL-Herstellung liegt der Strombedarf mit insgesamt 2.345 PJ im Jahr 2050 deutlich über dem Endenergiebedarf des Verkehrssektors (siehe Abbildung 18). Mit 722 PJ machen die Umwandlungsverluste im Jahr 2050 immerhin mehr als 30 % der gesamten vom Verkehrssektor verursachten Stromnachfrage aus.

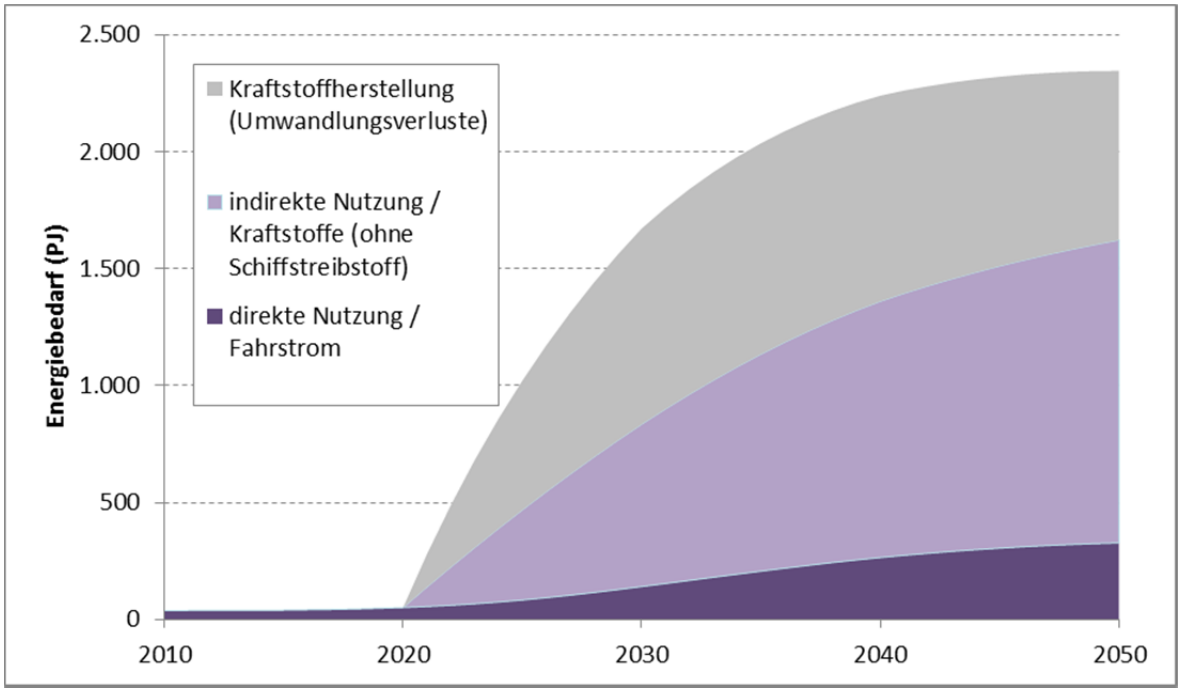

Abbildung 18: Strombedarf im Hauptszenario (Endenergie und Kraftstofferzeugung, ohne Seeschifffahrt)

Die Annahme des sich verbessernden Wirkungsgrades der PtL-Herstellung ist an dem abnehmenden Verhältnis zwischen Umwandlungsverlusten und dem Energiegehalt der Kraftstoffe zu erkennen.

In Abbildung 18 ist der Seeschiffsverkehr auf Grund der besonderen Methodik nicht enthalten. Der Endenergiebedarf des Schiffsverkehrs liegt bei 626 PJ. Werden auch Schiffstreibstoffe vollständig über Strom und Elektrolyse erzeugt, so werden dafür auf Grund der Umwandlungsverluste zusätzlich 349 PJ Strom benötigt. Damit beträgt der Strombedarf des Seeschiffsverkehrs insgesamt 975 PJ.

5.6.4 Treibhausgasemissionen

In Abbildung 19 sind die Treibhausgasemissionen des Hauptszenarios dargestellt, wenn die PtL-Herstellung mit zusätzlichen erneuerbaren Energien erfolgt (Sensitivität 1, siehe Abschnitt 5.5.5). Dieser Fall stellt somit die Untergrenze der Freisetzung von Treibhaugasen durch den Verkehrssektor dar.

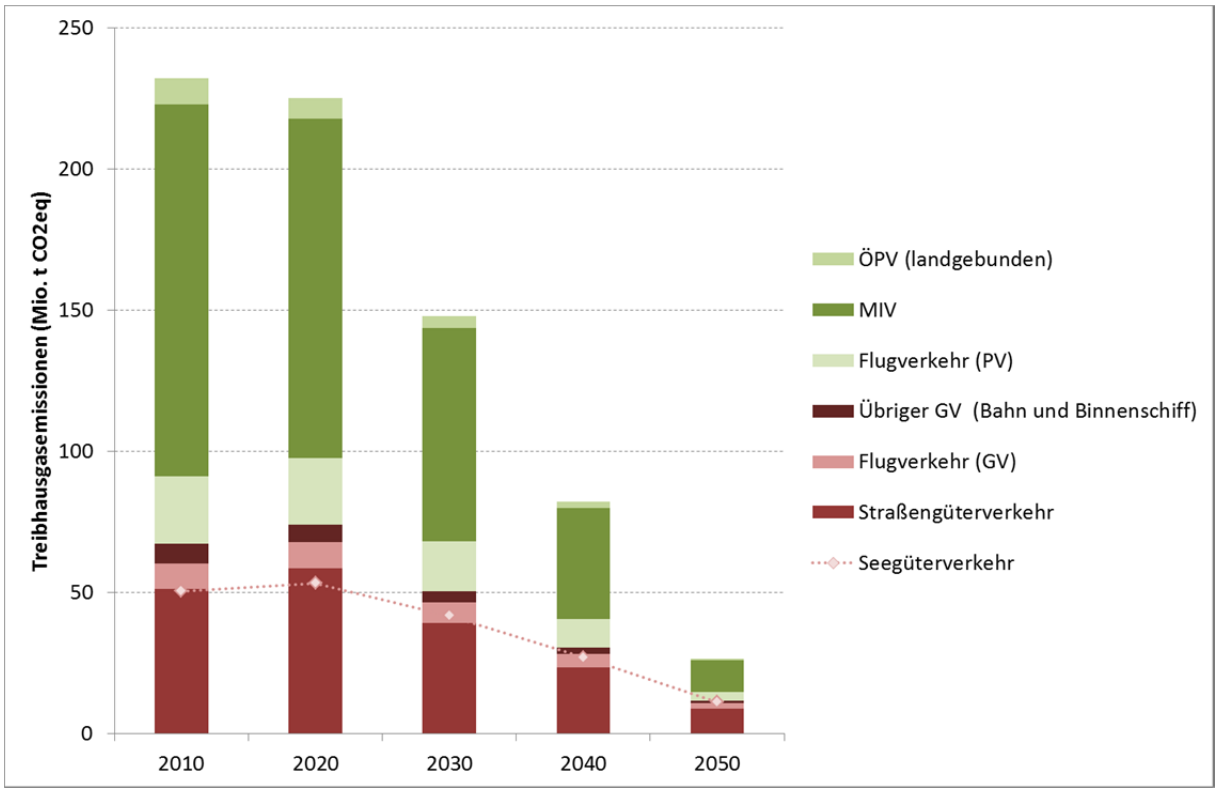

Abbildung 19: Treibhausgasemissionen im Hauptszenario (Sensitivität 1: rein erneuerbarer Strom für PtL)

Im Hauptszenario sinken die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors (ohne Berücksichtigung des Seeschiffverkehrs) bis zum Jahr 2050 auf 26 Mio. t CO_2-eq. Dies entspricht gegenüber 2010 einer Minderung um 88,5 %. Wesentlich dafür ist die vollständige Umstellung des Stromsektors auf erneuerbare Energien, die Bereitstellung von stromerzeugten Kraftstoffen in den nötigen Mengen und die zunehmende Marktdurchdringung von elektrischen Fahrzeugantrieben. Dass der Verkehrssektor dennoch nicht völlig emissionsfrei ist, begründet sich durch die indirekten Emissionen der Vorketten der EE-Stromerzeugung (Stahlerzeugung etc.). Die in Abbildung 19 ausgewiesenen Treibhausgasemissionen des Seegüterverkehrs beruhen – wie bei den übrigen Verkehrsträgern – auf der Prämisse, dass bis zum Jahr 2050 nur noch stromerzeugte Kraftstoffe verwendet werden und der Strom dafür vollständig aus erneuerbaren Energien bereit gestellt wird.

