

Analyse aktueller Szenarien zur Entwicklung des Verkehrs in Deutschland und dessen Umweltwirkungen

Kurzstudie im Rahmen der

Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima

des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)
AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40,

Hauptauftragnehmer:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin
Tel.: 030 67055-221, Fax: -283

im Unterauftrag: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg
Tel.: 06221 4767-35

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)
Daimlerstraße. 15, 85521 Ottobrunn
Tel.: 089 608110-0

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
Tel.: 0341 2434-423

Erstellt von

F. Dünnebeil, U. Lambrecht (IFEU), M. Goletz (DLR), W. Zittel, P. Schmidt (LBST),
F. Müller-Langer, K. Naumann (DBFZ)

Heidelberg, Berlin, Ottobrunn, Leipzig, September 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Aktuelle Studien zur zukünftigen Entwicklung des Verkehrs in Deutschland und daraus resultierenden Umweltwirkungen.....	8
2.1	Abgrenzungen des Verkehrssektors und erfasste Umweltwirkungen.....	13
2.2	Szenarien in den untersuchten Studien	15
3	Modellierung zukünftiger Entwicklungen im Verkehr und damit verbundener Energieverbräuche in den untersuchten Studien.....	18
3.1	Zukünftige Entwicklung der Verkehrsnachfrage	18
3.1.1	Entwicklung von Verkehrsleistungen und Modal-Split.....	18
3.1.2	Wesentliche Erkenntnisse für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie	27
3.2	Entwicklung von Antriebstechnologien und Energieeffizienz.....	29
3.2.1	Pkw	29
3.2.2	Lkw und Busse	37
3.2.3	Übrige Verkehrsmittel	39
3.2.4	Wesentliche Erkenntnisse für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie	41
3.3	Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehr	43
3.3.1	Entwicklung der Biokraftstoffnutzung in den untersuchten Studien	43
3.3.2	Wesentliche Erkenntnisse für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie	47
3.4	Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor.....	49
3.4.1	Gesamter Endenergieverbrauch im Verkehrssektor	49
3.4.2	Deckung des Endenergiebedarfs im Verkehr durch fossile Kraftstoffe und alternative Endenergieträger.....	53
3.4.3	Wesentliche Erkenntnisse für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie	55
4	Fazit und Empfehlungen	59
5	Literaturverzeichnis.....	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der Verkehrsleistungen im motorisierten Personenverkehr in den Trend-/Referenzszenarien der ausgewählten Studien	19
Abbildung 2:	Entwicklung der Verkehrsleistungen im Güterverkehr in den Trend-/Referenzszenarien der ausgewählten Studien	20
Abbildung 3:	Vergleich der Verkehrsleistungen 2030 und 2050 in Referenz- und Maßnahmen­szenarien.....	21
Abbildung 4:	Korrelationen der Entwicklung der Personenverkehrsleistungen in den Referenzszenarien zur Bevölkerungsentwicklung.....	26
Abbildung 5:	Korrelationen der Entwicklung der Güterverkehrsleistungen in den Referenzszenarien zur Wirtschaftsentwicklung (BIP)	27
Abbildung 6:	Zusammensetzung der Pkw-Bestände nach Antriebstechnologien in den Referenzszenarien der untersuchten Studien	30
Abbildung 7:	Zusammensetzung von Pkw-Beständen bzw. Pkw-Fahrleistungen nach Antriebstechnologien in maßnahmenorientierten Szenarien	31
Abbildung 8:	Entwicklung der Energieeffizienz von Pkw nach Antriebstechnologien in den Referenzszenarien der untersuchten Studien	33
Abbildung 9:	Änderungen der spezifischen Energieverbräuche von Pkw in Zielszenarien gegenüber den Referenzszenarien in Modell Deutschland und Energieszenarien	34
Abbildung 10:	Entwicklung der Energieeffizienz im Schienen-, Binnenschiff- und Flugverkehr in den untersuchten Studien	41
Abbildung 11:	Szenarienwerte der Gesamtmengen von Biokraftstoffen im Verkehr	45
Abbildung 12:	Biokraftstoffeinsatz bei verschiedenen Verkehrsträgern	46
Abbildung 13:	Endenergieverbrauch im Gesamtverkehr in den untersuchten Szenarien	49
Abbildung 14:	Endenergieverbrauch im Personen- und Güterverkehr in den untersuchten Szenarien.....	51
Abbildung 15:	Durchschnittlicher Endenergieverbrauch pro Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr in den untersuchten Referenzszenarien.....	52
Abbildung 16:	Verbrauchsentwicklung alternativer Endenergieträger (Strom, strombasierte Kraftstoffe, Biokraftstoffe) im Verkehr in den Szenarien	53
Abbildung 17:	Entwicklung des Bedarfs an fossilen Kraftstoffen im Verkehr in den untersuchten Szenarien.....	54
Abbildung 18:	Deckung des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor durch fossile Kraftstoffe und alternative Energieträger in den Jahren 2030 und 2050	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Übersicht der ausgewerteten Studien mit Szenarien für Deutschland zur Verkehrsentwicklung und verkehrsbedingten Umweltwirkungen.....	9
Tabelle 2:	Abgrenzungen des Verkehrssektors und erfasste Umweltwirkungen in den untersuchten Studien.....	15
Tabelle 3:	Übersicht der Szenarien in den untersuchten Studien	17
Tabelle 4:	Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung in Modell Deutschland.....	22
Tabelle 5:	Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung in den Energieszenarien	23
Tabelle 6:	Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung in der Leitstudie 2011	23
Tabelle 7:	Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung in TREMOD	23
Tabelle 8:	Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung in Renewbility.....	24
Tabelle 9:	Methodische Erläuterungen zu den Pkw-Flotten in Modell Deutschland.....	35
Tabelle 10:	Methodische Erläuterungen zu den Pkw-Flotten in den Energieszenarien.....	36
Tabelle 11:	Methodische Erläuterungen zu den Pkw-Flotten in der Leitstudie 2011	36
Tabelle 12:	Methodische Erläuterungen zur Pkw-Flotte in TREMOD	36
Tabelle 13:	Methodische Erläuterungen zu den Pkw-Flotten in Renewbility.....	37
Tabelle 14:	Angaben zu Beständen, Fahrleistungen und Effizienzentwicklung von Lkw und Bussen in den untersuchten Studien	37

1 Einleitung

Fragestellung der Kurzstudie

Die zukünftige Entwicklung des Verkehrs ist in den letzten Jahren in einer Vielzahl von Studien behandelt worden. Eine wichtige Fragestellung ist, wie sich der Energieverbrauch und der Emissionsausstoß entwickeln werden und welche Möglichkeiten existieren, um diese Entwicklung zu beeinflussen. Diese Fragen wurden häufig mithilfe von Szenarien untersucht.

Für diese Szenariestudien wurden im Auftrag der öffentlichen Hand, der Privatwirtschaft oder von NGO's vornehmlich Forschungseinrichtungen damit beauftragt, zukünftige Entwicklungspfade des Verkehrs zu beschreiben und die Wirkungen auf den Verkehr und mit diesem verbundene Einflussbereiche zu ermitteln. Im Detail gibt es große Unterschiede zwischen den einzelnen Studien und den zugrunde liegenden Annahmen, etwa hinsichtlich der verkehrlichen Entwicklung, dem technischen Fortschritt oder den sozialen wie wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Auch die methodische Herangehensweise, etwa um den Einfluss und die Wirkung mittels Modellierung zu quantifizieren, unterscheiden sich in der Regel voneinander. Nicht zuletzt finden, bedingt durch unterschiedliche Fragestellungen und Ziele, auch unterschiedliche Annahmen Eingang in die jeweiligen Studien. Dies kann die zugrunde liegende Entwicklung der Rohstoffpreise oder des demographischen Wandels betreffen, aber auch der Betrachtungszeitraum kann eine Rolle spielen.

Eine strukturierte Aufarbeitung einzelner Studien und deren zugrundeliegenden Methoden, Annahmen und Ergebnissen kann die Interpretation der Ergebnisse im Rahmen der politischen Diskussion erleichtern und unterstützen. Dazu werden in der vorliegenden Kurzstudie eine ausgewählte Anzahl an aktuellen Studien (Stand: Januar 2013), die mittels Szenarien zukünftige Entwicklungen des Verkehrs abschätzen, näher betrachtet. Ein Fokus liegt hierbei auf einer Gegenüberstellung der Verkehrsentwicklung, der eingesetzten Antriebstechnologien und Energieträger sowie der verkehrsmittelspezifischen Energieeffizienz. Ebenso werden die den Szenarienrechnungen zugrundeliegenden Modellgrundlagen anhand der Dokumentation in den Studien näher analysiert.

Bedeutung von Szenarien für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

Im Energiekonzept hat die Bundesregierung Reduktionsziele für den Verkehrssektor definiert: Bis 2020 soll eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um rund 10 % stattfinden, bis 2050 um 40 % (jeweils gegenüber 2005). Zudem sollen die Treibhausgasemissionen sektübergreifend um bis 2020 um 40 % und bis 2050 um 80 % (jeweils gegenüber 1990) gesenkt werden. Auch hierfür soll der Verkehr seinen Beitrag leisten. Weiterhin gibt es verschiedene europäische Vorgaben für den Verkehrssektor: Die EU-Richtlinie für Erneuerbare Energien (Renewable Energy Directive) RED 2009/28/EC schreibt einen Anteil von 10 % an Erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor bis zum Jahr 2020 vor.

Die EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (Fuel Quality Directive) FQD 2009/30/EC schreibt für die in einem Mitgliedsstaat im Verkehr eingesetzten Energieträger eine Senkung der Lebenszyklustreibhausgasemissionen pro Energieeinheit bis zum Jahr 2020 um mindestens 6 % gegenüber einem über die Richtlinie vorgegebenen Basiswert für fossile Kraftstoffe vor.

Wichtige Kernaufgaben der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie sind die Analyse, welche Reduktionen im Verkehrssektor aus den bislang auf den Weg gebrachten Maßnahmen resultieren und die Frage, ob zur Erreichung der genannten Ziele zusätzliche Instrumente und Maßnahmen entwickelt werden müssen. Auch die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung der bestehenden Ziele, abhängig von den zukünftigen Entwicklungen, ist zu überprüfen.

Für diese Fragestellungen werden im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie abgestimmte Energie- und Verkehrsszenarien benötigt. Als Basis für die Erstellung solcher Szenarien ist ein Modellinstrumentarium erforderlich, mit dem Effekte von Trendentwicklungen und Maßnahmen auf Energieverbrauch, Treibhausgasausstoß und andere Emissionen aus dem Verkehr flexibel und kurzfristig abgeschätzt werden können. Solch ein Instrumentarium sollte im Idealfall von wichtigen Beteiligungsgruppen getragen werden. Die Entwicklung eines breit akzeptierten und mit den EU-Berichterstattungspflichten kompatiblen Simulationinstrumentes ist damit eine wichtige Grundlage der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie.

Mögliche Grundlage für ein Modellinstrumentarium im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie sind existierende Szenarien zukünftiger Energieverbrauchs- und Emissionsentwicklungen, die in den letzten Jahren in verschiedenen Studien untersucht worden sind. Diese Studien sind eine wichtige Grundlage in der Diskussion zwischen der Bundesregierung und allen in der MKS beteiligten Gruppen.

In der vorliegenden Kurzstudie wird eine Übersicht und Gegenüberstellung wichtiger Arbeiten zu zukünftigen Verkehrs- und Emissionsentwicklungen und diesen zugrunde liegender Einflussparameter und Annahmen gegeben. Die Kurzstudie schafft damit wichtige Voraussetzungen für eine fundierte Diskussion. Sie bietet sich als Grundlage zur Entwicklung eines abgestimmten Modellinstrumentariums der Bundesregierung an, um Szenarien hinsichtlich des zukünftigen Energiebedarfs und der resultierenden Treibhausgasemissionen des Verkehrs zu entwickeln.

Szenarien sind keine Prognosen

Unter einer Prognose versteht man die Vorhersage oder Voraussage der Zukunft. Dies ist prinzipiell nicht möglich, da zukünftige wirtschaftliche, technische und soziale Entwicklungen und Entscheidungen aus heutigem Kenntnisstand heraus nur mit erheblichen Unsicherheiten beurteilt werden können. Bereits kleine Änderungen und insbesondere Strukturbrüche können zu völlig anderen Zukunftsentwicklungen führen. Aus diesem Grund wird in vielen wissenschaftlichen Studien zur Beurteilung zukünftiger Entwicklungen die Szenario-Technik angewendet. Hierbei wird untersucht, welche Wirkung die Änderung an wichtigen Stellschrauben auf den Untersuchungsgegenstand in der Zukunft hat und welche Entwicklungen sich daraus unter bestimmten Rahmenbedingungen ergeben.

Szenarien für den Verkehrssektor können u.a. dazu dienen, die Wirkung von verschiedenen Rahmenbedingungen auf die zukünftige Entwicklung des Energieverbrauchs und der Emissionen des Verkehrs abzuschätzen. Sie zeigen zum Beispiel, welche Wirkung eine Änderung der Fahr- und Transportleistungen, der Energieeffizienz der Fahrzeuge, der eingesetzten Energieträger oder der Grenzwertgesetzgebung auf den zukünftigen Energieverbrauch und die Emissionen im Verkehrsbereich hätten.

Zur Analyse zukünftiger Umweltwirkungen (nicht nur) des Verkehrssektors werden oft mehrere Szenarien mit unterschiedlichen Entwicklungspfaden definiert und gegenübergestellt:

- In einem **Referenz- oder Basisszenario** wird ein plausibler Trend beschrieben, der abgestimmte Annahmen zur erwarteten Trendentwicklung von Fahr- und Verkehrsleistungen enthält und die aktuell beschlossene Rechtslage (z.B. CO₂-Grenzwerte) berücksichtigt.
- In **explorativen Maßnahmenszenarien** („Forecasting“) wird analysiert, welche Minderung von Umweltwirkungen durch zusätzliche (politische) Maßnahmen oder auch Entwicklungsschübe (z.B. Fortentwicklung bestimmter Antriebsarten) und daraus resultierende Änderungen der Rahmenbedingungen im Verkehrssektor (Verkehrsnachfrage, Fahrzeugtechnik, Kraftstoffe) erreicht werden können.
- In **normativen (Ziel-) Szenarien** („Backcasting“) werden vorab bestimmte Ziele definiert (z.B. Gesamthöhe des Energieverbrauchs im Verkehr). Anschließend wird beschrieben, wie mögliche (technische und nicht-technische) Pfade zur Erreichung dieser Ziele aussehen können.

Belastbare Szenarienanalysen können der Politik helfen, die Wirkung von Entscheidungen und Entwicklungen auf den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen des Verkehrs abzuschätzen und so die energie- und klimapolitischen Ziele im Verkehrssektor zu konkretisieren.

2 Aktuelle Studien zur zukünftigen Entwicklung des Verkehrs in Deutschland und daraus resultierenden Umweltwirkungen

In den vergangenen Jahren wurde in zahlreichen nationalen und internationalen Studien untersucht, wie das Klimaschutzziel einer 95 %-igen Minderung der Treibhausgasemissionen bis 2050 zu erreichen ist. Einige dieser Studien betrachten den Verkehrssektor im Rahmen einer Gesamtstrategie für alle Sektoren. In anderen Studien konzentrieren sich die Betrachtungen auf den Verkehrssektor. Darüber hinaus gibt es verschiedene Modellinstrumentarien, mit denen regelmäßig aktualisierte Trendentwicklungen ebenso wie Maßnahmenszenarien modelliert werden.

Für die Analysen in dieser Kurzstudie wurden drei Studien ausgewählt, die den Verkehr im Rahmen von Szenarien für den gesamten Energiesektor bis zum Jahr 2050 betrachten¹:

- **Modell Deutschland** vom WWF [WWF 2009],
- die **Energieszenarien** zum Energiekonzept der Bundesregierung [EWI 2010],
- die **Leitstudie 2011** des BMU [BMU 2012].

Als wichtige Untersuchung speziell zum Verkehrssektor mit einem Szenariohorizont bis 2030 wurde das im Auftrag des BMU entwickelte Modellinstrumentarium **Renewbility** ausgewählt.

Zusätzlich wurde in die Analysen das Modellinstrumentarium **TREMOD** (Transport Emission Model) einbezogen. TREMOD modelliert den gesamten motorisierten Verkehr in Deutschland, seine Energieverbräuche und Emissionen von 1960 bis 2011 und ist Grundlage für die Emissionsberichterstattung der Bundesregierung für den Verkehrssektor. Zukünftige Entwicklungen des Verkehrs und damit verbundener Umweltwirkungen können in Szenarienrechnungen bis zum Jahr 2050 untersucht werden. Das aktuelle Trendszenario geht bis 2030.

Für diese fünf Untersuchungen wurden in der vorliegenden Kurzstudie detaillierte Analysen der enthaltenen Szenarien zum Verkehr durchgeführt. Dazu wurden die Studien bzw. Modelldokumentationen hinsichtlich der modellierten Entwicklungen des Verkehrs und seiner Umweltwirkungen sowie der dokumentierten methodischen Grundlagen ausgewertet. Eine erste Übersicht zu den in der Kurzstudie berücksichtigten Untersuchungen geben Tabelle 1 und die nachfolgenden zusammenfassenden Beschreibungen.

¹ Zwei weitere Szenarienstudien sind die Politikszenerarien VI im Auftrag des Umweltbundesamtes und der Projektionsbericht der Bundesregierung 2013. Beide Studien wurden erst im März 2013 veröffentlicht und konnten in die Analysen der vorliegenden Kurzstudie daher nicht mehr einbezogen werden.

Tabelle 1 Übersicht der ausgewerteten Studien mit Szenarien für Deutschland zur Verkehrsentwicklung und verkehrsbedingten Umweltwirkungen

	Modell Deutschland	Energieszenarien	Leitstudie 2011	Renewability	TREMOD
Erscheinungsjahr	2009	2010	2012	2009, 2012	2012*
Auftraggeber	WWF Deutschland	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi	Bundesumweltministerium BMU	Bundesumweltministerium BMU	Umweltbundesamt (UBA), Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) u.a.
Auftragnehmer	Prognos, Öko-Institut	EWI, GWS, Prognos	DLR, IWES, IfNE	Öko-Institut, DLR; in Renewability II auch Fraunhofer ISI	IFEU Heidelberg
Bezugszeitraum	2005-2050	2008-2050	2005-2050	2005-2030	1960-2030/2050
Auswahlgründe für die Studie	Erste umfassende Gesamt-schau bis 2050	Aktuelle Szenarien der Bundesregierung	Aktuelle BMU-Szenarien	Stakeholder-Konzept bei Szenarien	Nationale Berichterstattung, Szenarien für NEC, NKI u.a.

Modell Deutschland [WWF 2009]

In Modell Deutschland werden im Auftrag des WWF mögliche „technisch-wirtschaftliche“ Pfade zur zukünftigen Reduktion der Treibhausgasemissionen in Deutschland sowie zentrale politische Instrumente für diese Pfade untersucht. Die Studie betrachtet alle Sektoren und wurde von der Prognos AG und dem Öko-Institut e.V. erarbeitet.

Kern der Studie sind zwei detaillierte modellgestützte Szenarien: Ein Referenzszenario, in dem die heutige Energie- und Klimaschutzpolitik fortgesetzt wird, und ein Innovationsszenario, das vom Ziel einer Emissionsreduktion um 95 % ausgehend emissionsmindernde Pfade untersucht.

Im Verkehrssektor wird der Schwerpunkt auf mögliche technische Entwicklungen gelegt: „Zentrale Elemente für die Minderungen im Verkehrssektor sind die Fahrzeugeffizienz im MIV, die Elektrifizierung des MIV und die Umstellung des Güterverkehrs auf erneuerbare Energien“ [WWF 2009, Kurzfassung S. 18]. Dagegen werden grundsätzliche Strukturänderungen und damit verbundene Potenziale zur Änderung von Verkehrsnachfrage und Verkehrsmittelwahl nicht näher betrachtet.

Neben den Umweltwirkungen werden auch zusätzliche Kosten des Innovationsszenarios gegenüber dem Referenzszenario volkswirtschaftlich abgeschätzt. Dafür werden für die Umsetzung der Pfade benötigte Investitionen über die Lebensdauer bestimmt und diesen die vermiedenen Energieträgerimporte als volkswirtschaftliche Einsparungen gegengerechnet.

Energieszenarien [EWI 2010]

Als Grundlage für das Energiekonzept der Bundesregierung wurden die Energieszenarien im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) durch EWI, Prognos und GWS erarbeitet. In einem Referenzszenario sowie vier Zielszenarien wurden mögliche

Entwicklungen der zukünftigen Energieversorgung in Deutschland über alle Sektoren untersucht. Als wesentliche Eckpunkte für die Zielszenarien waren den Gutachtern vom Auftraggeber eine Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen Deutschlands bis 2050 um mind. 85 % gegenüber 1990 sowie ein Anteil von Erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch im Jahr 2050 von mindestens 50 % vorgegeben.

Zukünftige Reduktionen von Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Verkehr werden in Referenz- wie auch Zielszenarien vor allem durch Erhöhungen der Fahrzeugeffizienz bei allen Verkehrsmitteln sowie durch den Einsatz neuer Antriebstechnologien, insb. Elektro-Pkw, und von Biokraftstoffen erreicht. In gewissem Umfang werden, hauptsächlich im Güterverkehr, auch Verkehrsverlagerungen von der Straße auf andere Verkehrsträger angenommen. Die Zielszenarien sind im Verkehr weitgehend identisch, Unterschiede gibt es nur bei den Neuzulassungsanteilen einzelner Pkw-Antriebstechnologien nach 2040.

Leitstudie 2011 [BMU 2012]

Die Leitstudie 2011 „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“ stellt Ergebnisse umfangreicher systemanalytischer Untersuchungen zur Transformation in der Strom-, Wärme- und Kraftstofferzeugung dar. Diese wurden im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsvorhabens für das Bundesumweltministerium durch 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.

Ziel der Leitstudie sind Szenarien zum langfristigen Ausbau erneuerbarer Energien und der Transformation der restlichen Energieversorgung in Deutschland, um die im Energiekonzept beschlossenen energie- und klimapolitischen Ziele zu erreichen. Vorrangig sollen die „zielorientierten“ Szenarien die Ziele einer Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 um mindestens 80 % (gegenüber 1990) bzw. der CO₂-Emissionen um mindestens 85 % erfüllen. Ein weiteres Unterziel ist die Senkung des Stromverbrauchs im Zeitraum 2008-2050 um 25 %.

In der Leitstudie 2011 werden drei Hauptszenarien (A, B, C) betrachtet. Zentrales Unterscheidungsmerkmal der Szenarien sind die angenommenen technischen Entwicklungspfade und Antriebsenergien im Straßenverkehr (Anteile von Elektromobilität sowie Nutzung von Wasserstoff) sowie deren Verknüpfung mit dem übrigen Energiesystem (z.B. Methanisierung von Wasserstoff aus erneuerbarem Strom). Die übrigen Entwicklungen (Personen- und Güterverkehrsleistungen, fahrzeugspezifische Energieeffizienz) sind in allen Hauptszenarien einheitlich.

TREMOD [IFEU 2012]

Das F+E-Vorhaben "Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 bis 2030" ist seit 1993 ein Projekt des IFEU Heidelberg im Auftrag des Umweltbundesamtes. Ziel des Projektes ist die Beschreibung des motorisierten

Verkehrs in Deutschland, seiner Fahrleistungen, Energieverbräuche und Emissionen. Das hierfür entwickelte Computermodell "TREMOT - Transport Emission Model" liegt seit September 2012 in der Version 5.3 vor.

TREMOT betrachtet jahresfein in der Zeitreihe 1960 bis 2011 und in Szenarien bis 2050 alle motorisierten Verkehrsmittel im Personen- und Güterverkehr. Für alle Fahrzeuge werden die Verkehrsleistungen, im Straßenverkehr auch die Fahrleistungen, sowie damit verbundene Energieverbräuche und Umweltwirkungen ermittelt. Das aktuelle mit dem UBA abgestimmte Trendszenario reicht bis zum Jahr 2030. Maßnahmenorientierte Szenarien werden in verschiedenen Projekten mit Zeithorizont bis 2050 modelliert (z.B. [NOW 2013, IWES 2013, IFEU 2013]).

Der motorisierte Straßenverkehr wird wegen seiner hohen Bedeutung für die Belastung von Menschen und Umwelt sehr detailliert betrachtet. Fahrleistungen, Energieverbräuche und Emissionen werden in größtmöglicher Differenzierung nach Technik, Fahrzeuggröße, Fahrzeugalter, Beladungsgrad, Straßenkategorie, Verkehrssituation, Nutzungsmuster usw. erfasst und - bei Bedarf - auch so differenziert ausgegeben. TREMOT ist mit dem Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [INFRAS 2010] abgestimmt. Die detaillierten Emissionsfaktoren des HBEFA werden in TREMOT für die Berechnungen verwendet. Umgekehrt verwendet das HBEFA die mit TREMOT berechnete Flottenzusammensetzung für Deutschland.

TREMOT ermöglicht aufgrund seiner hohen Auflösung die Bereitstellung von Basisdaten ebenso wie die Modellierung vielfältiger Szenarien zu zahlreichen Fragestellungen. Entsprechend breit ist das Anwendungsspektrum. Die wichtigsten aktuellen Einsatzbereiche sind:

- Erfüllung der nationalen und internationalen Berichtspflichten der Bundesregierung im Bereich "Energie und Emissionen des Verkehrs".
- Analyse der Wirksamkeit von Maßnahmen in Szenarienrechnungen; Vorbereitung von politischen Entscheidungen (z.B. Abgasgesetzgebung, Fördermaßnahmen).
- Überprüfung der Erreichung von Minderungszielen, z.B. aufgrund von Verpflichtungen auf internationaler Ebene (NEC-Richtlinie, Kyoto-Protokoll).
- Datenbasis für Umweltkennzahlen des Verkehrs, z.B. für Ökobilanzen oder Umweltvergleiche. Konkret werden die TREMOT-Daten u.a. verwendet in Probas, Renewability, GEMIS, Umberto, UmweltMobilCheck, EcoPassenger und EcoTransIT.

Wegen seines Umfangs und seiner Komplexität ist TREMOT nicht öffentlich zugänglich. Es wird zurzeit von folgenden Institutionen genutzt: Umweltbundesamt, Bundesanstalt für Straßenwesen und verschiedene Bundesministerien, Verband der Automobilindustrie (seit 1996), Mineralölwirtschaftsverband (seit 1996), Deutsche Bahn AG (seit 1997), Deutsche Lufthansa (seit 2006). Die Kooperationspartner tragen ideell und finanziell zur Weiterentwicklung und zur kontinuierlichen Aktualisierung des Modells an den neuesten Stand der Wissenschaft sowie die neuen Gesetzgebungen und Techniken bei.

Renewbility [Öko/DLR 2009a/b, Öko/DLR 2012]

Gefördert durch das BMU wurde von Öko-Institut und DLR in den Jahren 2005 bis 2009 im Rahmen von „Renewbility – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“ ein integratives Analyseinstrumentarium für den Verkehr entwickelt. Ziel von Renewbility ist es, die Möglichkeiten zur Entwicklung eines nachhaltigen Verkehrssystems unter Einbeziehung von Stakeholdern zu erkunden. Hierzu werden Maßnahmen modelliert, die zu einem nachhaltigen Verkehrssystem beitragen, und die Wirkungen einer solchen Verkehrspolitik abgebildet. Die Ergebnisse beinhalten unter anderem Aussagen zur Nutzung der Verkehrsträger, dem Schadstoffausstoß und Umweltwirkungen sowie der Nutzung der Energieträger. [Öko/DLR 2009b, S. 2]. Im Projekt Renewbility II werden auch Aussagen zur wirtschaftlichen Wirkung der untersuchten Maßnahmen getroffen. Hierzu wurde das ökonomische Modell ASTRA-D des Fraunhofer ISI in die Modellkette integriert.

Das Basisszenario dient in Renewbility als Referenz. Es ist keine klassische Trendprojektion, da es bereits Veränderungen im Mobilitäts- und Energiesektor annimmt, sondern dient hauptsächlich als Vergleichsbasis, um die Wirkungen zusätzlicher Maßnahmen und Annahmen auf den Verkehrssektor quantifizieren zu können [Öko/DLR 2012, S. 5]. Die Verkehrsentwicklung orientiert sich an der Verkehrsprognose 2025 des BMVBS, wird jedoch bis zum Jahr 2030 fortgeschrieben und zudem in Renewbility II mit aktualisierten Daten angepasst. Zudem werden im aktualisierten Basisszenario auch neue Richtlinien bspw. zur Fahrzeugeffizienz berücksichtigt sowie aktualisierte Rahmendaten, die etwa die Folgen der Finanz- und Wirtschaftskrise beinhalten.

Neben dem Basisszenario gibt es in Renewbility I und II jeweils ein Klimaschutzszenario, in dem die Wirkung von Klimaschutzmaßnahmen im Verkehr modelliert wird. Die Maßnahmen des Klimaschutzszenarios reichen vom Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs und der Elektromobilität, über eine Weiterentwicklung der CO₂-Grenzwerte für Pkw bis hin zu einer Erhöhung von Lkw-Maut und Kraftstoffpreisen. Sowohl Vermeidungs- und Verlagerungspotenziale als auch technische Minderungspotenziale werden modelliert. Eine Besonderheit von Renewbility ist die Einbeziehung von Stakeholdern (Vertreter der Automobil-, Bahn-, Energie- und Logistikbranche sowie von Umwelt- und Verbraucherschutzverbänden). Diese Stakeholder haben im Projektverlauf Handlungsoptionen für den Klimaschutz im Verkehrssektor identifiziert, welche in das Klimaschutzszenario integriert wurden.

Im Folgenden werden – wo möglich – die Ergebnisse von Renewbility II aus dem Jahr 2012 herangezogen. Da der zugehörige Abschlussbericht bei Erstellung dieses Dokuments jedoch noch nicht vorlag, wird an einigen Stellen auf Renewbility I zurückgegriffen.

2.1 Abgrenzungen des Verkehrssektors und erfasste Umweltwirkungen

Um die Szenarienergebnisse und deren Grundlagen zwischen den betrachteten Studien vergleichen zu können, wurden in einem ersten Schritt die jeweiligen Abgrenzungen des Verkehrssektors sowie die erfassten verkehrsbedingten Umweltwirkungen und deren Zurechnung zum Verkehrssektor analysiert (vgl. Tabelle 2).

Abgrenzung des Verkehrssektors

Alle berücksichtigten Untersuchungen erfassen die Verkehrsmittel im motorisierten bodengebundenen Personen- und Güterverkehr sowie den Flugverkehr. Internationale Seeschifffahrt ist in keiner der berücksichtigten Untersuchungen enthalten.