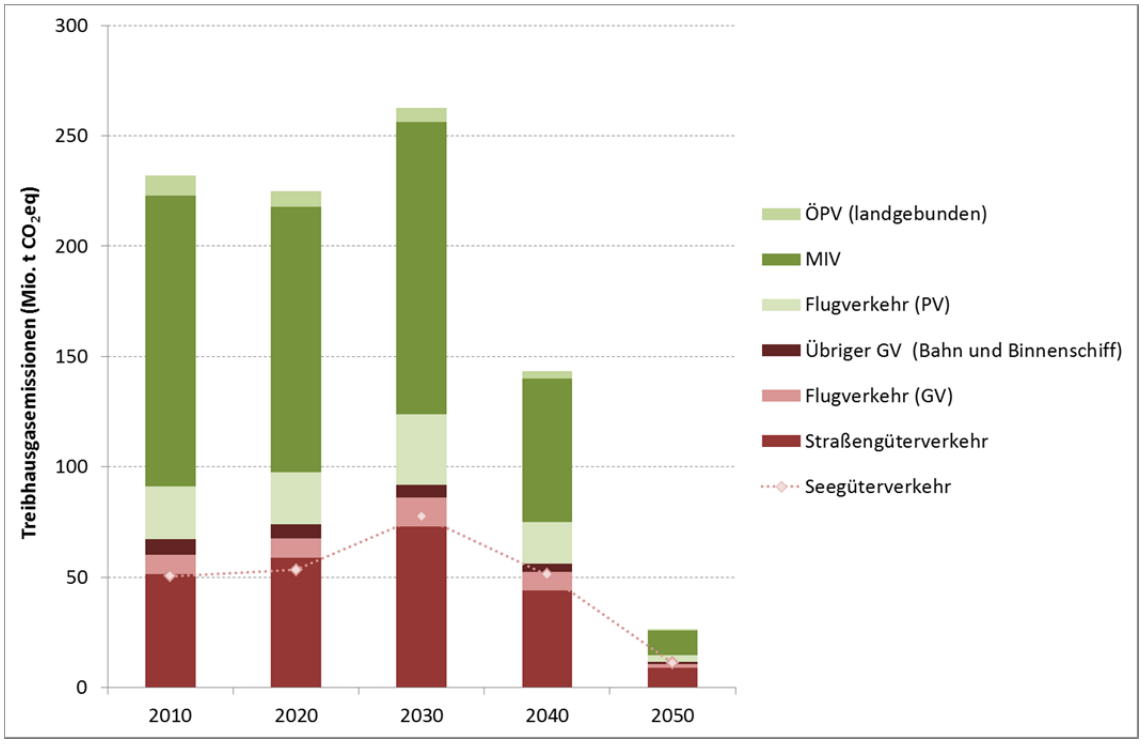

Abbildung 20: Treibhausgasemissionen im Hauptszenario (Sensitivität 2: Emissionen nach Kraftwerkspark für PtL)

In Abbildung 20 ist die Entwicklung der Treibhausgasemissionen dargestellt, falls für die PtL-Herstellung der Strommix aus Tabelle 7 zu Grunde gelegt wird. Diese Sensitivität zeigt auf, welchen entscheidenden Einfluss die Form der Strombereitstellung für die PtL-Kraftstoffe auf die Treibhausgasemissionen hat: Gemäß der getroffenen Annahmen kommen bereits ab dem Jahr 2020 stromgenerierte Kraftstoffe in den Markt. Falls der dafür nötige Strom nicht aus zusätzlichen erneuerbaren Energien bereitgestellt wird, führt dies vorübergehend sogar zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen.

Diese Sensitivität macht damit deutlich, wie zentral die Bereitstellung von ausreichend EE-Strom ist, falls die PtL-Technologie im Verkehr (mit ihren hohen Wirkungsgradverlusten) einen Beitrag zum Klimaschutz leisten soll.

6 Sensitivitäten

Alle in dieser Studie getroffenen Annahmen zur Entwicklung relevanter Parameter bis zum Jahr 2050 sind mit Unsicherheiten behaftet. Insbesondere zählen dazu die Entwicklung des Wirkungsgrades der Elektrolyse sowie die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie, so dass diese beiden Aspekte jeweils in einer Sensitivität betrachtet werden.

6.1 Elektrolyse

6.1.1 Annahmen

Für die Produktion von PtL-Kraftstoffen werden in dieser Sensitivität die Annahmen zu Wirkungsgraden aus Abschnitt 5.5.3 in der weniger ambitionierten Variante verwendet. Im Jahr 2050 beträgt der Wirkungsgrad der PtL-Produktion (MJ Kraftstoff / MJ Strom) stromerzeugter Kraftstoffe nicht wie im Hauptszenario 64 %, sondern nur 50 %.

6.1.2 Ergebnisse

Sowohl die Verkehrsleistung als auch der Endenergiebedarf entsprechen in der Sensitivität „Elektrolyse“ dem Hauptszenario. Unterschiede ergeben sich erst bei Betrachtung des gesamten Strombedarfs einschließlich der Erzeugung der Kraftstoffe (Abbildung 21).

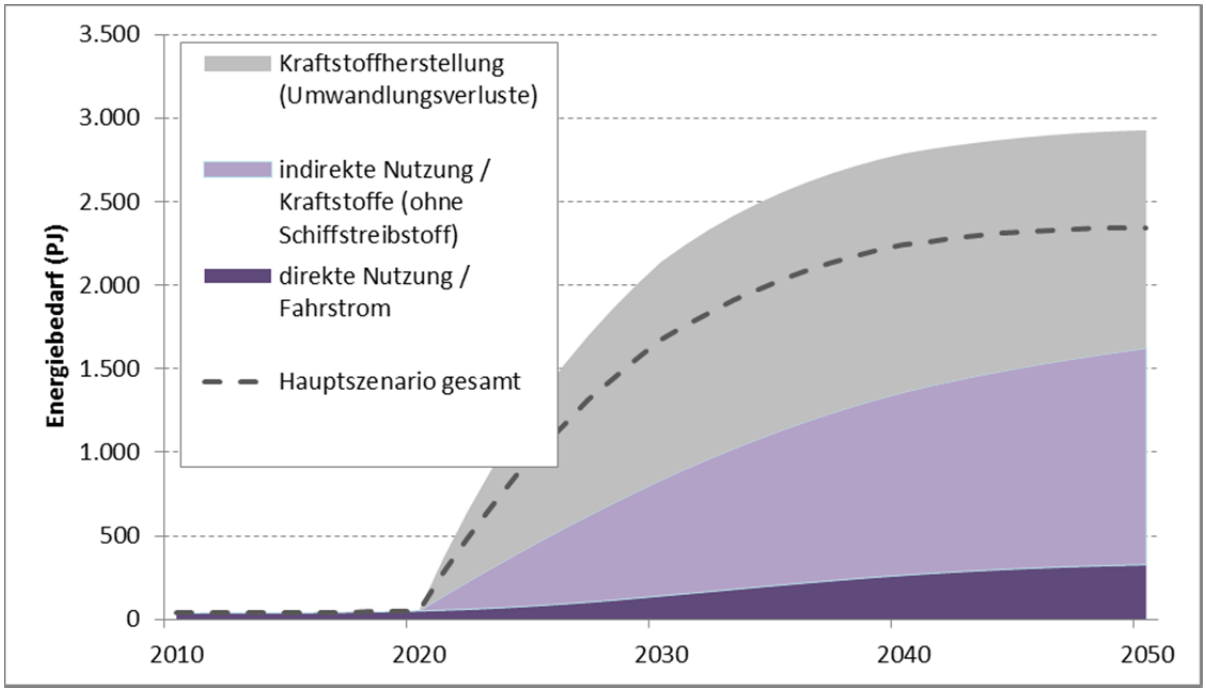

Abbildung 21: Strombedarf in der „Sensitivität Elektrolyse“ (Endenergie sowie Kraftstofferzeugung)

Dieser liegt mit 2.927 PJ deutlich über dem Strombedarf im Hauptszenario (2345 PJ), was auf den geringeren Wirkungsgrad der Hochtemperaturelektrolyse und damit der Erzeugung stromgenerierter Kraftstoffe zurückzuführen ist.

6.2 Brennstoffzellenfahrzeuge

6.2.1 Annahmen

Die Entwicklung der für einen flächendeckenden Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen nötigen Tank-Infrastruktur und die Fortschritte bei der Brennstoffzellentechnologie sind mit hoher Unsicherheit verbunden. Im Hauptszenario kommen keine Brennstoffzellenfahrzeuge zum Einsatz, dieser Einsatz soll jedoch hier als Sensitivität betrachtet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass entlang Autobahnen und in Ballungszentren eine ausreichende Wasserstoffversorgungsinfrastruktur zur Verfügung steht.

Brennstoffzellenfahrzeuge kommen in der Sensitivität vor allem bei mittleren und großen Pkw sowie bei kleineren Lkw zum Einsatz. Bei den Pkw wird ein Maximalpotenzial von 15 % für die Kategorien „mittel“ und „groß“ angenommen. Die Markteinführung beginnt 2020 und wird mit derselben Marktdiffusionskurve abgebildet wie bei elektrisch angetriebenen Pkw. Dadurch ergibt sich die in Tabelle 8 dargestellte Neuzulassungsstruktur.