Verkehrsaktivitäten und damit verbundene Energieverbräuche und Umweltwirkungen können nach verschiedenen Methoden abgegrenzt und einem Land zugerechnet werden. Wesentliche Abgrenzungsprinzipien sind (vgl. auch [UBA 2011]):

- Das **Inländerprinzip** bezieht sich ausschließlich auf den Verkehr der Einwohner Deutschlands, unabhängig davon, ob diese Fahrten im Inland oder im Ausland durchführen.
- Das **Inlandsprinzip** erfasst gebietsbezogen alle Verkehre und deren Energieverbräuche innerhalb eines Landes, unabhängig davon, durch wen die Fahrten erfolgen.
- Beim **Energiebilanzprinzip** werden alle Verkehre erfasst, die mit den lt. Energiestatistik in Deutschland abgesetzten Energiemengen erfolgen. Würde der Deutschland getankte Kraftstoff vollständig innerhalb der Landesgrenzen verfahren und gleichzeitig kein Kraftstoff von außerhalb verwendet, wäre der Verbrauch nach Energiebilanz identisch zum Inlandsverbrauch. In der Realität kommt es aber im grenzüberschreitenden Verkehr durch die Kraftstoffmengen in den Fahrzeugtanks zu einem Kraftstoff-„Import“ bzw. -„Export“ und somit zu Unterschieden des statistischen Energieverbrauchs vom Inlandsverbrauch. Signifikant sind v.a. die Abweichungen beim Dieserverbrauch im Straßen- und Binnenschiffsverkehr (vgl. [IFEU 2012, S. 19-22]). Daher kann der statistische Energieverbrauch des Verkehrs nicht ohne weiteres mit Fahr- oder Verkehrsleistungen nach anderen Abgrenzungen verknüpft werden.

Die gewählten Abgrenzungen des Verkehrssektors unterscheiden sich teilweise zwischen den Studien. Aber auch innerhalb der Studien werden teilweise unterschiedliche Abgrenzungen für Fahr- und Verkehrsleistungen einerseits sowie verkehrsbedingte Energieverbräuche andererseits verwendet.

- Im Straßen-, Schienen- und Binnenschiffsverkehr werden in den drei sektorübergreifenden Szenarienstudien [WWF 2009, EWI 2010, BMU 2012] die Energieverbräuche und damit verbundene Umweltwirkungen gemäß nationaler Energiebilanz abgegrenzt. Die Abgrenzung von Fahr- und Verkehrsleistungsangaben wird in den drei Studien nicht erläutert, die angegebenen Werte für die Basisjahre (2005 bzw. 2008) stimmen jedoch weitgehend mit den entsprechenden Jahreswerten von „Verkehr in Zahlen“ [ViZ] überein. Dort

wird der Verkehr „im Bundesgebiet“, d.h. nach Inlandsprinzip angegeben. Renewbility und TREMOD verwenden beim bodengebundenen Verkehr sowohl für die Verkehrsmengen als auch Energieverbräuche durchgängig das Inlandsprinzip. In TREMOD werden zusätzlich auch Energieverbräuche und Umweltwirkungen nach Energiebilanz abgegrenzt.

- Der Energieverbrauch im Flugverkehr wird in Modell Deutschland nach „Tankprinzip“ (d.h. Energiebilanz) für nationalen sowie internationalen Verkehr erfasst [WWF 2009, S. 11]. Die Abgrenzung der angegebenen Verkehrsleistungen wird nicht erläutert, die Werte für das Basisjahr 2005 decken sich aber mit den Angaben beim statistischen Bundesamt [StatBA 8.6.2] bzw. in Verkehr in Zahlen [ViZ]. Sie umfassen demnach den kompletten Inlandsverkehr sowie die über Deutschland geflogenen Anteile des grenzüberschreitenden Flugverkehrs von bzw. nach deutschen Flughäfen. TREMOD verwendet Verkehrsleistungen und Energieverbräuche für den gesamten von Deutschland abgehenden nationalen und internationalen Flugverkehr bis zur ersten Landung (im In- oder Ausland) sowie zusätzlich nach Energiebilanz. Renewbility betrachtet nur den innerdeutschen Flugverkehr, wobei dieser auch in den Szenarien nicht mit Maßnahmen zur Treibhausgasminde rung belegt wird [Öko/DLR 2009b, S. 2 und Öko/DLR 2012 S.4]. In Energieszenarien und Leitstudie 2011 wird die Abgrenzung des Flugverkehrs nicht erläutert. Die für das Jahr 2008 zugrunde gelegte Personenverkehrsleistung [EWI 2010 S. 91; BMU 2012 S. 70] deckt sich jedoch mit der Angabe in Verkehr in Zahlen [ViZ 2009/2010, S. 221], die Abgrenzung ist in beiden Studien demnach genauso wie in Modell Deutschland.

Erfasste Umweltwirkungen des Verkehrs

Alle ausgewählten Untersuchungen betrachten sowohl Energieverbrauch als auch Treibhausgasemissionen durch den Verkehr. In TREMOD und Renewbility werden weiterhin auch Luftschadstoffemissionen ermittelt. Die Abgrenzung der Umweltwirkungen und deren Zurechnung zum Verkehrssektor unterscheiden sich jedoch erheblich.

- Alle Untersuchungen erfassen den Endenergieverbrauch für den Fahrbetrieb, wobei hier einige Untersuchungen den Energieverbrauch nach der Energiebilanz abgrenzen, andere über die Fahrleistungen hochrechnen (Inlandsprinzip). In einigen Studien wird auch der Primärenergieverbrauch für den Verkehrssektor ermittelt, welcher Energieaufwendungen zur Bereitstellung der Antriebsenergieträger einbezieht.
- Treibhausgasemissionen werden in den sektorübergreifenden Szenarienstudien nach dem nationalen Treibhausgasemissionsinventar den Sektoren zugerechnet. D.h. der Verkehrssektor bekommt ausschließlich direkte Emissionen aus dem Fahrbetrieb zugerechnet. Emissionen aus der Vorkette zur Energieträgerbereitstellung werden im Umwandlungssektor erfasst, soweit sie in Deutschland anfallen. In den verkehrsspezifischen Modellinstrumentarien TREMOD und Renewbility werden auch Vorkettenemissionen dem Verkehrssektor zugerechnet, unabhängig von ihrer Entstehung im In- oder Ausland. In Renewbility werden darüber hinaus auch Emissionen aus der Fahrzeugherstellung berechnet.

Fazit: Der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor wird in den ausgewählten Studien nach Energiebilanzprinzip oder Inlandsprinzip abgegrenzt. Die Abgrenzung der Verkehrsmengen ist nur teilweise beschrieben, lässt sich aber weitgehend auf das Inlandsprinzip zurückführen. Nur die Modellinstrumentarien TREMOD und Renewbility verwenden sowohl für Verkehrsmengen als auch Energieverbräuche ein einheitliches Abgrenzungsprinzip.

Die Zurechnung von Umweltwirkungen zum Verkehrssektor differiert zwischen den *sektorübergreifenden Szenarienstudien* [WWF 2009, EWI 2010, BMU 2012], die nur Energieverbrauch und direkte Treibhausgasemissionen für den Verkehrssektor ermitteln, und den *verkehrsspezifischen Modellinstrumentarien* [Öko/DLR 2009a/b+2012, IFEU 2012], die zusätzlich weitere Umweltwirkungen (Energieträgerbereitstellung, Fahrzeugherstellung, Luftschadstoffemissionen) des Verkehrs ermitteln. Ein Vergleich der Szenarienergebnisse zwischen allen Studien kann daher nur für Endenergieverbrauch und direkte Treibhausgasemissionen (d.h. ohne Erfassung der Klimawirkungen alternativer Antriebe und Kraftstoffe) erfolgen.

Tabelle 2: Abgrenzungen des Verkehrssektors und erfasste Umweltwirkungen in den untersuchten Studien

	Modell Deutschland	Energie-szenarien	Leitstudie 2011	Renewbility	TREMOD
Verkehrsmittel	Motorisierter bodengebundener Verkehr Flugverkehr (national + international)	Motorisierter bodengebundener Verkehr Flugverkehr (national + international)	Motorisierter bodengebundener Verkehr Flugverkehr (national + international)	Motorisierter bodengebundener Verkehr Flugverkehr (national) Rad-, Fußverkehr	Motorisierter bodengebundener Verkehr Flugverkehr (national + international)
Umweltwirkungen des Verkehrs	Endenergie, Primärenergie, Treibhausgase	Endenergie, Treibhausgase	Endenergie, Treibhausgase	Endenergie, Treibhausgase, Luftschadstoffe	Endenergie, Primärenergie, Treibhausgase, Luftschadstoffe
Abgrenzungen	<u>Energieverbrauch & Emissionen:</u> Nationale Energiebilanz bzw. Emissionsinventar <u>Verkehrsmengen:</u> Inlandsprinzip*	<u>Energieverbrauch & Emissionen:</u> Nationale Energiebilanz bzw. Emissionsinventar <u>Verkehrsmengen:</u> Inlandsprinzip*	<u>Energieverbrauch & Emissionen:</u> Nationale Energiebilanz bzw. Emissionsinventar <u>Verkehrsmengen:</u> Inlandsprinzip*	<u>Energieverbrauch und Verkehrsmengen:</u> Inlandsprinzip. <u>Emissionen:</u> Direkt + Vorkette, inkl. Fahrzeugherstellung	<u>Energieverbrauch und Emissionen:</u> Inlandsprinzip und nationale Energiebilanz. Direkt + Vorkette. <u>Verkehrsmengen:</u> Inlandsprinzip
*über Vergleich der Werte des Basisjahrs mit VIZ abgeleitet, da nicht in der Studie angegeben					

2.2 Szenarien in den untersuchten Studien

In den ausgewählten Untersuchungen wird überwiegend zunächst ein **Basis- oder Referenzszenario** definiert. Dieses soll plausible zukünftige Verkehrs- und Emissionsentwicklungen unter Verwendung aktueller Trendeinschätzungen (z.B. Bevölkerungsentwicklung, bundesweite Verkehrstrends) und Beibehaltung bisheriger Politiken abschätzen und so Hinweise auf die Entwicklungen verkehrsbedingter Umweltwirkungen ohne zusätzliche Maßnahmen liefern. Eine Ausnahme bildet die Leitstudie 2011, in der kein Referenzszenario abgeleitet wird.

Weiterhin werden in den Studien auch **maßnahmenorientierte Szenarien** gerechnet:

- In den sektorübergreifenden Szenariestudien wurden *normative Zielszenarien* erarbeitet zur Darstellung möglicher Pfade zur Erreichung definierter Minderungsziele.
- In Renewability I und II wurde jeweils ein *exploratives Maßnahmenzenario* gerechnet, in dem Klimaschutzpotenziale für ausgewählte Maßnahmenbündel ermittelt wurden.²
- Mit TREMOD werden regelmäßig Maßnahmenzenarien zu verschiedenen Fragestellungen modelliert (z.B. Nationale Klima- und Luftqualitätsziele [IFEU 2011, UBA 2013b], Wasserstoff im Verkehr [NOW 2013])³.

In den Zielszenarien von Modell Deutschland und Energieszenarien wurden sektorübergreifende Ziele zur CO₂-Minderung und zum Einsatz erneuerbarer Energien festgelegt [WWF 2009, S. 9], [EWI 2010, S. 3ff], jedoch keine sektorspezifischen Zielvorgaben. Allerdings wurden teilweise sektorbezogen bestimmte strategische Setzungen zur Zielerreichung gemacht [WWF 2009, S. 2]. In der Leitstudie sollen ebenfalls sektorübergreifende nationale CO₂- und Energieziele erreicht werden. Gleichzeitig sollen die nationalen Endenergieziele für den Verkehrssektor erreicht werden [BMU 2012, S. 43-46].

In allen drei Studien werden schwerpunktmäßig technische Minderungspfade durch Einsatz alternativer Antriebstechnologien, v.a. bei Pkw, und erneuerbarer Energieträger sowie eine zukünftige Steigerung der Energieeffizienz aller Verkehrsmittel untersucht. In den Szenarien der Leitstudie 2011 werden dabei ausschließlich verschiedene Pfade für alternative Antriebstechnologien untersucht. In den Zielszenarien von Modell Deutschland und Energieszenarien werden eingeschränkt auch Möglichkeiten zur Verkehrsvermeidung- und -verlagerung betrachtet.

Maßnahmen zur Umsetzung der modellierten Zielpfade werden in den sektorübergreifenden Szenariestudien ebenfalls thematisiert. Allerdings ist aus den Studien keine Verknüpfung der Modellierungen zu den aufgeführten Maßnahmen ersichtlich.

- Modell Deutschland beinhaltet ein umfangreiches Kapitel zu einem Maßnahmenprogramm [WWF 2009, Kap. 9], darunter auch 8 verkehrsbezogenen Maßnahmen. Dieses „Integrierte Klimaschutz- und Energieprogramm für den Zeithorizont 2030 (IKEP 2030)“ wird von den Autoren als „kein vollständiges und vollumfängliches Maßnahmenbündel“ gesehen, sondern „an einer Vielzahl von Stellen zusätzlicher und flankierender Politiken und Maßnahmen bedürfen“ [WWF 2009, S. 408].

² In Renewability I wurden zusätzlich neun sogenannte „Szenaretten“ berechnet, in denen die Auswirkungen von Einzelmaßnahmen, beispielsweise die Einführung eines Tempolimits auf Autobahnen oder eine veränderte KFZ-Steuer, ermittelt wurden. Auf die Szenaretten wird in diesem Dokument nicht weiter eingegangen, da sie keine eigenen und vollwertigen Szenarien darstellen (vgl. [Öko/DLR 2009b, S. 103]).

³ Derzeit liegen allerdings keine aktuellen veröffentlichten Ergebnisse deutschlandweiter Maßnahmenzenarien vor.

- In den Energieszenarien werden „Mögliche Instrumente“ zur Förderung der in den Zielszenarien beschriebenen Entwicklungen aufgelistet [EWI 2010, S. 92, 98, 101 & 103], jedoch nicht näher ausgeführt.
- In der Leitstudie 2011 werden in den Schlussfolgerungen [BMU 2012, S.287ff] grundsätzliche Entwicklungsstrategien grob skizziert, die aus Autorensicht notwendig zur Umsetzung der exemplarisch beschriebenen Pfade für alternative Antriebstechnologien sind, jedoch werden keine konkreten Einzelmaßnahmen benannt.

Die Maßnahmen szenarien in Renewbility I und II verfolgen einen anderen Ansatz als die drei sektorübergreifenden Szenarienstudien. In Renewbility I und II wurden im Dialog mit Stakeholdern aus verschiedenen Bereichen in einem „Klimaschutz-Szenario“ konkrete Maßnahmen festgelegt [Öko/DLR 2009b, S. 7ff]. Anschließend wurden die Wirkungen dieser Maßnahmen auf die Durchführung von Fahrten, die Verkehrsmittelwahl sowie auf Fahrzeugeffizienz und Einsatz alternativer Antriebstechnologien modelliert. Entsprechend umfasst das Szenario sowohl nicht-technische Potenziale zur Vermeidung und Verlagerung von Verkehr als auch technische Potenziale [Öko/DLR 2009b, S. 27ff].

Tabelle 3 fasst die wesentlichen Punkte zu den Szenarien in den untersuchten Szenarienstudien und Modellinstrumentarien noch einmal zusammen.