	Pkw klein			
	Elektro	Hybrid	Brennstoffzelle	konventionell
2010	0%	0%	0%	100%
2020	3%	9%	0%	88%
2030	12%	39%	0%	49%
2040	18%	62%	0%	20%
2050	21%	72%	0%	7%

	Pkw mittel			
	Elektro	Hybrid	Brennstoffzelle	konventionell
2010	0%	0%	0%	100%
2020	2%	9%	0%	90%
2030	6%	37%	2%	55%
2040	10%	58%	8%	24%
2050	12%	67%	12%	9%

	Pkw groß			
	Elektro	Hybrid	Brennstoffzelle	konventionell
2010	0%	0%	0%	100%
2020	0%	10%	0%	90%
2030	0%	43%	2%	55%
2040	0%	68%	8%	24%
2050	0%	79%	12%	9%

Tabelle 8: Neuzulassungsstruktur Pkw in der Sensitivität Brennstoffzellenfahrzeuge

Bei großen Lkw (> 12 t) ist aufgrund der geringen Haltbarkeitsdauer von Brennstoffzellen nicht davon auszugehen, dass Brennstoffzellenfahrzeuge einen relevanten Marktanteil bei

Lkw mit hoher jährlicher Fahrleistung erreichen werden. Bei mittleren und kleinen Lkw sowie bei leichten Nutzfahrzeugen wird das Maximalpotenzial auf 30 % bzw. bei leichten Nutzfahrzeugen auf 20 % (in Anlehnung an [KLOESS 2011]) geschätzt. Die Markteinführung startet auch hier im Jahr 2020.

6.2.2 Ergebnisse

Insgesamt bleibt der Anteil der Brennstoffzellenfahrzeuge bis zum Jahr 2050 relativ gering: Bei Pkw (siehe Abbildung 22) liegt der Anteil der durch Brennstoffzellenfahrzeuge erbrachten Fahrleistung bei 7 % und im Straßengüterverkehr (siehe Abbildung 23) bei 11,8 %.

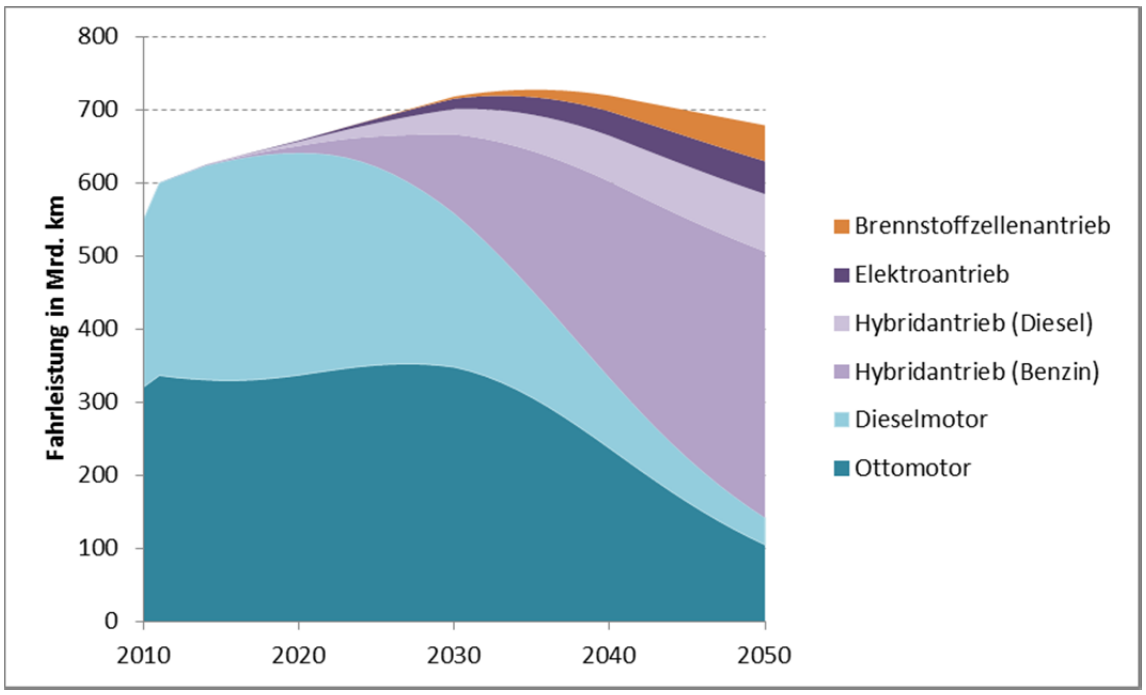

Abbildung 22: Pkw-Fahrleistung nach Antriebstyp (Sensitivität Brennstoffzelle)

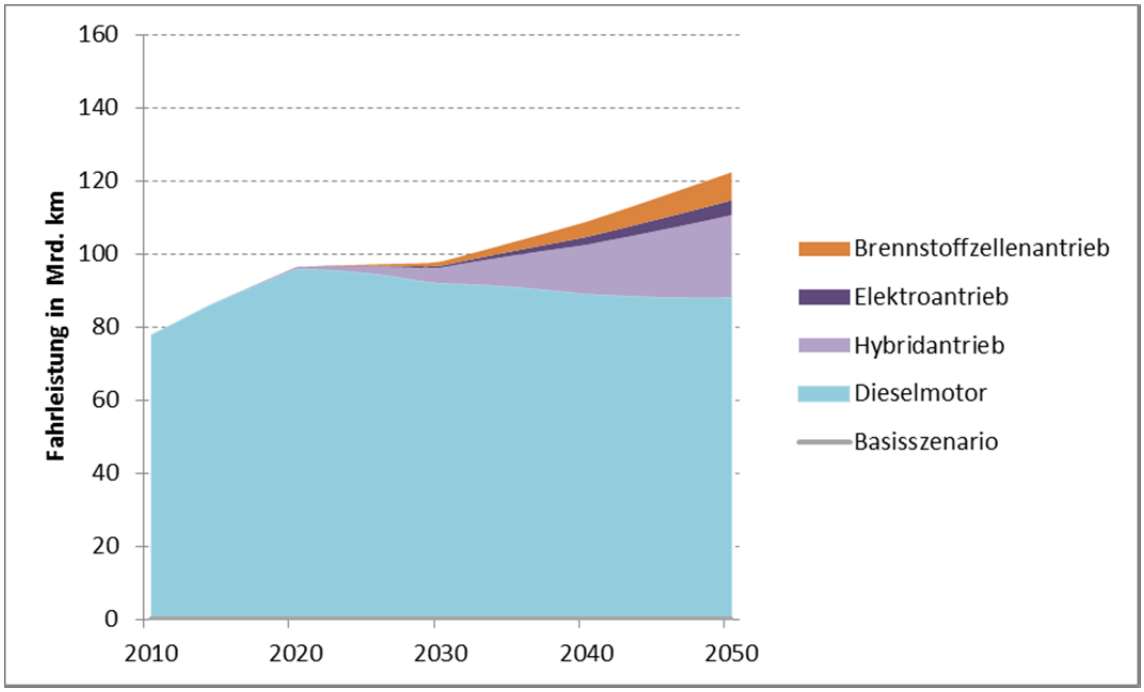

Abbildung 23: Lkw-Fahrleistung nach Antriebstyp (Sensitivität Brennstoffzelle)

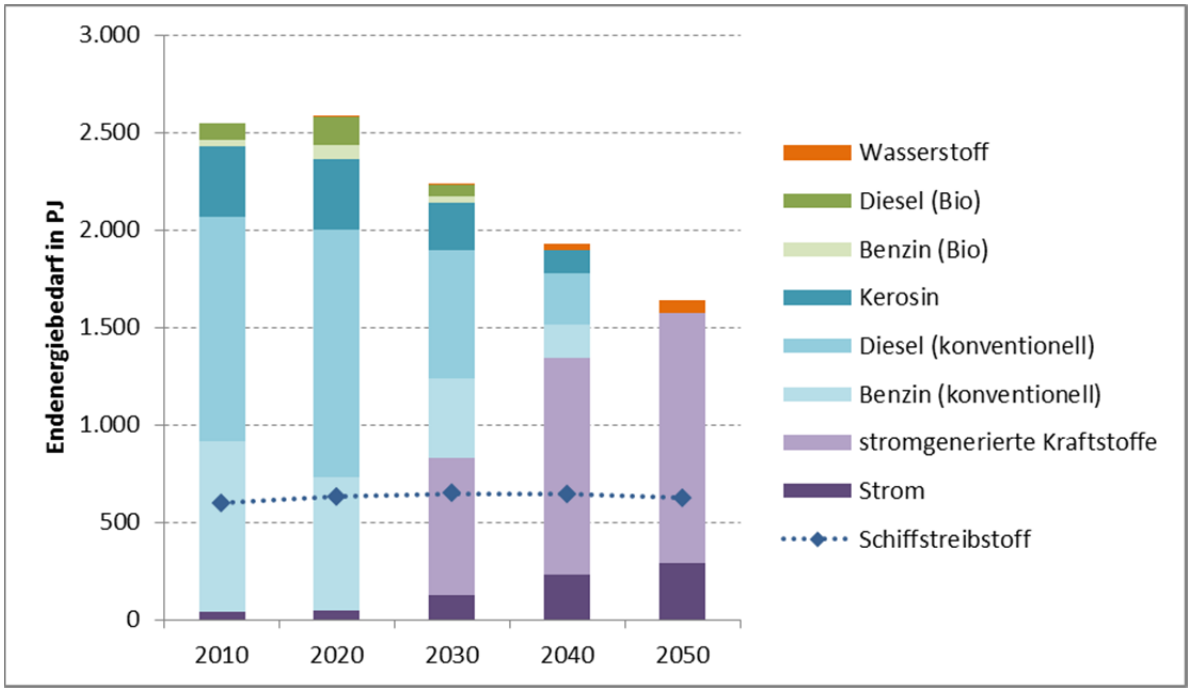

Abbildung 24: Endenergiebedarf in der Sensitivität Brennstoffzelle

Diese vergleichsweise geringen Anteile an der Fahrleistung führen dazu, dass auch der Anteil des Wasserstoffs am Endenergiebedarf im Verkehr im Vergleich zu den übrigen Energieträgern mit 68 PJ gering bleibt (Abbildung 24). Der niedrigere Anteil an Plug-In-

Hybridfahrzeugen schlägt sich in einem gegenüber dem Hauptszenario geringeren direkten Einsatz von Strom nieder. Wegen der etwas höheren Effizienz des direkten Einsatzes von Strom in Plug-In-Hybridfahrzeugen gegenüber dem Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen ist der gesamte Endenergiebedarf mit 1.641 PJ im Jahr 2050 18 PJ höher als im Hauptszenario. Damit sind die Unterschiede zum Hauptszenario in der „Sensitivität Brennstoffzelle“ also gering. Dies gilt ebenso für den Strombedarf und die Treibhausgasemissionen.