Tabelle 3: Übersicht der Szenarien in den untersuchten Studien

	Modell Deutschland	Energieszenarien	Leitstudie 2011	Renewbility	TREMOD
Basisszenario	„Referenzszenario“	„Referenzszenario“	-	„Basisszenario“	„Trendszenario“
Maßnahmen-szenarien	1 Zielszenario („Innovationsszenario“) mit sektorübergreifendem CO ₂ -Ziel und sektorbezogen ausgewählten „strategischen Setzungen“	4 Zielszenarien mit sektorübergreifenden CO ₂ - und erneuerbare Energien-Zielen	3 Zielszenarien mit verkehrsspezifischem Endenergieziel und ausgewählten szenariospezifischen Vorgaben	Exploratives „Klimaschutz-Szenario“ mit Potenzialanalysen für ausgewählte politische Maßnahmen (-bündel)	Derzeit kein aktuelles veröffentlichtes Maßnahmen-szenario
Wirkungsansätze in Maßnahmen-szenarien	v.a. technisch	v.a. technisch	nur technisch	technisch und nicht-technisch	-
Maßnahmen-analyse	Beschreibung eines Maßnahmenprogramms (IKEP 2030), 8 Maßnahmen im Verkehr. Kein direkter Bezug zur Modellierung ersichtlich	Auflistung von Maßnahmen, aber kein direkter Einfluss auf die Modellierung ersichtlich	Erläuterung grundsätzlicher Entwicklungsstrategien zur Förderung alternativer Antriebstechnologien, ohne Bezug zur Modellierung	Modellierung der kombinierten Wirkung von zehn ausgewählten Maßnahmenblöcken für die Potenziale im Klimaschutz-Szenario	-

3 Modellierung zukünftiger Entwicklungen im Verkehr und damit verbundener Energieverbräuche in den untersuchten Studien

Ziel der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung ist die Erarbeitung eines Konzepts für den Verkehrssektor mit Schwerpunkt auf den energie- und klimapolitischen Herausforderungen⁴. Die ausgewählten Szenariestudien wurden daher auf diejenigen Aspekte hin analysiert und miteinander verglichen, welche ausschlaggebend für die zukünftige Entwicklung des Energiebedarfs für den Verkehrssektor sowie die damit verbundenen Treibhausgasemissionen sind. Das betrifft hauptsächlich:

- die Entwicklung der **Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr** und die damit verbundenen Fahr- und Verkehrsleistungen der verschiedenen Verkehrsmittel
- die Eigenschaften der Verkehrsmittel, insb. **Antriebstechnologien** und **Energieeffizienz** der Fahrzeuge sowie
- den Einsatz **erneuerbarer Energieträger**.

Nachfolgend werden die einzelnen Entwicklungen in den Referenzszenarien der Studien sowie die Änderungen in maßnahmenorientierten Szenarien verglichen. Zur Beurteilung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden werden die in den Studien vorhandenen Erläuterungen zu Modellmethoden sowie zu den verwendeten Basisannahmen herausgearbeitet. Eine mögliche Verwendung der modellierten Entwicklungen bzw. dahinter liegender Modellansätze und Annahmen für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie werden erörtert.

Nach den Einzelanalysen der Entwicklungen von Verkehrsnachfrage, Antriebstechnologien, Energieeffizienz und erneuerbaren Energieträgern werden auch die Gesamtentwicklungen des Endenergieverbrauchs im Verkehr gegenübergestellt und analysiert. Die Beiträge von alternativen und fossilen Endenergieträgern zur Deckung des zukünftigen Energiebedarfs im Verkehrssektor in den verschiedenen Szenarien werden diskutiert.

3.1 Zukünftige Entwicklung der Verkehrsnachfrage

3.1.1 Entwicklung von Verkehrsleistungen und Modal-Split

In den ausgewählten Untersuchungen wird überwiegend zunächst ein Basis- oder Referenzszenario definiert. Dieses soll plausible zukünftige Verkehrsentwicklungen unter Verwendung aktueller Trendeinschätzungen (z.B. Bevölkerungsentwicklung, bundesweite Verkehrstrends) und Beibehaltung bisheriger Politiken abschätzen. In den drei Untersuchungen Modell Deutschland, Energieszenarien und Renewability werden zusätzlich auch in maßnahmenorientierten Szenarienrechnungen Änderungen von Gesamtverkehrsnachfrage und Modal-Split infolge zusätzlicher Maßnahmen berechnet.

⁴ <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/UI/UI-MKS/mks-allgemein-hintergrundinformationen.html>

Referenzszenarien

Abbildung 1 und Abbildung 2 stellen Entwicklungen der Verkehrsnachfrage im Personenverkehr (oben) und Güterverkehr (unten) in den Referenzszenarien der ausgewählten Untersuchungen gegenüber. Für das Ausgangsjahr (je nach Studie 2005, 2008, 2010) besteht zwischen den Studien weitgehende Übereinstimmung, was aufgrund der über alle Szenarien hinweg vergleichbaren Abgrenzung des Verkehrssektors den Erwartungen entspricht⁵. Die Referenzentwicklungen der zukünftigen Jahre weisen jedoch erhebliche Unterschiede auf.

Im motorisierten **Personenverkehr** gehen Modell Deutschland und Energieszenarien von einer Stagnation, bzw. nach 2020 einem leichten Rückgang der Verkehrsleistungen aus. Auch die Leitstudie zeigt einen ähnlichen Verlauf. Dagegen wird im TREMOD-Trendszenario bis 2030 ein weiterer Anstieg ermittelt, ebenso in Renewbility II, wo der Anstieg noch stärker ist.

Die Gesamtverkehrsnachfrage ist in allen Untersuchungen weitgehend durch die Entwicklungen im dominierenden MIV getrieben. Die Verkehrsleistungsanteile des öffentlichen Verkehrs ändern sich nur wenig. In TREMOD und Leitstudie steigt der Anteil des öffentlichen Verkehrs leicht an, in Renewbility II steigt die absolute Verkehrsleistung des ÖV zwar um gut 6 % an, allerdings sinkt der Anteil durch ein stärkeres Wachstum der Gesamtfahrleistung dennoch leicht. In Modell Deutschland und Energieszenarien bleibt der Modal-Split im gesamten Zeitraum 2005-2050 nahezu unverändert.

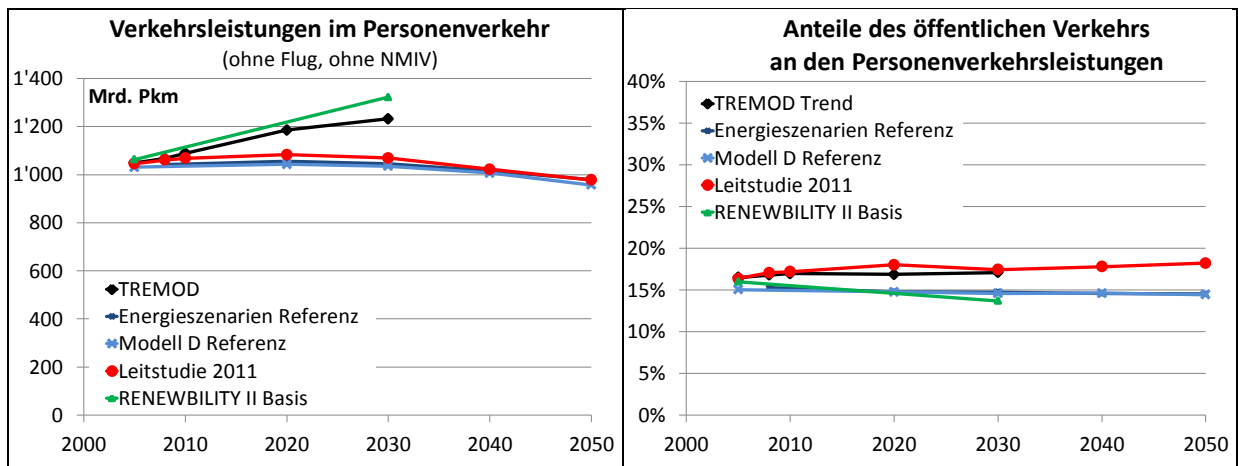


Abbildung 1: Entwicklung der Verkehrsleistungen im motorisierten Personenverkehr in den Trend-/Referenzszenarien der ausgewählten Studien

Im **Güterverkehr** werden in allen Studien weitere deutliche Zuwächse angenommen. Auch hier laufen Modell Deutschland und Energieszenarien parallel mit einem fast linearen Anstieg bis 2050. Die Leitstudie 2011 folgt bis 2040 etwa dem gleichen Trend, zeigt danach aber einen

⁵ Unterschiede gibt es v.a. bei den Verkehrsleistungen im Flugverkehr, die je nach Studie unterschiedlich abgegrenzt werden. Dieser wurde in den Analysen zur Verkehrsentwicklung daher nicht einbezogen. Die Angaben für Renewbility sind ohne den dort mit abgebildeten Nicht-motorisierten Individualverkehr (NMIV).

Rückgang bis 2050. Die Basisszenarien in TREMOD und Renewbility II gehen nur bis 2030 – in beiden Modellen liegt der Verkehrsanstieg deutlich über den drei Szenarienstudien.

Die Verkehrszunahme ist in den meisten Trend-/Referenzszenarien bis 2030 im Straßengüterverkehr etwas höher als bei Bahn und Binnenschiff, deren Anteil am Modal-Split sinkt. Nach 2030 ist dagegen das weitere Verkehrswachstum in den Referenzszenarien bei Bahn und Binnenschiff überdurchschnittlich hoch, so dass ihr Modal-Split-Anteil wieder ansteigt. Am stärksten ist der Effekt in der Leitstudie 2011, wo für den Straßengüterverkehr nach 2040 ein Rückgang modelliert wird, während Bahn- und Binnenschiffgüterverkehr weiter ansteigen.

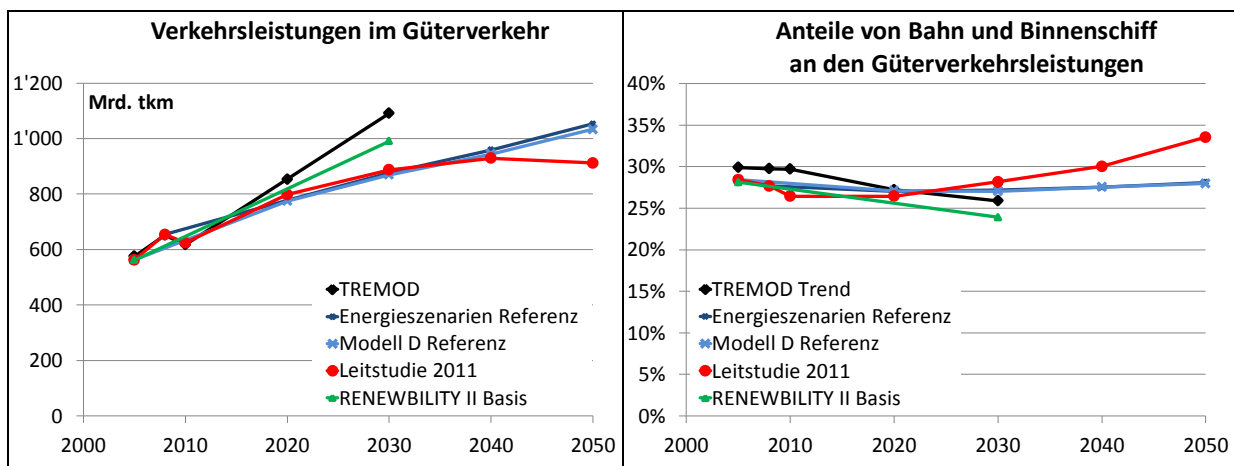


Abbildung 2: Entwicklung der Verkehrsleistungen im Güterverkehr in den Trend-/Referenzszenarien der ausgewählten Studien

Maßnahmenorientierte Szenarien

Modell Deutschland, Energieszenarien sowie Renewbility II beinhalten maßnahmenorientierte Szenarien mit Änderungen der Verkehrsnachfrage bzw. des Modal-Split gegenüber den Referenzentwicklungen. Diese Änderungen der Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr sind für die Zieljahre 2030 und 2050 in Abbildung 3 dargestellt.

Im **Personenverkehr** zeigt nur Renewbility II signifikante Unterschiede der motorisierten Verkehrsleistungen zwischen dem Basisszenario und dem maßnahmenorientierten Szenario („Klimaschutzszenario“). Diese sind im Klimaschutz-Szenario insgesamt um 16 % niedriger als im Basisszenario, wobei die Verkehrsleistungen des motorisierten Individualverkehrs um 23 % niedriger, des öffentlichen Verkehrs dagegen um 27 % höher sind⁶. Im Unterschied dazu ist in Modell Deutschland und den Energieszenarien die Verkehrsleistung sowohl im Jahr 2030 als auch 2050 in den Zielszenarien insgesamt nur um 1-2 % niedriger gegenüber dem jeweiligen Referenzszenario, auch der Modal-Split ändert sich nur minimal zugunsten des öffentlichen Verkehrs.

⁶ Hinzu kommt eine um 14% höhere Verkehrsleistung im nicht-motorisierten Rad- und Fußverkehr. Die gesamte Personenverkehrsleistung einschließlich nicht-motorisiertem Verkehr ist im Jahr 2030 im Klimaschutz-Szenario um 15% niedriger als im Basisszenario.

Im **Güterverkehr** zeigen alle drei Studien in den Maßnahmenszenarien einen deutlichen Anstieg der Verkehrsleistungen im Schienen- und Binnenschiffsverkehr gegenüber dem Referenzszenario. Der Verlagerungseffekt auf Schiene und Binnenschiff ist bei Renewability II mit mehr als doppelt so starken Zuwachsraten im Jahr 2030 im Klimaschutz- gegenüber Basisszenario deutlich stärker als bei Modell Deutschland und Energieszenarien. Die Gesamtverkehrsleistung über alle Güterverkehrsmittel ist in den Maßnahmenszenarien aller drei Studien leicht um 1-3 % höher als im jeweiligen Basisszenario.

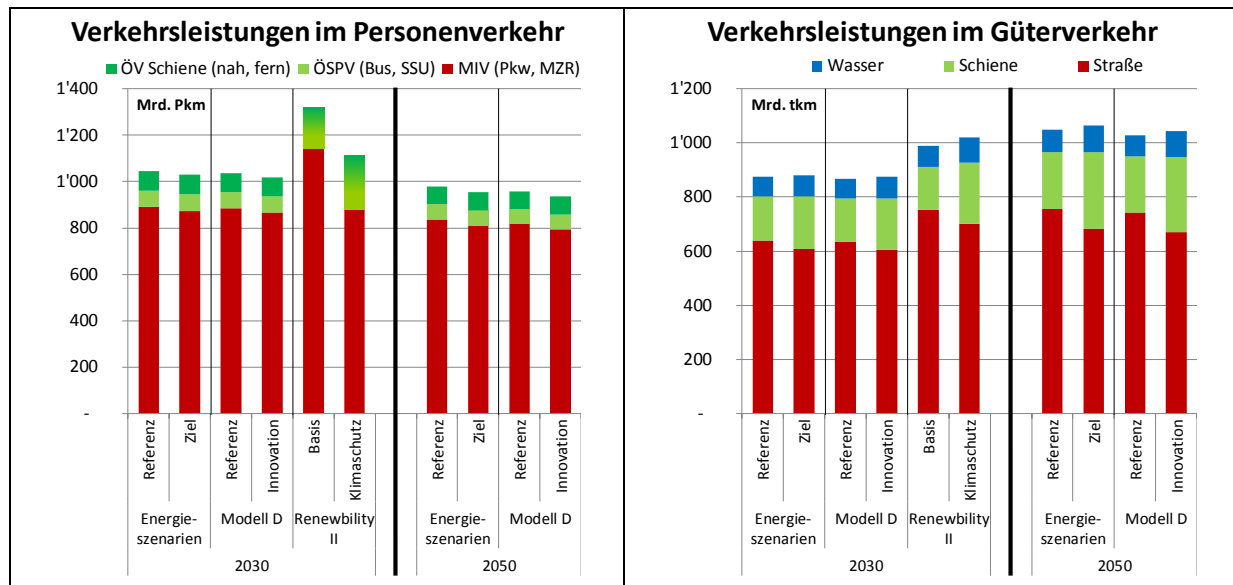


Abbildung 3: Vergleich der Verkehrsleistungen 2030 und 2050 in Referenz- und Maßnahmenszenarien

3.1.1.1 Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen der Verkehrsmodellierung

Zur Beurteilung der Unterschiede in den Verkehrsentwicklungen wurden die Grundlagen der Verkehrsmodellierung in den Studien analysiert: Welche wesentlichen Einflussparameter bestimmen die modellierte Entwicklung der Gesamtverkehrsnachfrage sowie den Modal-Split zwischen den Verkehrsmitteln? Welche Grundannahmen wurden zur Entwicklung der wesentlichen Einflussparameter in den Studien getroffen?

In den Studien werden überwiegend folgende Einflussparameter auf die zukünftige Verkehrsentwicklung in Deutschland genannt:

- **Bevölkerungsentwicklung** (Gesamtbevölkerung, Altersstruktur) und **Mobilitätsverhalten** (abhängig von Altersstruktur und Motorisierungsgrad, Transportpreisen bzw. Mobilitätsbudgets, Reisezeiten, ...) als wichtige Parameter für den Personenverkehr
- **Wirtschaftsentwicklung** (Bruttoinlandsprodukt BIP bzw. Bruttowertschöpfung, Außenhandel und Transitverkehr) als wichtige Parameter für den Güterverkehr.
- Entwicklung von **Verkehrsangebot** und **Verkehrsinfrastruktur**.

Allerdings bleiben die Erläuterungen zu Methoden und Datengrundlagen der Verkehrsmodellierung in den untersuchten Studien überwiegend sehr allgemein und enthalten wenig detaillierte Informationen. Dementsprechend ist ein differenzierter Vergleich zu wesentlichen Gemeinsamkeiten und Unterschieden der Verkehrsmodellierung in den Szenarien innerhalb des Rahmens dieser Kurzstudie nicht möglich.

Die wichtigsten Aussagen in den einzelnen Studien zu Modellansätzen und Einflussparametern sind in den nachfolgenden Tabellen als Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 4: Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung in Modell Deutschland

Modell Deutschland: Die Szenarien für den Verkehrssektor wurden in Zusammenarbeit mit der ProTrans AG erstellt und basieren auf den sozio-ökonomischen Rahmendaten und Energiepreisannahmen der Gesamtstudie. Es wird allgemein darauf verwiesen, dass das Szenario im Verkehr eine Entwicklung der „Welt, wie wir sie kennen“ fortführt (u.a. gesättigter Motorisierungsgrad, weiter wachsende individuelle Freizeitverkehre). Eine detaillierte Erläuterung der Verkehrsmodellierung erfolgt nicht. Einzelne verkehrsspezifische Aspekte werden hervorgehoben, aber ihr Gewicht in der Nachfragemodellierung nicht erläutert.

- Die **Personenverkehrsleistung** nimmt zukünftig insgesamt ab. Aber die Personenmobilität (km/P/a) nimmt weiter zu, da „bei gleichem Zeiteinsatz und gesteigener technologisch verfügbarer Geschwindigkeit die zurückgelegten Entfernungen zunehmen“. Als Folge der demografischen Entwicklung wird eine deutliche Zunahme der Altersmobilität (steigender Führerscheinbesitz und Motorisierung, mehr Freizeit- und Einkaufsverkehr) und damit verbunden ein leicht steigender Pkw-Bestand angenommen [WWF 2009, S. 94]. Infolge verringerter Haushaltsgrößen und unterstellter weiterer Individualisierungstendenz wird im MIV ein leichter Besetzungsrückgang angenommen. Für den ÖSPV wird ein Rückgang von Auslastung und Fahrleistungen infolge rückläufiger Bevölkerung und demografiebedingt verändertem Fahrverhalten angenommen. Für die Rückgänge im ÖV wird zudem auf eine Ausdünnung des ÖV-Angebots verwiesen, was sich im Preiswettbewerb mit dem MIV zunehmend auf Schwerpunkträume konzentriert.
- Die Verkehrsleistung im **Güterverkehr** wird entscheidend durch die Entwicklung von Wirtschaft und Außenhandel bestimmt. Dazu wird auf die Annahme einer trendmäßigen Fortführung der Vergangenheitsentwicklungen (volkswirtschaftliche Verflechtungen, Infrastrukturangebot) und darauf, dass die Güterverkehrsleistung deutlich stärker als das BIP wächst, hingewiesen. [WWF 2009, S. 93]. Der Verkehrsleistungsanstieg im Straßengüterverkehr wird durch eine Erhöhung der Fahrleistungen, v.a. aber durch einen Anstieg der Fahrzeugauslastungen erreicht [WWF 2009, S. 98].
- Unterschiede der Verkehrsentwicklungen im **Innovationsszenario** gegenüber dem Referenzszenario werden kurz erläutert, aber nicht näher begründet: Im Personenverkehr wird eine Abschwächung des Personenmobilitätsanstiegs durch kürzere Weglängen und mehr Wege im Langsamverkehr genannt, aber keine nennenswerte Verringerung des MIV-Anteils [WWF 2009, S. 209f]. Für den Güterverkehr wird im Innovationsszenario auf eine „güter- und relationsabhängige Verschiebung von der Straße“ auf Schiene und Binnenschiff sowie eine Verringerung der mittleren Transportweiten gegenüber dem Referenzszenario verwiesen und mit ausgewählten optimierten oder verlagerten Lkw-Transportprozessen unterlegt. Gleichzeitig wird auf systembedingte Umwegfahrten auf Schienen- und Wassernetzen und vermehrte Vor- und Nachläufe auf der Straße durch die Verlagerungen hingewiesen [WWF 2009, S. 210]. Die mittlere Beladung von Lkw (Tonnen-km/Fahrzeug-km) steigt im Innovationsszenario schwächer als im Referenzszenario, da im Innovationsszenario aufgrund der erhöhten Schienentransporte mehr kleinteilige Lkw-Verteilverkehre in der Fläche erfolgen als im Referenzszenario [WWF 2009, S. 217].

Tabelle 5: Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung in den Energieszenarien

Die **Energieszenarien** enthalten kaum methodische Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung.

- Im **Personenverkehr** werden für MIV sowie v.a. ÖPNV und Bahnverkehr als Folge des Bevölkerungsrückgangs rückläufige Verkehrsleistungen angenommen. Nur für den Flugverkehr wird eine Zunahme angenommen [EWI 2010, S. 88].
- Im **Güterverkehr** wird auf den entscheidenden Einfluss von der Entwicklung der Wirtschaft und des Außenhandels verwiesen [EWI 2010, S. 88]. Darüber hinaus werden keine Erläuterungen gegeben.

Auch die Unterschiede der Verkehrsentwicklungen in den Zielszenarien gegenüber den Referenzszenarien werden in der Studie aufgeführt, jedoch nicht begründet.

Tabelle 6: Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung in der Leitstudie 2011

In der **Leitstudie 2011** erfolgte keine dezidierte Modellierung. Die Verkehrsentwicklungen wurden analog zur vorherigen Leitstudie 2010 weitgehend an die Studien Renewbility I, Energieszenarien und Modell Deutschland angelehnt. Im Güterverkehr wurde für die Jahre 2040 und 2050 von etwas niedrigeren Verkehrsleistungen als in diesen Studien ausgegangen [BMU 2012, S. 46], was jedoch nicht begründet wird.

Tabelle 7: Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung in TREMOD

Das Modellinstrumentarium **TREMOD** liegt derzeit in der Version 5.3 vor, die Modellierung der Verkehrsentwicklungen im Trendszenario ist im wissenschaftlichen Grundlagenbericht dokumentiert. Das Trendszenario lehnt sich an die Verkehrsprognose 2025 (nachfolgend VP 2025) an [BMVBS 2007]. Die dort getroffenen Annahmen gelten somit prinzipiell auch für TREMOD. Die wesentlichen Rahmenbedingungen der VP 2025 betreffen Bevölkerung (Gesamtentwicklung, Altersstruktur, Erwerbstätigkeit, Pkw-Dichte), Wirtschaftsentwicklung (Bruttowertschöpfung), Verkehrsmittelspezifische Kosten und Preise, Verkehrsinfrastrukturausbau sowie Maßnahmen [IFEU 2012, S. 44]. In mehreren Bereichen erfolgen Anpassungen und erweiterte Annahmen gegenüber der VP 2025:

- Da das TREMOD-Trendszenario bis zum Jahr 2030 geht, wird die Entwicklung der Verkehrsleistungen von 2025 bis 2030 in TREMOD moderat fortgeschrieben.
- Die VP 2025 beschreibt nur einen Teil der notwendigen Parameter, um für jeden Verkehrsträger ein konsistentes Verkehrsmengengerüst zu entwickeln. Daher werden in TREMOD weitergehende verkehrsträgerspezifische Annahmen getroffen, welche die Entwicklung der Fahr- und Verkehrsleistungen mit dazu passenden Entwicklungen der Fahrzeugauslastungen verknüpfen. Alle Annahmen wurden in einem gemeinsamen Abstimmungsprozess von BMU, UBA und IFEU festgelegt und sind in der TREMOD-Dokumentation qualitativ beschrieben [IFEU 2012, S. 46ff].

Für den **Personenverkehr** werden im TREMOD-Bericht, bezugnehmend auf die VP 2025, einige Entwicklungen der Randbedingungen qualitativ erläutert: u.a. ein leichter Bevölkerungsrückgang bei ansteigendem Durchschnittsalter, moderate Transportpreiszunahmen, ein zunehmender Wettbewerb im öffentlichen Nahverkehr sowie spürbare Fahrzeitverkürzungen im Schienenverkehr. Begründet durch den Bevölkerungsrückgang erfolgt nach 2025 nur ein sehr geringer MIV-Anstieg [IFEU 2012, S. 45ff].

Für den **Güterverkehr** werden in TREMOD aus der VP 2025 hauptsächlich die für 2025 erwarteten Verkehrsleistungen übernommen und bis 2030 fortgeschrieben. Für den Straßengüterverkehr werden anschließend zur Verkehrsleistung konsistente Fahrleistungen nach Lkw-Größenklassen und Auslastungsgra-

de modelliert. Weitere im TREMOD-Bericht genannte Annahmen nach VP 2025 sind: rückläufige Kosten, bedarfsgerechter Ausbau der Verkehrsinfrastruktur nach BVWP 2003, weitere Liberalisierung des Schienengüterverkehrs sowie spürbare Fahrzeitverkürzungen im Schienengüterverkehr [IFEU 2012, S. 44].

Tabelle 8: Erläuterungen zur Verkehrsmodellierung in Renewbility

Das Modellinstrumentarium Renewbility fand bislang unter dem Titel Renewbility (im Folgenden: Renewbility I) und Renewbility II zweimal Anwendung [vgl. Öko/DLR 2009 a+b und Öko/DLR 2012]. In beiden Projekten werden jeweils ein Basisszenario und ein Klimaschutzszenario berechnet.

Das **Basisszenario** baut jeweils auf der VP 2025 auf, wobei eine Anpassung der Daten und Erkenntnisse durchgeführt und der Betrachtungszeitraum auf das Jahr 2030 ausgeweitet wird. Dies geschieht, indem die in der VP 2025 angenommenen Rahmenbedingungen mit weiteren Annahmen und Werten auf Basis aktueller Statistiken und Prognosen ergänzt sowie teilweise aktualisiert werden. Dazu gehört beispielsweise eine Berücksichtigung der weltweiten Finanz- und Wirtschaftskrise, von Effizienzsteigerungen durch neue Kraftfahrzeugtechnologien oder die Berücksichtigung aktualisierter Prognosen zur Marktdurchdringung batterieelektrischer Fahrzeuge (vgl. [Öko/DLR 2009b, S. 13ff] und [Öko/DLR 2012, S. 9]).

Im Personenverkehr erfolgt die **Verkehrsmodellierung** durch die Kombination eines mikroskopischen Verkehrsnachfrage-Modells (TAPAS), das in ausgewählten repräsentativen Raumtypen angewandt wird, mit einer makroskopischen Modellierung für ganz Deutschland. Im Güterverkehr wird auf eine rein makroskopische Modellierung zurückgegriffen. Eine ausführliche Erläuterung zu den angewandten Methodiken der Verkehrsmodellierung sowie eine Beschreibung der Datengrundlage findet sich in den Endberichten von Renewbility I [Öko/DLR 2009a S. 9ff].⁷

- Wichtige Modellparameter im **Personenverkehr** betreffen die zukünftige Entwicklung der Bevölkerung und des Verkehrsverhaltens. U.a. werden in der Modellierung eine alternde Gesellschaft, ein steigender Anteil kleinerer Haushalte, ein weiterer, aber abgeschwächter Anstieg des Pkw-Bestandes sowie leicht steigende reale Mobilitätsbudgets auf Basis amtlicher und wissenschaftlicher Statistiken und Prognosen modellseitig hinterlegt. Mobilitätsparameter werden auf Basis der Erhebung „Mobilität in Deutschland“ [MiD 2002+2008] in die Modelle integriert.
- Die Verkehrsleistung im **Güterverkehr** wurde für Straße, Schiene und Binnenschiff in Anlehnung an die VP 2025 modelliert, wobei Anpassungen aufgrund der Wirtschaftskrise und weiterer neuerer Entwicklungen berücksichtigt wurden [Öko/DLR 2009a, S. 47ff]. Für den Straßengüterverkehr erfolgten spezielle Modellierungen der deutschlandweiten Verkehrserzeugung für verschiedene Wirtschaftszweige (Wirtschaftsverkehrsnachfragemodell in Renewbility). Gleichzeitig wurde aus den Verkehrsverflechtungen der VP 2025 der Lkw-Transitverkehr selektiert und ebenfalls in die Modellierungen integriert. In Renewbility II wird gegenüber Renewbility I ein verringerter Verkehrsleistungszuwachs angenommen; als Hauptursachen werden ein langsames Wirtschaftswachstum infolge der internationalen Wirtschafts- und Finanzkrise sowie aktualisierte Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung und Veränderungen in der Wirtschaftsstruktur genannt [Öko/DLR 2012, S. 9].

⁷ Der finale Endbericht zu Renewbility II lag zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments noch nicht vor. Erste Informationen bezüglich der Annahmen und ausgewählte Ergebnisse finden sich der Ergebnisbroschüre zu Renewbility II [Öko/DLR 2012], die Informationen zu den aktualisierten Annahmen bereitstellt sowie ausgewählte Ergebnisse enthält.

Im **Klimaschutz-Szenario** werden Änderungen der Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr als Folge eines Maßnahmenbündels modelliert. Hierzu werden die im Basisszenario verwendeten Modellsätze verwendet, wobei die Maßnahmen insbesondere über Veränderungen der Eingangsdaten in die Modelle mit einfließen. Wesentliche Maßnahmen im Klimaschutzszenario in Renewbility II sind die Ausweitung des Angebots im öffentlichen Verkehr, eine Verschärfung der CO₂-Emissionsstandards für PKW, die Beimischung von Biokraftstoffen oder die Förderung des kombinierten Verkehrs durch den Ausbau von Gleisanschlüssen [vgl. DLR/Öko 2012, S. 11; für Renewbility I siehe Öko/DLR 2009b, S. 27ff.]. Isolierte Aussagen zur Wirkmächtigkeit einzelner Maßnahmen lassen sich aufgrund des Ansatzes, diese als Maßnahmenbündel zu modellieren, nicht treffen⁸.