Auf die Energie- und Treibhausgasbilanz hat die „Sensitivität Brennstoffzelle“ zwar keinen signifikanten Effekt. Ein umfassender Vergleich des Einsatzes von stromerzeugtem Wasserstoff und stromerzeugten Flüssigkraftstoffen im Verkehrssektor erfordert jedoch darüber hinaus die Berücksichtigung einer Vielzahl weiterer Kriterien. Beispielsweise wird für die Wasserstofferzeugung im Gegensatz zu stromerzeugten Flüssigkraftstoffen kein CO_2 benötigt; in Bezug auf Einsatzmöglichkeiten und Speicherbarkeit sind demgegenüber synthetische Flüssigkraftstoffe im Vorteil. Darüber hinaus wären für eine umfassende Bewertung auch die Kostenentwicklungen der beiden Technologien zu berücksichtigen.

7 Bewertung der Ergebnisse

Die vollständige Umstellung des Verkehrssektors auf (erneuerbaren) Strom bis zum Jahr 2050 geht in dem in dieser Studie diskutierten Hauptszenario mit einem entsprechend hohen zusätzlichen Strombedarf für Fahrstrom und stromerzeugte Kraftstoffe einher. Im ambitionierten Hauptszenario mit einem hohen Wirkungsgrad der Hochtemperaturelektrolyse zur Erzeugung stromgenerierter Kraftstoffe und Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, -verlagerung und Förderung von Elektromobilität beläuft sich der *gesamte Strombedarf des Verkehrssektors auf 2.345 PJ* (Abbildung 25; ohne Seeverkehr). Der Strombedarf im Hauptszenario ist im Jahr 2050 damit um nur 67 PJ geringer als der Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Basisszenario. Er setzt sich zusammen aus dem Endenergiebedarf des Verkehrssektors (1.623 PJ) und dem Energiebedarf für die Erzeugung der Kraftstoffe (722 PJ).

Zum Vergleich: Der gesamte Stromverbrauch Deutschlands belief sich nach [AGEB 2012] im Jahr 2010 auf 1.859 PJ. Davon wurden 59 PJ im Verkehrssektor eingesetzt. Im Vergleich zu 2010 entsteht daher im Hauptszenario *im Jahr 2050 eine zusätzliche Stromnachfrage des Verkehrssektors in Höhe von 2.286 PJ*, die durch erneuerbare Energien gedeckt werden muss. Unter der Prämisse eines bis zum Jahr 2050 erneuerbaren Stromsektors können die Treibhausgasemissionen durch den Ersatz von konventionellen Kraftstoffen durch stromerzeugte Flüssigkraftstoffe massiv gesenkt werden.

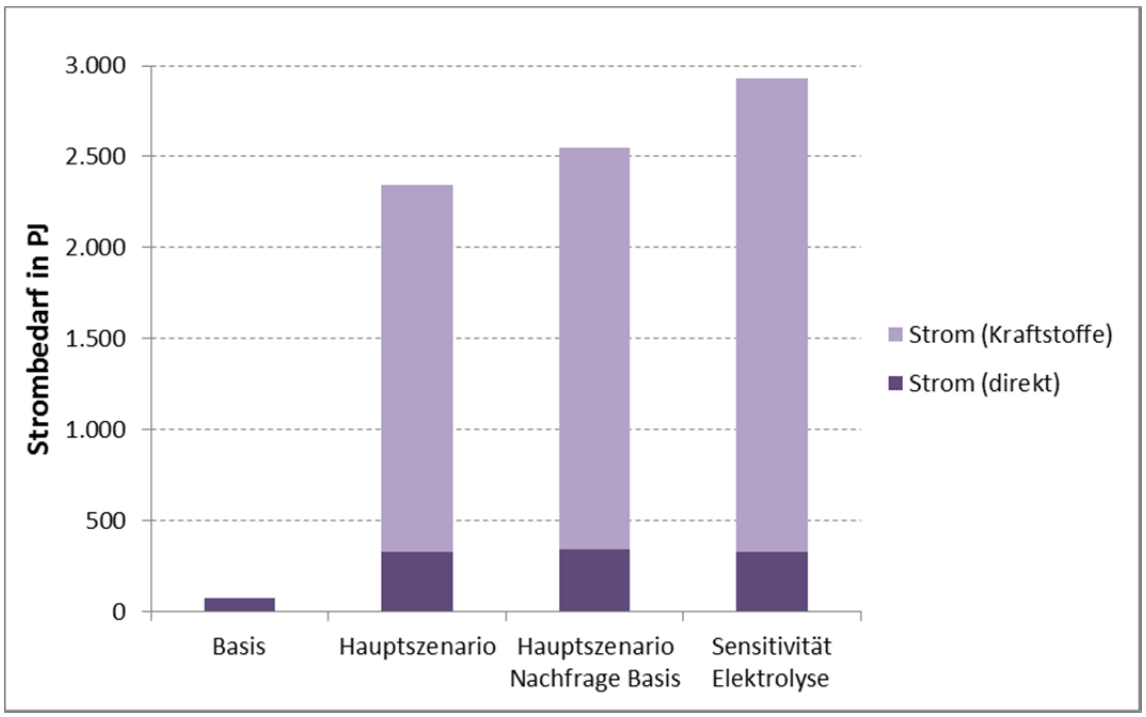

Abbildung 25: Strombedarf des Verkehrs in den Szenarien im Jahr 2050 im Vergleich (stromerzeugte Kraftstoffe einschließlich Strombedarf zur Herstellung; ohne Seeverkehr)

In Abbildung 25 ist der Strombedarf von Basis- und Hauptszenario sowie eine Variante „Hauptszenario + Nachfrage Basis“ und die „Sensitivität Elektrolyse“ dargestellt. Der Strombedarf der „Sensitivität Brennstoffzelle“ ist nur um 50 PJ höher als derjenige des Hauptszenarios und daher nicht aufgeführt.

Bei der Variante „Hauptszenario + Nachfrage Basis“ handelt es sich um ein kombiniertes Szenario mit der Verkehrsnachfrage des Basisszenarios und der Technologieentwicklung des Hauptszenarios. Dadurch wird der zusätzliche Strombedarf abgebildet für den Fall, dass keine Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung umgesetzt werden. Der in Abbildung 25 dargestellte Energiebedarf für diese Variante liegt im Jahr 2050 um 201 PJ höher als derjenige des Hauptszenarios. *Die Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung haben also trotz der konservativen Annahmen bei der Quantifizierung einen sichtbaren Effekt auf den Strombedarf.*

In der „Sensitivität Elektrolyse“ wird ein gegenüber dem Hauptszenario deutlich schlechterer Wirkungsgrad der Erzeugung stromgenerierter Flüssigkraftstoffe untersucht, wodurch sich der gesamte Strombedarf in der Sensitivität auf 2.927 PJ summiert und damit um knapp 600 PJ über dem Hauptszenario liegt. *Die hohe Relevanz des Wirkungsgrades für den Strombedarf macht deutlich, dass Szenarien mit Zeithorizont 2050, die sich auf noch nicht marktreife Technologien beziehen, mit hohen Unsicherheiten verbunden sind.*

Sowohl im Hauptszenario als auch in den beiden genannten Varianten beträgt der Anteil der stromerzeugten Kraftstoffe über 80 %. Dies liegt vor allem daran, dass beim Straßengüterverkehr von einem hohen Verkehrsleistungswachstum ausgegangen wird, aber keine Potentiale für den Einsatz von Elektrofahrzeugen im Schwerlastverkehr (Lkw > 12 t) angenommen werden. Gegenüber dem direkten Einsatz von Strom in Elektrofahrzeugen ist die Erzeugung stromgenerierter Kraftstoffe mit Umwandlungsverlusten verbunden, weshalb unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz je gefahrenem Kilometer der direkte Stromeinsatz in Elektrofahrzeugen zu bevorzugen ist. Demgegenüber liegen die Vorteile der stromerzeugten Kraftstoffe in der Möglichkeit der Stromspeicherung sowie in den Einsatzmöglichkeiten in nicht für die Elektrifizierung geeigneten Bereichen des Verkehrssektors. Die Vorteile stromgenerierter Kraftstoffe sind durch eine Energie- und Treibhausgasbilanz nur unzureichend abgebildet, da sie durch ihre Speicherfähigkeit von unkontrollierten Stromerzeugungsspitzen einen zusätzlichen Nutzen haben. Eine detaillierte Analyse der Effekte von großen Mengen stromerzeugter Kraftstoffe auf den Kraftwerkspark und die Stromerzeugung war in dieser Studie nicht möglich, sollte für zukünftige Verkehrsszenarien allerdings Teil der Fragestellung sein.[20] Ebenfalls sind Kostenbetrachtungen für die verschiedenen Antriebs- und Kraftstofftechnologien, welche in

[20] Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit untersucht das Öko-Institut in zwei aktuellen Forschungsvorhaben mögliche Wechselwirkungen zwischen Verkehrssektor und Energiewirtschaft im Kontext eines zunehmenden Einsatzes von elektrischen Fahrzeugantrieben und stromgenerierten Kraftstoffen bis zum Jahr 2050:

- „Wissenschaftliche Unterstützung bei der Erarbeitung von Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität zum langfristigen Klimaschutz“ (FKZ: UM 11 96 106)
- „Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität im Güter- und öffentlichen Personenverkehr zum langfristigen Klimaschutz“ (FKZ: 16 EM 1001)

dieser Studie nicht durchgeführt werden konnten, ein wichtiger Aspekt für eine umfassende Bewertung.