Korrelation modellierter Verkehrsleistungen zu sozioökonomischen Rahmendaten

Für einige der genannten Rahmenbedingungen enthalten die untersuchten Studien auch Angaben zu angenommenen zukünftigen Entwicklungen. Damit konnte näher untersucht werden, wie gut Unterschiede bei den Verkehrsentwicklungen möglicherweise allein durch Unterschiede solcher einzelnen Rahmenbedingungen begründbar sind.

- Für den **Personenverkehr** wurden Korrelationen zur Bevölkerungsentwicklung untersucht.
- Für den **Güterverkehr** wurde die Korrelation zum Wirtschaftswachstum untersucht.

Personenverkehr

Bei der Bevölkerungsentwicklung wird in den untersuchten Studien grundsätzlich ein ähnlicher Entwicklungstrend mit einer leicht abnehmenden Bevölkerung angenommen (Abbildung 4, links). Unterschiede gibt es im Ausmaß der Entwicklungen:

- In TREMOD wird auf Basis der Verkehrsprognose 2025 des Bundes (VP 2025, [BMVBS 2007]) ein Bevölkerungsrückgang 2005-2030 um nur ca. 2 % zugrunde gelegt. In der Leitstudie 2011 und in Renewbility II wird eine Abnahme der Bevölkerung um etwa 4% angenommen⁹. Am stärksten ist der Rückgang in Modell Deutschland um knapp 5 %.
- Für 2030-2050 liegen die Studien mit diesem Zeithorizont nahe beieinander.

Die Entwicklung der spezifischen Verkehrsleistungen (Personen-km/Einwohner) variiert deutlich zwischen den berücksichtigten Studien (Abbildung 4, rechts). Demnach lassen sich die unterschiedlichen Gesamtentwicklungen des Personenverkehrs in den Studien nicht allein auf unterschiedliche Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung zurückführen. TREMOD und Re-

⁸ In Renewbility I werden über die Modellierung einzelner Szenarien auch einzelne Maßnahmen betrachtet, wodurch isolierte Rückschlüsse auf die verkehrlichen Effekte dieser möglich sind [vgl. Öko/DLR 2009b, S. 103ff.].

⁹ In Renewbility I wurde für das Jahr 2030 noch eine Bevölkerungszahl von ca. 81 Mio. Einwohnern genutzt, während in Renewbility II im Jahr 2030 nur noch 79,1 Mio. Einwohner zugrunde gelegt wurden (Datenbasis: Regionalisierte Bevölkerungsprognose des Bundesamts für Raumwesen und Raumordnung, vgl. [Öko/DLR 2012, S. 6]).

newbility haben bis 2030 eine Zunahme der Verkehrsleistungen pro Einwohner, wobei die Zunahme in Renewbility deutlich stärker ist als in TREMOD. Dagegen ist in den drei sektübergreifenden Szenarienstudien eine weitgehende Stagnation der Verkehrsleistungsentwicklung pro Einwohner zu erkennen.

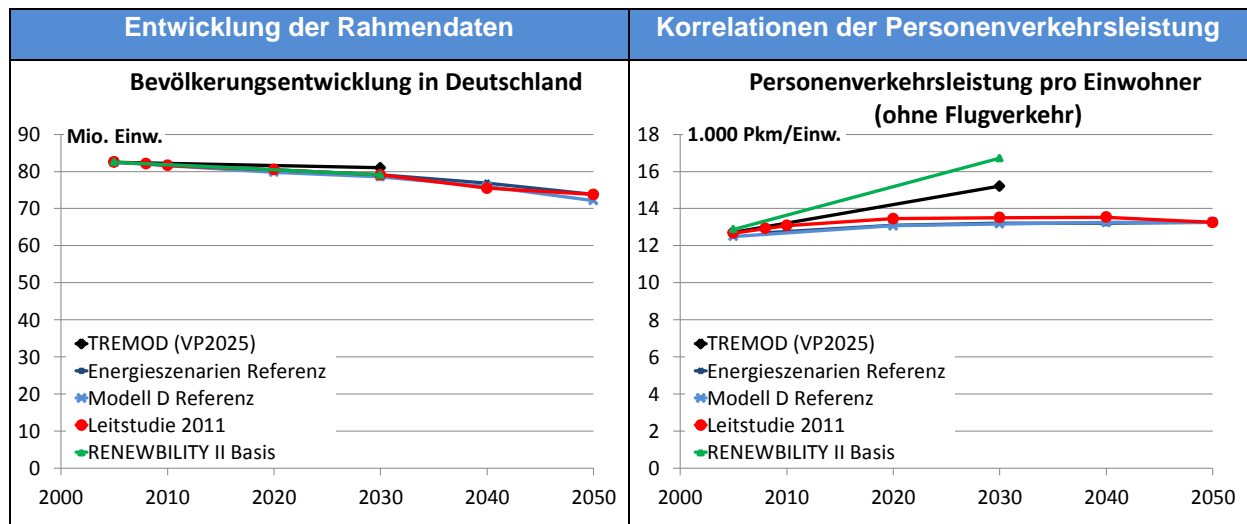


Abbildung 4: Korrelationen der Entwicklung der Personenverkehrsleistungen in den Referenzszenarien zur Bevölkerungsentwicklung

Güterverkehr

In der Verkehrsprognose 2025 [BMVBS 2007], der Grundlage für die Verkehrsentwicklung in TREMOD, wird ein jährliches Wirtschaftswachstum um 1,7 % zugrunde gelegt. In Renewbility II wird ein niedrigeres Wirtschaftswachstum um 1,1 % pro Jahr angesetzt (Renewbility I: 1,7 %). Die Szenarienstudien Modell Deutschland, Energieszenarien und Leitstudie nehmen noch niedrigere jährliche Wachstumsraten um 0,5-0,9 % pro Jahr an (Abbildung 5, links).

Gemäß den Aussagen in den Studien ist das Wirtschaftswachstum eine zentrale Einflussgröße für die Verkehrsleistungsentwicklungen im Güterverkehr. Abbildung 5, rechts, vergleicht die Korrelationen der Güterverkehrsentwicklung zur BIP-Entwicklung in den Studien:

- Bis zum Jahr 2030 zeigen alle untersuchten Studien ähnliche Korrelationen der Güterverkehrsleistungen zum BIP. In allen Untersuchungen steigt die Güterverkehrsleistung pro BIP zukünftig überproportional an, wobei der Anstieg bei Renewbility II etwas stärker ist als in den übrigen Studien.
- Unterschiede der Verkehrsleistungsentwicklungen nach 2030 können über die Wirtschaftsentwicklung jedoch nicht erklärt werden. In der Leitstudie 2011 sinkt im Zeitraum 2030-2050 die Güterverkehrsleistung pro BIP. Dagegen schwächt sich in Modell Deutschland und Energieszenarien der Anstieg der Verkehrsleistungen pro BIP zwar stark ab, zu einer Trendumkehr kommt es in diesen Studien aber nicht.

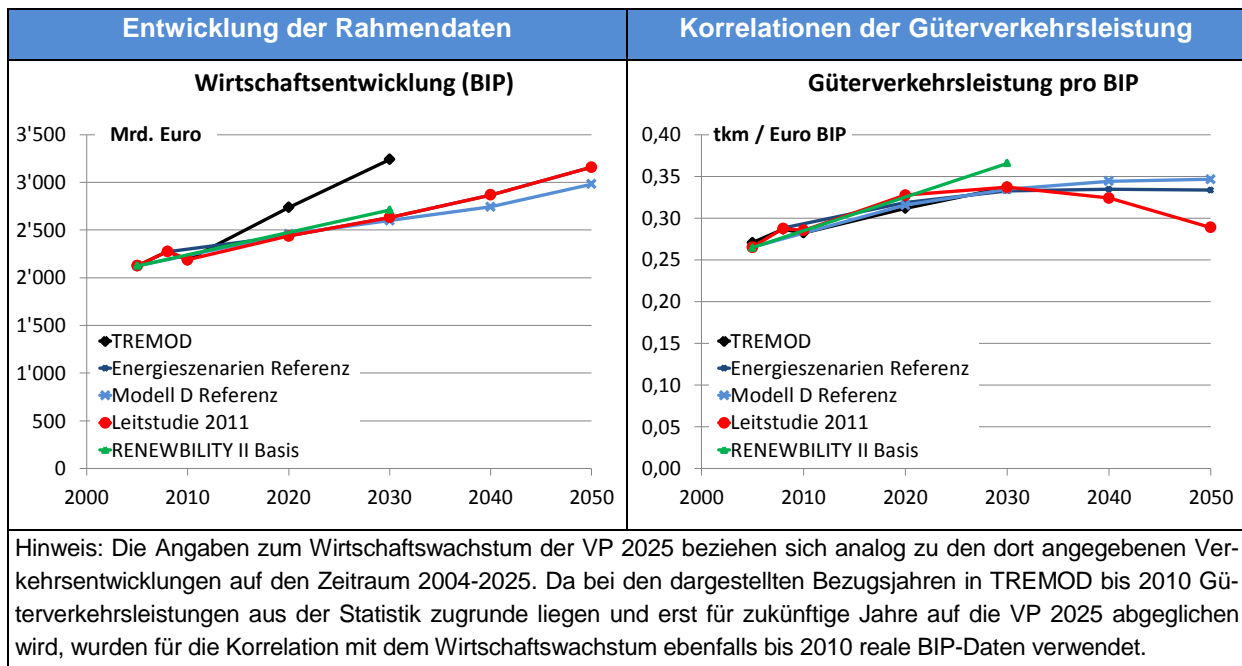


Abbildung 5: Korrelationen der Entwicklung der Güterverkehrsleistungen in den Referenzszenarien zur Wirtschaftsentwicklung (BIP)

Die unterschiedlichen Verkehrsleistungsentwicklungen in den untersuchten Studien können nur zu einem geringen Teil anhand der hier betrachteten zentralen Rahmendaten erklärt werden. Vor allem im Personenverkehr lassen sich die Entwicklungstrends nicht allein anhand unterschiedlicher Bevölkerungs- und Pkw-Bestandsentwicklungen erklären. Weitere, in den Studien z.T. genannte Parameter (z.B. Fahrtkosten, Reisezeiten) haben wesentliche Bedeutung in der Modellierung. Für eine tiefere Beurteilung der Ursachen unterschiedlicher Verkehrsentwicklungen in den Studien wäre daher ein umfassender Vergleich der eingesetzten Modelle einschließlich der zugrunde liegenden Entwicklungen aller wichtigen Einflussparameter notwendig. Dies ist anhand der verfügbaren Dokumentationen nicht möglich.

3.1.2 Wesentliche Erkenntnisse für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

Die zukünftige Entwicklung der Verkehrsleistungen im Personen- wie auch Güterverkehr unterscheidet sich zwischen den Referenzszenarien der untersuchten Studien teilweise deutlich. Ursachen dieser unterschiedlichen Entwicklungen können sowohl in den Modellmethoden, insb. relevanten Einflussparametern, als auch Annahmen zu Basisdaten liegen. Differenzierte Aussagen sind allein anhand der vorliegenden Dokumentationen der Studien nicht möglich, sondern erfordern eine detaillierte Analyse der Modelle, die im Rahmen dieser Kurzstudie nicht möglich war. Für die Berechnung von Szenarien in der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie sollten Verkehrsentwicklungen vorliegender Szenarienstudien demnach nicht direkt übernommen werden, da ohne weitergehende Analysen noch keine Einschätzung zur Eignung der unterschiedlichen Szenarien für die Fragestellungen der MKS möglich ist.

Für die Ableitung eines plausiblen Trends zukünftiger Verkehrsentwicklungen in Deutschland wird voraussichtlich zum Jahresende 2013 eine aktualisierte Verkehrsprognose des Bundes mit Zeithorizont 2030 bereitstehen¹⁰, die auch für ein Trendszenario im Rahmen der MKS verwendet werden sollte. Trendentwicklungen für den darüber hinausgehenden Zeitraum 2030-2050 müssen auf anderer Grundlage abgeleitet werden. Als Basis dafür ist eine detaillierte Auseinandersetzung mit den in vorliegenden Studien eingesetzten Modellen, relevanten Einflussparametern und Annahmen zu zukünftigen Entwicklungen sinnvoll – sowie die Übernahme geeigneter Grundlagen in ein abgestimmtes Modellinstrumentarium der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Ein solcher Modellvergleich sollte über die in dieser Kurzstudie berücksichtigten Szenarienstudien hinausgehen, da auch in anderen Kontexten Untersuchungen zukünftige Entwicklungen des Verkehrs in Deutschland erfolgen.

Potenziale zur zusätzlichen Verringerung der Verkehrsnachfrage bzw. Verlagerung zwischen Verkehrsmitteln gegenüber einer Referenzentwicklung werden in den vorliegenden Szenariestudien sehr unterschiedlich thematisiert. Die Zielszenarien der sektorübergreifenden Szenariestudien konzentrieren sich auf technische Pfade zur Minderung des Energiebedarfs im Verkehr. Vermeidungs- und Verlagerungsmaßnahmen werden nur eingeschränkt bzw. gar nicht betrachtet, damit sind aus diesen Szenarien kaum Einschätzungen zu deutschlandweiten Potenzialen einer Verkehrsvermeidung oder -verlagerung möglich. Im Modellinstrumentarium Renewbility werden die Wirkungen ausgewählter politischer Maßnahmen modelliert. Für andere Maßnahmenbündel können sich dementsprechend andere verkehrsvermeidende und -verlagernde Effekte ergeben.

Für die Abschätzung von Vermeidungs- und Verlagerungspotenzialen durch eine deutschlandweite Mobilitätsstrategie im Rahmen der MKS können demnach keine quantifizierten Potenziale direkt aus vorliegenden Szenariestudien übernommen werden. Auch hier erscheint eine tiefgehende Analyse der in den Studien verwendeten Modelle sowie zentraler Einflussfaktoren für eine Vermeidung bzw. Verlagerung von Verkehr sinnvoll. Grundsätzlich erscheint für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Aufbau eines Modellinstrumentariums hilfreich, das sowohl die Modellierung der Wirkung ausgewählter Maßnahmen(-bündel) ermöglicht als auch zielorientierte Analysen, welche Änderungen der Gesamtverkehrsnachfrage bzw. des Modal-Splits im Personen- und Güterverkehr zur Erreichung vorgegebener Energie- und Umweltziele führen würden.

¹⁰ Derzeit lässt das BMVBS eine Verkehrsprognose mit Zeithorizont 2030 erarbeiten, die bis Ende 2013 fertiggestellt sein soll. (<http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/UI/verkehrsprognose-2030.html>)

3.2 Entwicklung von Antriebstechnologien und Energieeffizienz

In den untersuchten Studien werden verschiedene Pfade zukünftiger Antriebstechnologien im Verkehr ebenso wie zur Entwicklung der Energieeffizienz der Fahrzeuge betrachtet. Der Schwerpunkt liegt in den Studien vor allem auf Pkw, während die Betrachtungen für Lkw sowie insb. für die Verkehrsträger Schiene, Wasser und Luft deutlich weniger differenziert sind.

- In Modell Deutschland, in den Energieszenarien und in Renewbility werden Referenzentwicklungen sowie ambitioniertere Entwicklungen in maßnahmenorientierten Szenarien definiert.
- Die Leitstudie 2011 definiert drei alternative Zielszenarien mit Fokus auf einzelne alternative Antriebstechnologien zur Nutzung von erneuerbarem Strom bzw. strombasierten Kraftstoffen („Power to Gas“) im Verkehr (A: Elektromobilität + EE-Wasserstoff, B: Elektromobilität + EE-Methan, C: Elektromobilität).
- Für TREMOD wurde nur das offizielle Trendszenario betrachtet, da es derzeit keine abgestimmten veröffentlichten Maßnahmenzenarien gibt.

3.2.1 Pkw

3.2.1.1 Antriebstechnologien

Die eingesetzten Antriebstechnologien (Diesel-, Benzin-, Gas-, Hybrid-, Elektro-, Wasserstoffantrieb) haben zentrale Bedeutung für die mögliche Nutzung erneuerbarer Energieträger im Verkehr und für die Anteile der verschiedenen Energieträger am Verbrauch und den Emissionen. Dabei bestimmt die Entwicklung der Neuzulassungen den Pkw-Bestand. Die jährlichen Fahrleistungen pro Fahrzeug sind wiederum relevant für die Gesamtfahrleistung der einzelnen Antriebsarten. In den berücksichtigten Studien liegen Angaben meist nur zu einigen dieser Parameter vor:

- In den Energieszenarien wird die Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen sowie der Pkw-Bestände für verschiedene Antriebstechnologien dargestellt.
- In Modell Deutschland sind Pkw-Bestand und Aufteilung der Pkw-Fahrleistungen je Antriebsart dargestellt.
- TREMOD enthält Angaben zu Beständen, Neuzulassungen und Fahrleistungsanteilen differenziert nach Antriebsarten.
- Aus den Berichten zu Renewbility sind keine detaillierten Zahlenwerte zu zukünftigen Pkw-Flotten verfügbar.¹¹

¹¹ In der Leitstudie 2011 sind keine Referenzentwicklungen zukünftiger Pkw-Flotten abgeleitet, sondern nur drei Zielszenarien mit unterschiedlichen Priorisierungen für alternative Antriebstechnologien

Referenzszenarien

In Abbildung 6 wird die zeitliche Entwicklung des Pkw-Bestandes nach Antriebsarten in den Referenzszenarien in Modell Deutschland, Energieszenarien und TREMOD gezeigt:

- Der Anteil konventioneller **Benzin-Pkw** nimmt in allen Studien ab. Davon wird ein signifikanter Anteil durch hybridisierte Benzin-Pkw „ersetzt“. Insgesamt sinkt der Anteil von Benzin-Pkw am Bestand bis 2030 auf 50-60 % der gesamten Pkw-Flotte. Bis 2050 sinkt der Flottenanteil in den zwei Studien mit diesem Zeithorizont auf 40-45 %, wobei der Anteil von Hybrid-Pkw erheblich variiert.
- Der Anteil von **Diesel-Pkw** an Bestand und Fahrleistungen nimmt bis 2020/2030 zu und geht anschließend bis 2050 zurück – in Modell Deutschland auf 24 %, in den Energieszenarien auf einen halb so hohen Anteil von nur noch 12 %.
- Pkw mit **Gasantrieb** (CNG, LPG) haben in Modell Deutschland einen signifikanten Anstieg bis 2050 auf 7 %, möglicherweise auch in Energieszenarien, wo Gas-Pkw nicht explizit ausgewiesen werden. In TREMOD ist der Anteil von Gas-Pkw in allen Jahren sehr gering.
- Pkw mit **alternativen Antriebstechnologien** haben erst ab 2030 einen zunehmenden Anteil an Bestand und Fahrleistungen. In Modell Deutschland steigt der Anteil bis 2050 auf knapp 30 %, davon ein sehr geringer Anteil mit Brennstoffzelle (H₂), Plug-In-Hybride und batterieelektrische Pkw mit nahezu gleich hohen Anteilen. In den Energieszenarien wird für 2050 ein Anteil von 36 % alternativer Antriebstechnologien ausgewiesen, davon etwa 60 % Plug-In-Hybride, der Rest batterieelektrisch. Im derzeitigen TREMOD-Trendszenario vom September 2012 sind noch keine Elektro-Pkw enthalten¹².

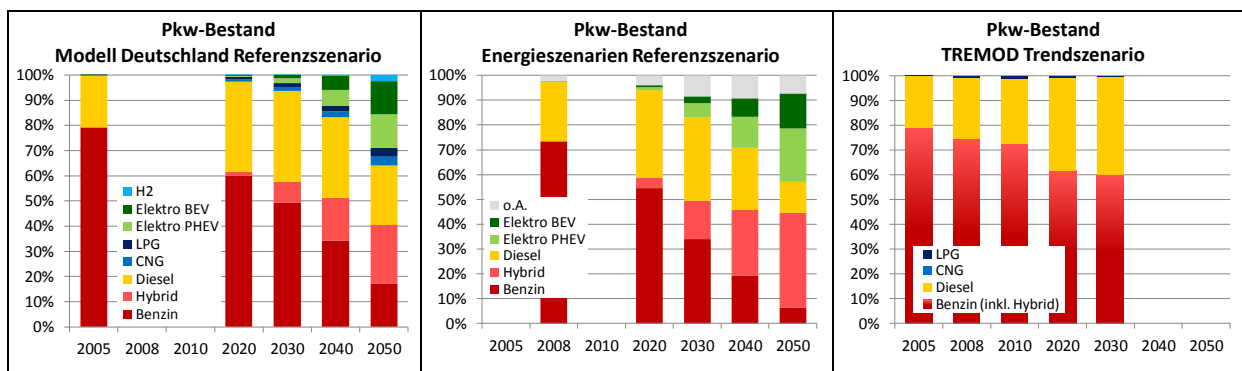


Abbildung 6: Zusammensetzung der Pkw-Bestände nach Antriebstechnologien in den Referenzszenarien der untersuchten Studien

¹² Ein neues TREMOD-Trendszenario inkl. alternativer Antriebe wird zum Jahresende 2013 mit der neuen TREMOD-Version 5.4 bereitstehen. In maßnahmenorientierten Szenarien werden alternative Antriebe bereits heute modelliert (z.B. [NOW 2013, IFEU 2013]).

Maßnahmenorientierte Szenarien

Abbildung 7 zeigt Entwicklungen der Pkw-Flotten in maßnahmenorientierten Szenarien von Modell Deutschland und Energieszenarien sowie in einem Szenariopfad der Leitstudie 2011.¹³

- In Modell Deutschland und Energieszenarien wird in den maßnahmenorientierten Szenarien eine starke Reduktion reiner Benzin-Pkw sowie Diesel-Pkw gegenüber den Referenzszenarien angenommen. Im Gegenzug erhöhen sich die Anteile von hybridisierten Benzin-Pkw sowie Plug-In-Hybrid und Elektro-Pkw, in Modell Deutschland zudem von Gas-Pkw.
- In der Leitstudie 2011 werden 3 exemplarische Szenarien mit speziellen Vorgaben zu alternativen Antriebstechnologien für die Nutzung von Strom sowie strombasierten Kraftstoffen („Power to Gas“) im Verkehr gerechnet. Aus der Studie sind detaillierte Werte nur für die Fahrleistungen (nicht Bestände) in Szenario A zu entnehmen (vgl. Abbildung 7). Analog zu den anderen Studien wird ein stark abnehmender Fahrleistungsanteil von Pkw mit Verbrennungsmotor angenommen, während der Anteil elektrisch betriebener Pkw deutlich ansteigt. Hinzu kommt in Szenario A ein signifikanter Anteil von Pkw mit Wasserstoffantrieb (Brennstoffzelle, Wasserstoffmotor), die in den Szenarien der anderen Studien kaum vorkommen. In Szenario B der Leitstudie 2011 erhöht sich der Anteil von mit EE-Methan betriebenen Gas-Pkw deutlich, während in Szenario C die gesamte Pkw-Flotte aus Elektro-Pkw (PHEV, BEV) besteht (vgl. [BMU 2012, Abb. 3.5]).

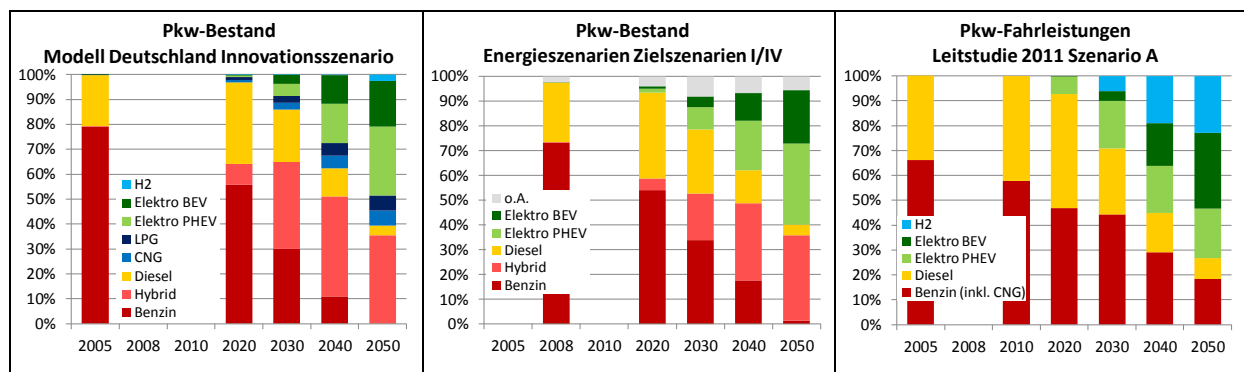


Abbildung 7: Zusammensetzung von Pkw-Beständen bzw. Pkw-Fahrleistungen nach Antriebstechnologien in maßnahmenorientierten Szenarien

¹³ Für das Klimaschutz-Szenario in Renewability I wird eine Aufteilung der Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2030 nach Antriebsarten (Benzin, Diesel, PHEV, BEV) abhängig von der Fahrzeuggrößenklasse (klein, mittel, groß) im Endbericht dargestellt [Öko/DLR 2009b, 77], die jedoch keine Übertragung in Pkw-Bestands bzw. -Fahrleistungszusammensetzungen erlaubt.

3.2.1.2 Energieeffizienz

In allen untersuchten Studien wird ein Rückgang der spezifischen Energieverbräuche von Pkw aller Antriebstechnologien angenommen. Abbildung 8 vergleicht die Verbrauchsreduktionen der Pkw-Flotten in den Referenzszenarien, soweit in den Studien angegeben¹⁴.

Alle Studien nehmen eine deutliche Verbrauchsreduktion für **Pkw mit Verbrennungsmotor** an.

- Für die **Benzin-Pkw-Flotte** wird für den Zeitraum 2005-2030 in TREMOD und Leitstudie 2011 ein starker Verbrauchsrückgang um 42 % bzw. 48 % angenommen, der teilweise auf die hier eingerechnete zunehmende Hybridisierung der Pkw zurückzuführen ist. In Modell Deutschland beträgt der Verbrauchsrückgang für Benzin-Pkw (gewichtet über konventionell & Hybrid) dagegen 33 % (ohne Hybridisierung wäre der Rückgang 30 %).
- Nach 2030 schwächt sich der Verbrauchsrückgang in der Leitstudie 2011 deutlich ab – der Verbrauchsrückgang 2030-2050 beträgt nur 13 % -, während in Modell Deutschland durch die stark zunehmende Hybridisierung ein weiterer Verbrauchsrückgang um 23 % angenommen wird. Insgesamt beträgt die spezifische Verbrauchsreduktion bei Benzin-Pkw 2005-2050 in Modell Deutschland 48 % und ist damit etwas schwächer als in der Leitstudie 2011 (um 55 %).
- Die spezifischen Verbräuche von **Diesel-Pkw** sinken in Modell Deutschland sowohl im Zeitraum bis 2030 als auch darüber hinaus bis 2050 deutlich schwächer als in TREMOD und in der Leitstudie 2011. 2005-2050 wird in der Leitstudie 2011 ein Verbrauchsrückgang in der Diesel-Pkw-Flotte um 50 % angenommen, in Modell Deutschland nur um 34 %.

Nur Modell Deutschland und Leitstudie enthalten spezifische Verbrauchsangaben für Elektro-Pkw. Diese liegen insgesamt deutlich niedriger als bei Pkw mit Verbrennungsmotor und nehmen zukünftig ebenfalls weiter ab.

- Bei **Plug-In-Hybrid-Pkw** (PHEV) wird für 2020-2050¹⁵ in Modell Deutschland ein Rückgang um 22 %, in der Leitstudie 2011 um 31 % angenommen. In der Leitstudie ist ergänzend angegeben, dass 20 % des benötigten Fahrstroms durch den internen Verbrennungsmotor bereitgestellt werden [BMU 2012, S. 133]. In Renewability II wird etwa 1/3 der Fahrleistungen nicht im elektrischen Fahrmodus erbracht [Öko/DLR 2012, S. 11].
- Bei reinen **batterieelektrischen Pkw** (BEV) wird 2005-2050 in Modell Deutschland und Leitstudie 2011 eine ähnliche Reduktion der spezifischen Verbräuche um ca. 30 % angenommen.

¹⁴ In den Energieszenarien wird die Energieeffizienz von Pkw nach Antriebsart nur für Neuzulassungen dargestellt. Spezifische Verbrauchsentwicklungen der Flotte des jeweiligen Bezugsjahres gibt es nur als aggregierte Angaben über alle Antriebstechnologien (Verbrennung, Elektro gemischt).

¹⁵ Für 2005 gibt es keinen Verbrauchswert in Modell Deutschland.

In Modell Deutschland und Leitstudie 2011 werden auch für **Pkw mit Wasserstoffantrieb** Verbrauchsangaben gemacht (nicht in der Abb.). In Modell Deutschland wird für Pkw mit **Brennstoffzelle** eine Verbrauchsreduktion 2005-2050 um 39 % angenommen (2030-2050 um 8 %), in der Leitstudie für eine gemischte Flotte von Pkw mit Brennstoffzelle und mit **Wasserstoff-Verbrennungsmotor** eine Verbrauchsreduktion 2005-2050 um 55 % (2030-2050 um 25 %).