Ziel dieser Studie ist es, ein Verkehrsszenario für ein treibhausgasneutrales Deutschland in 2050 zu entwickeln. Mit dem Fokus auf strombasierte Kraftstoffe wurde in Absprache mit dem Auftraggeber ein Szenario entwickelt, in welchem der Endenergiebedarf zurückgeht, sich jedoch die Menge des dafür benötigten Stroms deutlich erhöht. Nur unter der Voraussetzung der ausreichenden Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien können die Treibhausgasemissionen in dem vorliegenden Szenario deutlich reduziert werden.

8 Vergleich mit anderen Studien

Abschließend soll ein kurzer Vergleich zu anderen Studien mit Verkehrsszenarien bis 2050 angestellt werden. Mehrere Studien untersuchen in Zielszenarien Pfade zum Erreichen vorgegebener Treibhausgasminderungsziele in Deutschland bis zum Jahr 2050. Zu nennen sind hier beispielsweise die „Energieszenarien für ein Energiekonzept“ [ENERGIESZENARIEN 2010], „Modell Deutschland“ [WWF 2009] und die „Leitstudie 2011“ [LEITSTUDIE 2011]. Außerdem existieren weitere Studien mit europäischem Bilanzraum (z.B. SULTAN 2010) oder mit Fokussierung auf den Stromsektor (z.B. UBA 2010). Da der Vergleich von Endergebnissen jedoch identische Bilanzgrenzen erfordert, werden im Folgenden nur die drei erstgenannten Studien für einen Vergleich herangezogen.

Zunächst werden die wesentlichen Charakteristika und Rahmenbedingungen der drei Studien dargestellt, um anschließend die wesentlichen Ergebnisse zu vergleichen. Gemeinsam ist den drei Studien, dass sie eine Gesamtbetrachtung aller Sektoren durchführen und sich an Zielvorgaben bezüglich der zu erreichenden Treibhausgasminderung bis zum Jahr 2050 orientieren (siehe die Übersicht in Tabelle 9).

Studie	Sektoren	Rahmenbedingungen Stromsektor	Zielvorgaben	Szenarien
UBA - Verkehr 2050	Verkehr	Anteil der EE am Primärenergieverbrauch des Stromsektors 100 %	Verkehrssektor 100% erneuerbar, ohne Biokraftstoffe	1 Basisszenario 1 Hauptszenario und 1 Sensitivität
Energieszenarien für ein Energiekonzept	alle	Anteil der EE am Primärenergieverbrauch ≥ 50 % Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke	Reduktion der THG-Emissionen um 85 % ggü. 1990	1 Referenzszenario 4 Zielszenarien
Modell Deutschland	alle	Anteil der EE am Primärenergieverbrauch ≥ 70 %	Reduktion der THG-Emissionen um 95 % ggü. 1990	1 Referenzszenario 1 Innovationsszenario
Leitstudie 2011	alle	Kein Ausbauziel der EE Betrachtung der ökonomischen Wirkung des EE-Ausbaus	Reduktion der THG-Emissionen um 85 % ggü. 1990	3 Szenarien mit unterschiedlichen Entwicklungspfaden im Verkehrssektor

Tabelle 9: Charakteristika ausgewählter Studien im Vergleich

8.1 Energieszenarien für ein Energiekonzept

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) wurde die Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ von der Arbeitsgemeinschaft Prognos, EWI und GWS erarbeitet [EK 2010]. Neben einem Referenzszenario

werden vier Szenarien mit den vorgegebenen Zielen der Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen bis 2050 um 85 % gegenüber 1990 bei einem Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch von mindestens 50 % im Jahr 2050 untersucht. Die vier Zielszenarien unterscheiden sich vor allem durch die Laufzeitverlängerung von Kernkraftwerken zwischen 4 und 28 Jahren gegenüber dem ursprünglich geplanten Atomausstieg. Separate Ziele für die einzelnen Verbrauchssektoren werden nicht vorgegeben.

Zukünftige Reduktionen von Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Verkehr werden in Referenz- wie auch Zielszenarien vor allem durch Erhöhungen der Fahrzeugeffizienz bei allen Verkehrsmitteln und die Substitution fossiler Energieträger durch Biokraftstoffe erreicht. Im Gegensatz zu allen anderen Verkehrssektoren wird für den Pkw-Verkehr zudem vom Einsatz neuer Antriebstechnologien, insbesondere von Elektro-fahrzeugen, ausgegangen. In gewissem Umfang werden, hauptsächlich im Güterverkehr, auch Verkehrsverlagerungen von der Straße auf andere Verkehrsträger angenommen. Die einzelnen Zielszenarien unterscheiden sich im Verkehr nur bei den angenommenen Neuzulassungsanteilen einzelner Pkw-Antriebstechnologien nach 2040.

8.2 Modell Deutschland

Die Studie „Modell Deutschland“ wurde von der Prognos AG und dem Öko-Institut e.V. erarbeitet und untersuchte im Auftrag des WWF Pfade für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland [WWF 2009]. Im Referenzszenario wird dabei eine ambitionierte Fortschreibung heutiger Energie- und Klimapolitik unterstellt. Das Innovationsszenario hat eine 95 %-ige Emissionsminderung bis zum Jahr 2050 als Zielvorgabe.

In beiden Szenarien werden im Verkehr ähnliche Instrumente für die Reduktion des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen angesetzt wie in der Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept“, es werden jedoch neben Elektroantrieben auch Brennstoffzellen- und Gasantriebe berücksichtigt.

8.3 Leitstudie 2011

Ein Konsortium aus dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) und dem Ingenieurbüro für neue Energien (IfNE) erarbeitet seit 2009 im Auftrag des Bundesumweltministeriums "Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland unter Berücksichtigung der europäischen und globalen Entwicklung" [BMU 2012]. Ziel der „Leitstudie 2011“ ist es, aufzuzeigen, wie die im Energiekonzept der Bundesregierung beschlossenen energie- und klimapolitischen Ziele erreicht bzw. übertroffen werden können. Als Zielgröße für die Szenarienentwicklung wurde eine Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 um mindestens 85 % gegenüber 1990 vorgegeben, im Jahr 2020 soll als Zwischenziel bereits eine Minderung von 40 % erreicht werden. Betrachtet werden dabei alle energienachfragenden Sektoren; Teilziele für die einzelnen Sektoren wurden nicht vorgegeben. Im Gegensatz zu den Studien

„Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ und „Modell Deutschland“ werden keine Vorgaben für den Ausbau erneuerbarer Energien gemacht. Vielmehr wird ihre ökonomische Wirkung betrachtet und somit der Ausbau der erneuerbaren Energien bestimmt.

Betrachtet werden alle Sektoren in drei verschiedenen Szenarien (A-C), wobei sich diese vor allem in Bezug auf den Verkehrssektor unterscheiden, und zwar hinsichtlich der verwendeten Antriebe und Kraftstoffe. Der Anteil der elektrischen Pkw und Plug-In-Hybridfahrzeuge an der Fahrleistung im Jahr 2050 beträgt bei allen Szenarien mindestens 50% und im Szenario C sogar 100 %. Szenario A fokussiert auf die Erzeugung und Nutzung von stromerzeugtem Wasserstoff; Szenario B modelliert dagegen die zusätzliche Methanisierung von Wasserstoff zu stromerzeugtem Methan und dessen Nutzung in Gasfahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen (via On-Site-Reformierung von stromerzeugtem Methan).

8.4 Endenergiebedarf im Vergleich

In Abbildung 26 ist der Endenergiebedarf im Verkehrssektor im Jahr 2050 für verschiedene Szenarien der oben genannten und dieser Studie dargestellt. Relevante Unterschiede zwischen den Studien bestehen sowohl bei der Höhe des Endenergiebedarfs im Verkehr als auch in Bezug auf die eingesetzten Energieträger.

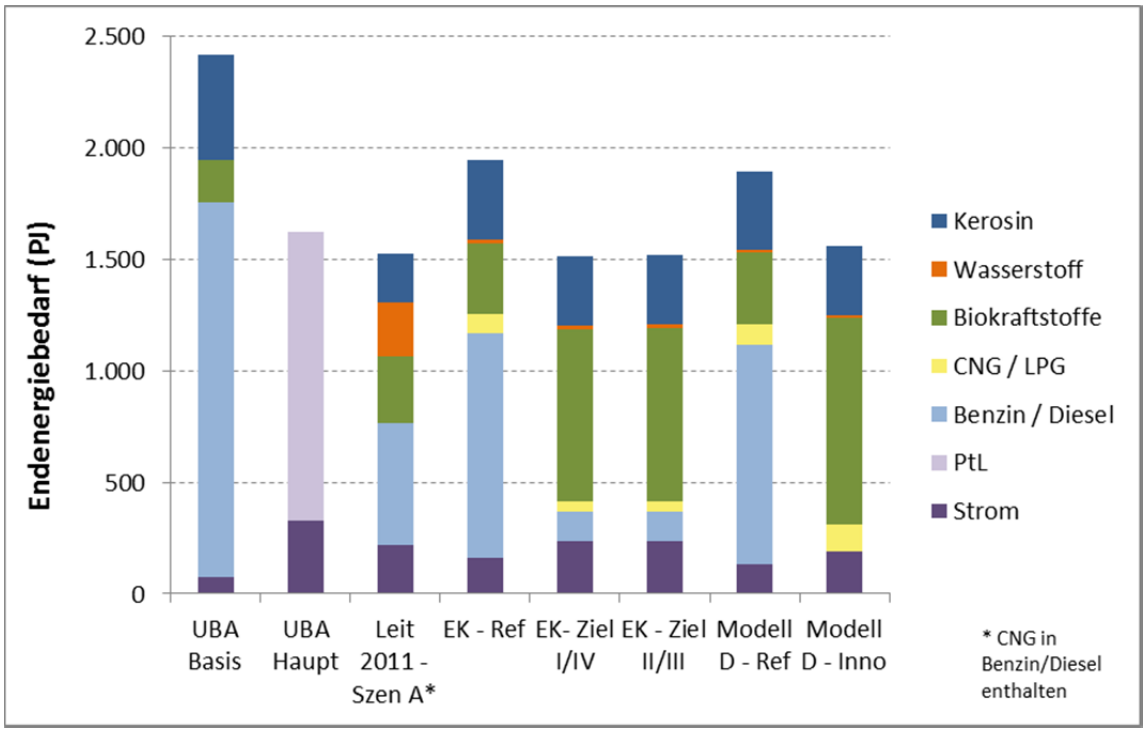

Abbildung 26: Studienvergleich zum Endenergiebedarf 2050 im Verkehr (ohne Seeverkehr)

Auffällig ist zunächst einmal der hohe Endenergiebedarf im Basisszenario der vorliegenden Studie (UBA Basis) gegenüber den Referenzszenarien der anderen drei Studien. Wie in

Abschnitt 4.2 dargestellt, liegt dies vor allem an dem sich aus der Entwicklung der Einwohnerkilometerzahl und der Transportintensitäten ableitenden stärkeren Verkehrsleistungswachstum in der vorliegenden Studie.

Der Endenergiebedarf des Hauptszenarios liegt auf Grund der Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung sowie durch einen relativ hohen Anteil von effizienten elektrischen Fahrzeugen deutlich niedriger als derjenige des Basisszenarios, aber bedingt durch das hohe Ausgangsniveau immer noch etwas höher als der Endenergiebedarf in den Zielszenarien der übrigen drei Studien.

Bei den eingesetzten Energieträgern bestehen die größten Unterschiede im Umfang der eingesetzten Biokraftstoffe. Dieser liegt in allen zum Vergleich herangezogenen Studien bei mindestens 300 PJ und in vielen Zielszenarien deutlich darüber. Dabei fällt der Anteil der Biokraftstoffe in der neusten Studie (der Leitstudie 2011) am geringsten aus und wird zu einem Anteil von fast 40 % im Luftverkehr (BtL-Kraftstoffe, Biomass-To-Liquid) eingesetzt. Dies korreliert mit den zunehmenden wissenschaftlichen Studien, welche auf die Begrenzungen der nachhaltigen Biokraftstoffpotenziale hinweisen und deren Emissionsminderungspotenziale zunehmend negativer bewerten (siehe Abschnitt 4.4.3). Der im Verkehr direkt eingesetzte Strom ist demgegenüber im Hauptszenario mit 328 PJ etwas höher als in den Zielszenarien der übrigen Studien. Dies ist auf den hohen Anteil von Elektrofahrzeugen zurückzuführen: 277 PJ Strom werden von Elektro-Pkw und 17 PJ von leichten Nutzfahrzeugen und kleinen Lkw verbraucht.

Abschließend ist anzumerken, dass der Endenergiebedarf des in dieser Studie entwickelten Hauptszenarios durchaus in vergleichbarer Größenordnung zu den ambitionierten Szenarien anderer Studien liegt. Unterschiede zeigen sich allerdings im Technologieeinsatz, so dass die verschiedenen Szenarien jeweils mögliche Entwicklungen zur Emissionsreduktion darstellen.

9 Literatur

AGEB 2011 AG Energiebilanzen: Energieverbrauch in Deutschland, Daten für das 1.-4. Quartal 2011. 2011.

AGEB 2012 AG Energiebilanzen: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2011.

AGEE 2011 "Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien - Statistik (AGEE): Erneuerbare Energien 2010. Daten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2010 auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Stand März 2011"

BAST 2010 Bundesanstalt für Straßenwesen: Tempolimit auf Autobahnen 2008. Schlussbericht zum Arbeitsprogramm-Projekt F1100.6608018. Juli 2010.

BAZARI 2011 Bazari, Zabi (Lloyd's Register); Longva, Tore (DNV): Assessment of IMO mandated energy efficiency measures for international shipping. Annex to MEPC 63/INF.2. London/Oslo Oktober 2011.

CIESIN 2002 Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), 2002. Country-level GDP and Downscaled Projections based on the A1, A2, B1, and B2 Marker Scenarios, 1990-2100, [digital version]. Palisades, NY: CIESIN, Columbia University. Verfügbar unter http://www.ciesin.columbia.edu/datasets/downscaled. (Download vom 18.09.2012)

DESTATIS 2009 Statistisches Bundesamt: Bevölkerung bis 2060. Ergebnisse der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden 2009.

DESTATIS 2011 Statistisches Bundesamt: Verkehr im Überblick 2010. Wiesbaden 2011.

DESTATIS 2012a Statistisches Bundesamt: Datenbank Genesis, Tabelle 46100-0100. Download vom 23.04.2012. https://www-genesis.destatis.de/

DESTATIS 2012b Statistisches Bundesamt: Elektrizitätserzeugung, Nettowärmeerzeugung, Brennstoffeinsatz – Deutschland 2010, Download aus GENESIS-Datenbank am 11.04.2012.

DESTATIS 2012c Statistisches Bundesamt: Fachserie 8 Reihe 5 – Seeschifffahrt. Ausgabe März 2012. Wiesbaden, Juli 2012.

DESTATIS 2012d Statistisches Bundesamt: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Fachserie 18 Reihe 1.4. Wiesbaden 2012.

DMA 2012 Danish Maritime Authority: North European LNG Infrastructure Project. A feasibility study for an LNG fillings station infrastructure and test of recommendations. März 2012

ENERGIESZENARIEN 2010 Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, Projekt Nr. 12/10, ewi, gws, Prognos, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, August 2010

ENERGIESZENARIEN 2011 ewi, gws, Prognos: Energieszenarien 2011. im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Juli 2011

FIFO 2011 Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln: Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU. Mai 2011.

FOSTER et al. 2007 Forster, P., V. Ramaswamy et al.: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge und New York 2007, S. 212

FUGLESTVEDT 2009 Fuglestvedt et al.: Transport impact on atmosphere and climate: Metrics. In: Atmospheric Environment. April 2009

GEMIS 4.7 Öko-Institut. Global Emission Model for Integrated Systems (GEMIS). Version 4.7, 2011.

GHG-TRANSPORD 2009 EU-Forschungsprojekt GHG-TransporD, www.ghg-transpord.eu

ICCT 2012 Mock, Peter (ICCT) et al.: Discrepancies between type-approval and “real-world” fuel-consumption and CO_2 values. Assessment for 2001-2011 European passenger cars. April 2012.

IFEU/ÖI 2011 Aktualisierung der Emissionsfaktoren und Verkehrsleistungen von Binnenschiffen und Übertragung ins TREMOD-Programm. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dezember 2011

IFPRI 2011 Laborde, David (IFPRI): Assessing the Land Use Change Consequence of European Biofuel Policies. Final Report. October 2011

IMO 2009 International Maritime Organization: Second IMO GHG Study 2009.

KBA 2011 Kraftfahrtbundesamt: Fahrzeugzulassungen. Neuzulassungen und Besitzumschreibungen von Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen - Jahr 2010, FZ14. 2011.

KBA 2012 Kraftfahrtbundesamt: Statistik "Inlandsverkehr - Deutschland und seine Länder in den Jahren 2010 und 2009". Datenbasis: Nationale Erhebung zum Güterkraftverkehr deutscher Fahrzeuge; Tabellen D3.1/D4 gemäß Anhang D der Verordnung (EG) Nr. 6/2003 zum Güterkraftverkehr ausländischer Fahrzeuge (aus der EU-27 ohne Malta sowie aus Kroatien, Liechtenstein, Norwegen und der Schweiz), zu Fahrzeugen aus Belgien, Italien, Luxemburg und Rumänien ohne Leerfahrten. Meldestand: 16.01.2012. Download unter http://www.kba.de/cln_030/nn_125286/DE/Statistik/Kraftverkehr/europaeischerLastkraftfahrzeuge/Inlandsverkehr/2010__ve3__bl__4.html

KLOESS 2011 Kloess, Maximilian (TU Wien) u.a.: Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050. Januar 2011.

LEITSTUDIE 2010 Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, „Leitstudie 2010“, DLR, IWES, IFNE im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Dezember 2010

LEITSTUDIE 2011 Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, „Leitstudie 2011“, DLR, IWES, IFNE im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2012.

MiD 2008 DLR u.a.: Mobilität in Deutschland. Befragung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung. www.mobilität-in-Deutschland.de

NITSCH 2003 Nitsch, Joachim (DLR): Potenziale der Wasserstoffwirtschaft – Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003 „Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit“, Berlin, Heidelberg, 2003

NRC 2008 National Research Council: Review of the 21st Century Truck Partnership. Washington 2008

NRC 2010 National Research Council: Technologies And Approaches to Reducint the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty-Vehicles. Washington, 2010.

OPTUM 2011 Hacker, Florian (Öko-Institut) u.a.: Marktpotenziale und CO_2-Bilanz von Elektromobilität – Arbeitspakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Berlin, 2011

PACHE 2005 Pache, E.: Möglichkeiten der Einführung einer Kerosinsteuer auf innerdeutschen Flügen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin, April 2005.

POLITIKSZENARIEN V Matthes, Felix (Öko-Institut) u.a.: Politikszenarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel. 2009.

REN II Renewbility II Forschungsvorhaben „Weiterentwicklung des Analyseinstrumentes Renewbility“ (Förderkennzeichen: 371096175)

SAFARIANOVA 2009 Safarianova, Sara (ETH Zürich) u.a.: Techno-Economic Analysis of Low-GHG Emission Light, Medium and Heavy Duty Vehicles

SCHMIED 2010 Schmied, Martin; Kranke, Andre; Schön, Andrea Dorothea: CO_2-Berechnung in der Logistik. 2011.

SRU 2012 Sachverständigenrat für Umweltfragen: Umweltgutachten 2012 – Verantwortung in einer begrenzten Welt. Juni 2012.

SULTAN 2010 Hill N., Morris, M., Skinner I. SULTAN: Development of an Illustrative Scenarios Tool for Assessing Potential Impacts of Measures on EU Transport GHG. Bericht im Rahmen des Projektes EU Transport GHG: Routes to 2050? Im Auftrag der EU Kommission DG Clima, AEA, London: 2010.

SUNFIRE 2012 Olshausen, Christian (SunFire GmbH): SunFire – Konzept zur elektrisch-katalytischen Erzeugung von Kraftstoff aus Wasser und Kohlendioxid. Präsentation bei: „Wohin mit dem CO_2" – Handelskammer Hamburg. 2012

TNO et al. 2011 TNO et al.: Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO_2 emissions from cars, 2011.

TREMOD 5.25 Transport Emission Model, Version 5.25, Datenauszug.

TREMOD-AV 2010 Knörr, Wolfram (IFEU); Schacht, Alexander (IFEU); Gores, Sabine (Öko-Institut e.V.): Entwicklung eines eigenständigen Modells zur Berechnung des Flugverkehrs (TREMOD-AV). Berlin 2010.

TRL 2009 Emission factors 2009. Report 3 - exhaust emission factors for road vehicles in the UK. Juni 2009.

UBA 2010 Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen. UBA, IWES im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau Juli 2010.

UBA 2010a Umweltbundesamt: CO_2 -Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Dessau-Roßlau, März 2010

UNCTAD 2011 United Nations Conference on Trade and Development: Review of Maritime Transport 2011.

ViZ 09/10 Verkehr in Zahlen 2009/2010. DIW im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Oktober 2009.

WEISSBUCH 2011 Europäische Kommission: Weissbuch. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum: Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. Brüssel, März 2011.

WELTBANK 2012 Datenbank "Global Economic Prospects". Download vom 7.4.2012 databank.worldbank.org/data/home.aspx

WIETSCHEL 2010 Wietschel, Martin (Fraunhofer ISI), Bünger, Ulrich (LBST), Weindorf, Werner (LBST): Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO_2-freie Endenergieträger. Studie im Auftrag der RWE AG. Karlsruhe, Mai 2010.

WWF 2009 Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Prognos, Öko-Institut im Auftrag des WWF, Oktober 2009

10 Anhang: Tabellen

10.1 Verkehrsnachfrage

Personenverkehrsnachfrage Basisszenario (Mrd. pkm)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
MIV	905	1.034	1.135	1.144	1.087
Flugzeug	194	252	307	341	324
Bahn	99	96	96	97	92
Bus	62	57	57	57	54
NMIV	67	65	64	62	59
gesamt	1.326	1.504	1.659	1.701	1.616

Personenverkehrsnachfrage Hauptszenario (Mrd. pkm)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
MIV	905	1.003	1.093	1.094	1.033
Flugzeug	194	236	288	319	303
Bahn	99	96	96	97	92
Bus	62	57	57	57	54
NMIV	67	71	77	82	84
gesamt	1.326	1.463	1.611	1.649	1.566

Tabelle 10: Verkehrsleistung Personenverkehr

Güterverkehrsnachfrage Basisszenario (Mrd. tkm)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Straße	443	614	754	834	935
Bahn	107	146	173	191	214
Binnenschiff	62	74	78	87	97
Flugzeug	11	13	18	21	24
Seeschiff	3.310	3.860	4.409	4.958	5.508
gesamt (ohne Seegüterverkehr)	624	847	1.022	1.133	1.271
gesamt (inkl. Seegüterverkehr)	3.934	4.707	5.431	6.092	6.778

Güterverkehrsnachfrage Hauptszenario (Mrd. tkm)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Straße	443	597	641	712	801
Bahn	107	162	203	225	253
Binnenschiff	62	74	71	79	89
Flugzeug	11	13	18	21	24
Seeschiff	3.310	3.860	4.409	4.958	5.508
gesamt (ohne Seegüterverkehr)	624	847	933	1.038	1.167
gesamt (inkl. Seegüterverkehr)	3.934	4.707	5.342	5.996	6.675

Tabelle 11: Verkehrsleistung Güterverkehr

Fahrleistung Pkw Basisszenario (Mrd. km)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Dieselmotor	230	339	380	374	318
Elektroantrieb	0	0	0	1	9
Ottomotor	321	339	366	364	312
Hybridantrieb (Benzin)	0	0	0	7	44
Hybridantrieb (Diesel)	0	0	0	6	32
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	0	0
gesamt	551	678	746	752	715

Fahrleistung Pkw Hauptszenario (Mrd. km)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Dieselmotor	230	302	202	86	31
Elektroantrieb	0	2	14	33	45
Ottomotor	321	336	337	219	92
Hybridantrieb (Benzin)	0	11	123	307	417
Hybridantrieb (Diesel)	0	7	41	75	94
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	0	0
gesamt	551	658	718	719	679

Fahrleistung Pkw Sensitivität Brennstoffzelle (Mrd. km)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Dieselmotor	230	304	210	96	37
Elektroantrieb	0	2	14	33	45
Ottomotor	321	337	348	237	105
Hybridantrieb (Benzin)	0	10	108	269	364
Hybridantrieb (Diesel)	0	6	35	63	78
Brennstoffzellenantrieb	0	0	3	22	49
gesamt	551	658	718	719	679

Tabelle 12: Fahrleistung der Pkw nach Antriebstypen

Fahrleistung Lkw Basisszenario (Mrd. km)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Dieselmotor	78	99	114	126	141
Elektroantrieb	0	0	0	0	0
Hybridantrieb	0	0	0	0	0
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	0	0
gesamt	78	99	114	126	141

Fahrleistung Lkw Hauptszenario (Mrd. km)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Dieselmotor	78	96	92	88	87
Elektroantrieb	0	0	0	2	4
Hybridantrieb	0	1	6	18	31
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	0	0
gesamt	78	96	98	109	122

Fahrleistung Lkw Sensitivität Brennstoffzelle (Mrd. km)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Dieselmotor	78	96	92	89	88
Elektroantrieb	0	0	0	2	4
Hybridantrieb	0	1	4	13	23
Brennstoffzellenantrieb	0	0	1	4	8
gesamt	78	96	98	109	122

Tabelle 13: Fahrleistung der Lkw nach Antriebstypen

10.2 Endenergiebedarf

Endenergiebedarf Basisszenario (PJ)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Güterverkehr (ohne Seeschiffahrt)	723	912	987	1.009	1.058
Personenverkehr	1.829	1.859	1.694	1.558	1.354
Seegüterverkehr	599	632	649	646	626
gesamt (ohne Seegüterverkehr)	2.552	2.771	2.681	2.567	2.412
gesamt (inkl. Seegüterverkehr)	3.152	3.403	3.330	3.213	3.038

Endenergiebedarf Hauptszenario (PJ)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Güterverkehr (ohne Seeschiffahrt)	723	845	774	714	665
Personenverkehr	1.825	1.732	1.449	1.194	958
Seegüterverkehr	599	632	649	646	626
gesamt (ohne Seegüterverkehr)	2.548	2.577	2.223	1.908	1.623
gesamt (inkl. Seegüterverkehr)	3.148	3.209	2.871	2.554	2.248

Endenergiebedarf Sensitivität Brennstoffzelle (PJ)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Güterverkehr (ohne Seeschiffahrt)	723	845	775	717	669
Personenverkehr	1.825	1.733	1.459	1.210	973
Seegüterverkehr	599	632	649	646	626
gesamt (ohne Seegüterverkehr)	2.548	2.579	2.234	1.927	1.642
gesamt (inkl. Seegüterverkehr)	3.148	3.211	2.883	2.573	2.267

Tabelle 14: Endenergiebedarf nach Verkehrsträgern

Endenergiebedarf Basisszenario (PJ)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Benzin (Bio)	34	76	62	55	47
Benzin (fossil)	877	685	561	494	419
Diesel (Bio)	88	154	152	146	140
Diesel (fossil)	1.153	1.384	1.369	1.315	1.262
Kerosin	362	435	499	516	472
Schiffstreibstoff	599	632	649	646	626
stromerzeugte Kraftstoffe	0	0	0	0	0
Wasserstoff	0	0	0	0	0
Strom	39	38	36	41	73

Endenergiebedarf Hauptszenario (PJ)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Benzin (Bio)	34	76	33	0	0
Benzin (fossil)	876	680	403	170	0
Diesel (Bio)	88	141	53	0	0
Diesel (fossil)	1.151	1.267	653	263	0
Kerosin	362	362	246	114	0
Schiffstreibstoff	599	632	432	215	0
stromerzeugte Kraftstoffe	0	0	910	1.526	1.921
Wasserstoff	0	0	0	0	0
Strom	39	51	141	265	328

Endenergiebedarf Sensitivität Brennstoffzelle (PJ)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Benzin (Bio)	34	76	33	0	0
Benzin (fossil)	876	681	408	173	0
Diesel (Bio)	88	141	54	0	0
Diesel (fossil)	1.151	1.269	660	267	0
Kerosin	362	362	246	114	0
Schiffstreibstoff	599	632	432	215	0
stromerzeugte Kraftstoffe	0	0	917	1.537	1.911
Wasserstoff	0	0	5	32	68
Strom	39	50	128	235	289

Tabelle 15: Endenergiebedarf nach Kraftstoffen

10.3 Strombedarf

Strombedarf Basisszenario (PJ)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
direkte Nutzung / Fahrstrom	39	38	36	41	73
davon Bahn/SSU	39	38	36	34	31
davon Pkw	0	0	0	8	42
Schiffstreibstoff (inkl. Herstellung)	0	0	0	0	0
gesamt (ohne Schiffstreibstoff)	39	38	36	41	73
gesamt (inkl. Schiffstreibstoff)	39	38	36	41	73

Strombedarf Hauptszenario (PJ)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Fahrstrom	39	51	141	265	328
Kraftstoffe (ohne Schiffstreibstoff)	0	0	1.530	1.974	2.018
dav. Energiegehalt	0	0	694	1.095	1.295
dav. Herstellung	0	0	836	879	722
Schiffstreibstoff (inkl. Herstellung)	0	0	477	776	975
gesamt (ohne Schiffstreibstoff)	39	51	1.671	2.239	2.345
gesamt (inkl. Schiffstreibstoff)	39	51	2.148	3.015	3.320

Strombedarf Sensitivität Elektrolyse (PJ)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Fahrstrom	39	51	141	265	328
Kraftstoffe (ohne Schiffstreibstoff)	0	0	3.305	3.949	3.905
dav. Energiegehalt	0	0	1.306	1.427	1.305
dav. Herstellung	0	0	2.000	2.522	2.600
Schiffstreibstoff (inkl. Herstellung)	0	0	623	992	1.256
gesamt (ohne Schiffstreibstoff)	39	51	3.446	4.214	4.232
gesamt (inkl. Schiffstreibstoff)	39	51	4.069	5.206	5.488

Tabelle 16: Strombedarf

10.4 Treibhausgasemissionen (rein erneuerbarer Strom für PtL)

Treibhausgasemissionen Basisszenario (Mio. Tonnen CO2-Äquivalente)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Straßengüterverkehr	51	63	65	65	68
Flugverkehr (GV)	9	10	13	14	14
Übriger GV (Bahn und Binnenschiff)	7	6	5	4	3
Flugverkehr (PV)	24	29	32	32	28
MIV	132	125	106	95	80
ÖPV (landgebunden)	9	7	5	4	2
Seegüterverkehr	50	53	55	54	53
gesamt ohne Seegüterverkehr	233	241	225	214	196
gesamt inkl. Seegüterverkehr	283	294	280	268	249

Treibhausgasemissionen Hauptszenario (Mio. Tonnen CO2-Äquivalente)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Straßengüterverkehr	51	59	39	24	9
Flugverkehr (GV)	9	9	7	5	2
Übriger GV (Bahn und Binnenschiff)	7	6	4	2	1
Flugverkehr (PV)	24	24	18	10	3
MIV	132	120	76	39	11
ÖPV (landgebunden)	9	7	4	2	1
Seegüterverkehr	50	53	42	27	11
gesamt ohne Seegüterverkehr	232	225	148	82	27
gesamt inkl. Seegüterverkehr	283	278	190	109	38

Tabelle 17: Treibhausgasemissionen im Basis- und Hauptszenario (Sensitivität 1: rein erneuerbarer Strom für PtL)

Treibhausgasemissionen Sensitivität Elektrolyse (Mio. Tonnen CO2-Äquivalente)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Straßengüterverkehr	51	59	41	26	11
Flugverkehr (GV)	9	9	8	5	2
Übriger GV (Bahn und Binnenschiff)	7	6	4	2	1
Flugverkehr (PV)	24	24	18	11	4
MIV	132	120	78	42	13
ÖPV (landgebunden)	9	7	4	2	1
Seegüterverkehr	50	53	43	30	14
gesamt ohne Seegüterverkehr	232	225	303	166	33
gesamt inkl. Seegüterverkehr	283	278	393	227	47

Treibhausgasemissionen Sensitivität Brennstoffzelle (Mio. Tonnen CO2-Äquivalente)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Straßengüterverkehr	51	59	39	24	9
Flugverkehr (GV)	9	9	6	4	1
Übriger GV (Bahn und Binnenschiff)	7	6	4	2	1
Flugverkehr (PV)	24	24	16	9	3
MIV	132	120	67	38	13
ÖPV (landgebunden)	9	7	4	2	1
Seegüterverkehr	50	53	36	24	9
gesamt ohne Seegüterverkehr	232	225	265	146	27
gesamt inkl. Seegüterverkehr	283	278	342	197	38

Tabelle 18: Treibhausgasemissionen in den Sensitivitäten (Sensitivität 1: rein erneuerbarer Strom für PtL)

10.5 Treibhausgasemissionen (Emissionen für PtL nach Kraftwerksparkentwicklung)

Treibhausgasemissionen Hauptszenario (Mio. Tonnen CO2-Äquivalente)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Straßengüterverkehr	51	59	39	24	9
Flugverkehr (GV)	9	9	7	5	2
Übriger GV (Bahn und Binnenschiff)	7	6	4	2	1
Flugverkehr (PV)	24	24	18	10	3
MIV	132	120	76	39	11
ÖPV (landgebunden)	9	7	4	2	1
Seegüterverkehr	50	53	42	27	11
gesamt ohne Seegüterverkehr	232	225	148	82	27
gesamt inkl. Seegüterverkehr	283	278	190	109	38

Treibhausgasemissionen Sensitivität Elektrolyse (Mio. Tonnen CO2-Äquivalente)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Straßengüterverkehr	51	59	41	26	11
Flugverkehr (GV)	9	9	8	5	2
Übriger GV (Bahn und Binnenschiff)	7	6	4	2	1
Flugverkehr (PV)	24	24	18	11	4
MIV	132	120	78	42	13
ÖPV (landgebunden)	9	7	4	2	1
Seegüterverkehr	50	53	43	30	14
gesamt ohne Seegüterverkehr	232	225	303	166	33
gesamt inkl. Seegüterverkehr	283	278	393	227	47

Treibhausgasemissionen Sensitivität Brennstoffzelle (Mio. Tonnen CO2-Äquivalente)					
	2010	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Straßengüterverkehr	51	59	39	24	9
Flugverkehr (GV)	9	9	6	4	1
Übriger GV (Bahn und Binnenschiff)	7	6	4	2	1
Flugverkehr (PV)	24	24	16	9	3
MIV	132	120	67	38	13
ÖPV (landgebunden)	9	7	4	2	1
Seegüterverkehr	50	53	36	24	9
gesamt ohne Seegüterverkehr	232	225	265	146	27
gesamt inkl. Seegüterverkehr	283	278	342	197	38

Tabelle 19: Treibhausgasemissionen in den Szenarien (Sensitivität 2: Emissionen für PtL nach Kraftwerksparkentwicklung)