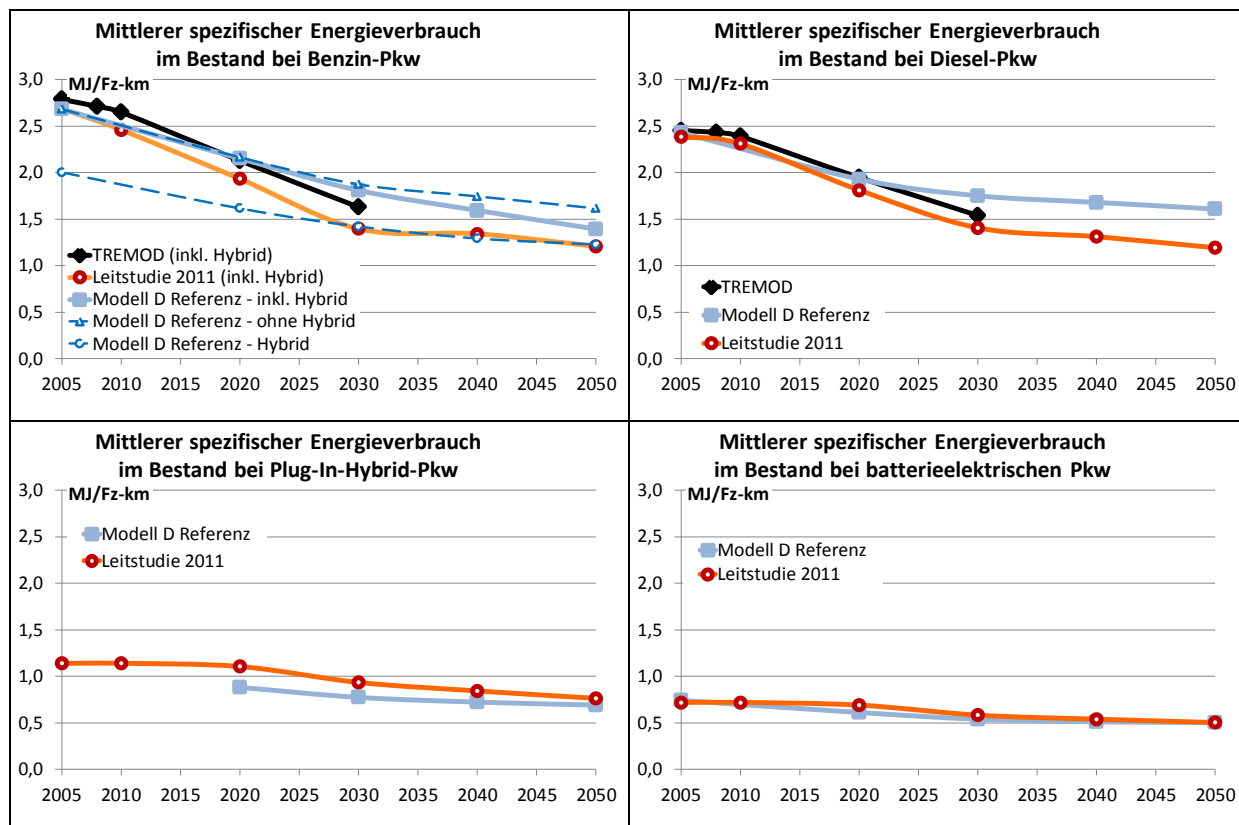


Abbildung 8: Entwicklung der Energieeffizienz von Pkw nach Antriebstechnologien in den Referenzszenarien der untersuchten Studien

In den maßnahmenorientierten Szenarien in Modell Deutschland, Energieszenarien und Renewability I und II werden zusätzliche Effizienzverbesserungen der einzelnen Antriebstechnologien gegenüber den Referenzszenarien angenommen. Abbildung 9 zeigt die Zusatzminderungen der spezifischen Verbräuche für Modell Deutschland und Energieszenarien für 2050.

- In Modell Deutschland werden zusätzliche Effizienzverbesserungen für alle Antriebstechnologien angenommen – v.a. für Pkw mit Ottomotor (Benzin, Gas), begrenzt auch für Diesel-Pkw sowie Plug-In-Hybrid-Pkw, jedoch kaum für rein batterieelektrische Pkw.
- In den Energieszenarien werden nur für Pkw mit Verbrennungsmotor zusätzliche Effizienzsteigerungen angenommen. Diese sind bei reinen Benzin- und Diesel-Pkw deutlich geringer als bei Hybrid-Pkw. In der Studie wird darauf verwiesen, dass prinzipiell weitere Einsparungen möglich wären, die wegen sinkender Attraktivität konventioneller Pkw für die Hersteller nicht angenommen werden [EWI 2010, S. 93].

Ein Vergleich der angenommenen Zusatzminderungen zwischen Energieszenarien und Modell Deutschland ist nicht möglich, da die Angaben in Modell Deutschland sich auf den Pkw-Bestand beziehen, in den Energieszenarien dagegen nur auf die Neuzulassungen.

In Renewbility I und II werden Effizienzsteigerungen bei PKW über eine Verschärfung der CO₂-Grenzwerte abgebildet [vgl. Öko/DLR 2009b, S. 29 und Öko/DLR 2012, S. S. 10]. Ein Vergleich der Effizienzsteigerungen je Fahrzeug ist auf Basis der Berichte nicht möglich, da die jeweiligen Werte dort aggregiert für die Gesamtflotte angegeben werden.

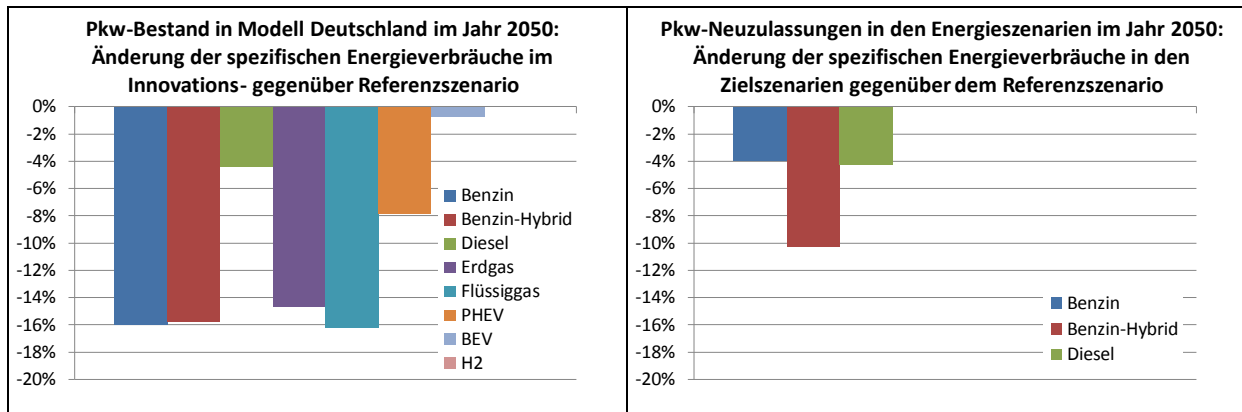


Abbildung 9: Änderungen der spezifischen Energieverbräuche von Pkw in Zielszenarien gegenüber den Referenzszenarien in Modell Deutschland und Energieszenarien

3.2.1.3 Methodische Erläuterungen in den Studien

Eine genaue Analyse der Unterschiede der zukünftigen Flottenzusammensetzungen sowie der Energieeffizienz der Pkw benötigt eine transparente und nachvollziehbare Dokumentation der methodischen Herangehensweise, eingesetzter Modelle sowie der zugrunde liegenden Annahmen. Diesbezügliche Erläuterungen sind in den Studien überwiegend sehr kurz und allgemein, so dass eine entsprechende Analyse hier nur in Teilen möglich ist. Die Erläuterungen reichen nicht aus, um Unterschiede bei der Modellierung zukünftiger Pkw-Flotten hinsichtlich Antriebstechnologien und Energieeffizienz nachzuvollziehen und zu erklären.

Für die Modellierung zukünftiger **Flottenzusammensetzungen** wurden in den Studien teilweise bestimmte Neuzulassungs- oder Bestandsanteile einzelner Antriebstechnologien im Vorfeld festgelegt. Diese Vorfestlegungen werden jedoch nicht detailliert begründet. Nur in Renewbility I und der Leitstudie 2011 werden Parameter für die Verbreitung unterschiedlicher neuer Pkw-Antriebstechnologien erörtert, die relevant für Unterschiede zwischen verschiedenen Szenarien sowie im Vergleich zwischen den Studien sein können (vgl. Tabelle 9 bis Tabelle 13).

Methodische Erläuterungen zur Entwicklung der **Energieeffizienz** gibt es nur in TREMOD und Renewbility mit Zeithorizont bis 2030. In den Basisszenarien orientiert sich die Effizienzentwicklung an den gesetzlichen Vorgaben der EU. Zur Erreichung der europäischen CO₂-Flottengrenzwerte werden allein Effizienzsteigerungen bei Pkw mit Verbrennungsmotor an-

genommen, nicht jedoch der Einsatz generell effizienterer Pkw mit Elektroantrieb (die in den Basisszenarien beider Modelle noch nicht enthalten sind). Für das TREMOD-Trendszenario ebenso wie für das Klimaschutz-Szenario von Renewbility gibt es zusätzlich methodische Erläuterungen zur Ableitung von Effizienzentwicklungen einzelner Fahrzeugvarianten abhängig sowohl von den technischen Potenzialen als auch den damit verbundenen Kosten.

Große Bedeutung für die zukünftige Steigerung der Energieeffizienz im Pkw-Verkehr insgesamt hat das **Zusammenspiel zwischen dem Einsatz besonders effizienter Antriebstechnologien und der Verbesserung der Energieeffizienz pro Antriebstechnologie**.

So werden im TREMOD-Trendszenario von September 2012 die Effizienzvorgaben der EU für neue Pkw allein über Effizienzsteigerungen bei Pkw mit Verbrennungsmotor erreicht. Im zukünftigen TREMOD-Trendszenario (TREMOD 5.4, voraussichtlich Ende 2013 verfügbar) werden auch Beiträge alternativer Antriebstechnologien, insbesondere Elektro-Pkw zur Erreichung der europäischen Effizienzvorgaben im Detail modelliert.

Umgekehrt werden in den Energieszenarien mögliche Effizienzsteigerungen bei Pkw mit Verbrennungsmotor in Referenz- und Zielszenarien nicht ausgeschöpft, da nach Einschätzung der Autoren die Pkw-Hersteller sich vorrangig auf die Entwicklung von Elektro-Pkw konzentrieren. Diese Wechselwirkungen werden in keiner Studie näher thematisiert.

Die wichtigsten methodischen Aussagen in den einzelnen Studien sind in den nachfolgenden Tabellen als Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 9: Methodische Erläuterungen zu den Pkw-Flotten in Modell Deutschland

In **Modell Deutschland** wird die Modellierung zukünftiger Entwicklungen nur sehr allgemein erläutert. Es werden „Annahmen getroffen über die Bestände und deren technologische und energetische Qualität, über die Lebensdauer und über die Implementierungsgeschwindigkeit neuer Fahrzeuge; ebenso über das künftige Nutzungsverhalten und organisatorische Veränderungen sowie über die Energieträgersubstitutionen innerhalb der Verkehrsträger“ [WWF 2009 S. 17].

- Im **Referenzszenario** wird „grundsätzlich von der Fortsetzung derzeit sichtbarer Trends ausgegangen“, wonach der Verbrennungsmotor die wesentliche Antriebstechnologie bleibt (mit zunehmender Hybridisierung), der Bestandsanteil von Plug-In-Hybriden und Elektrofahrzeugen bis 2050 auf 13 % steigt. Gasfahrzeuge spielen v.a. eine Rolle in lokalen Flotten. Der Brennstoffzellenantrieb gelangt nicht in die breite Umsetzung [WWF 2009 S. 91]. Die getroffenen Annahmen zur Entwicklung der Energieeffizienz innerhalb der Antriebskonzepte werden in der Studie nicht begründet.
- Für das **Innovationsszenario** wird eine systematische Entwicklung der Elektromobilität, mit Zwischenstufen Hybrid- und Plug-In-Hybridfahrzeugen, sowie eine verstärkte Entwicklung für Gasantriebe unterstellt, jedoch nicht begründet. Der auch in diesem Szenario geringe Anteil von Brennstoffzellen-Kfz wird mit dem Fehlen einer Wasserstoffinfrastruktur begründet [Modell D S. 209]. Weiterhin wird auf eine deutliche zusätzliche Verbrauchsreduktion der Pkw gegenüber der Referenzentwicklung verwiesen, die jedoch nicht begründet wird [WWF 2009 S. 214].

Tabelle 10: Methodische Erläuterungen zu den Pkw-Flotten in den Energieszenarien

In den **Energieszenarien** gibt es keine Erläuterungen zu den methodischen Annahmen, weder zur Verschiebung der Pkw-Flottenzusammensetzung vom Verbrennungsmotor zum Elektroantrieb, noch zu den Effizienzentwicklungen. Es wird lediglich darauf verwiesen, dass bei Pkw mit Verbrennungsmotor prinzipiell weitere Einsparungen gegenüber den Annahmen in Referenz- und Zielszenarien möglich wären, die wegen sinkender Attraktivität konventioneller Pkw für die Hersteller nicht angenommen werden [EWI 2010, S. 93].

Tabelle 11: Methodische Erläuterungen zu den Pkw-Flotten in der Leitstudie 2011

In der **Leitstudie 2011** wird keine Referenzentwicklung der Kfz-Flotten modelliert, sondern drei alternative Zielszenarien, die im Bericht näher erläutert werden [BMU 2012, S. 66ff]. In diesen Zielszenarien wurde für das Jahr 2050 ein Fahrleistungsanteil von 50 % Elektro-Pkw vorgegeben und anschließend eine darüber hinausgehende Nutzung von (regenerativ erzeugtem) Strom über drei alternative Pfade (Wasserstoff, synthetisches Methan, 100 % Elektro-Pkw) untersucht. Dabei wurde zur Simulation des Markterfolgs der neuen Fahrzeugkonzepte ein TCO-Modell eingesetzt, welches auch den Einfluss von CO₂-Grenzwerten auf die Fahrzeugkosten einbezieht. In der Studie wird darauf verwiesen, dass die Modellannahmen in dieser kostenoptimierenden Simulation sehr stark das Ergebnis bestimmen, „weshalb die berechneten Flottenentwicklungen nur exemplarischen Charakter haben“ [BMU 2012, S. 69].

Die angenommene Effizienzentwicklung wurde ausgehend von den Werten der Leitstudie 2010 überarbeitet und mit TREMOD-Werten abgeglichen, wobei aufgrund der Abbildung weiterer Fahrzeugkonzepte und der Berücksichtigung der langfristigen Entwicklungspfade teilweise von den TREMOD-Annahmen abgewichen wurde. Bei Wasserstoff- und Gasfahrzeugen werden auch Verteilungs-, Speicher- und Be- tankungsverluste eingerechnet [BMU 2012, S. 70ff]. In der Studie wird darauf hingewiesen, dass „die technischen Effizienzpotenziale der PKW-Fahrzeugkonzepte ... in der zugrunde gelegten ökonomischen Optimierung ... ggf. nicht ganz ausgeschöpft“ werden [BMU 2012, S. 66].

Tabelle 12: Methodische Erläuterungen zur Pkw-Flotte in TREMOD

TREMOD ermöglicht Szenarienrechnungen bis zum Jahr 2050 mit verschiedenen konventionellen und alternativen Antriebsformen. Die Annahmen im offiziellen Trendszenario werden in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt getroffen und sind im TREMOD-Bericht ausführlich dokumentiert [IFEU 2012, S. 50-63]. Im vorliegenden TREMOD-Trendszenario (Version 5.3) sind noch keine alternativen Antriebe berücksichtigt, da dies kein Arbeitsbestandteil vergangener Aktualisierungen war. In der kommenden TREMOD-Version wird auch das Trendszenario um alternative Antriebe erweitert [IFEU 2012 S. 56].

Derzeit wird im Trendszenario für die Flottenentwicklung ausgehend von der Entwicklung der vergangenen Jahre ein konstanter jährlicher Neuzulassungsanteil von 45 % Diesel-Pkw und 55 % Otto-Pkw (inkl. CNG/LPG) zugrunde gelegt. Mit einem Umschichtungs- und Fahrleistungsumlegungsmodell werden daraus jährliche Bestände und eine differenzierte Verteilung der Fahrleistungen berechnet.

Die Annahmen zur Effizienzentwicklung orientieren sich an den gesetzlichen Regelungen der EU: RL 443/2009 zu CO₂-Flottengrenzwerten wird vollständig umgesetzt, wobei Unterschiede des deutschen Pkw-Bestandes gegenüber dem EU-Durchschnitt berücksichtigt werden. Da das Trendszenario bisher keine Elektro-Pkw umfasst, welche auf die Flottengrenzwerte angerechnet werden können, werden die Effizienzziele allein durch Effizienzsteigerungen bei Pkw mit Verbrennungsmotor erreicht. Die spezifischen Verbrauchsentwicklungen variieren in TREMOD auf Basis weiterer technologischer und ökonomischer Annahmen nach Antriebsarten, Größenklassen sowie nach Innerorts- und Außerortsstraßen [IFEU 2012, S. 58].

Tabelle 13: Methodische Erläuterungen zu den Pkw-Flotten in Renewbility

In **Renewbility** sind zukünftige Flottenentwicklung und Effizienzentwicklung im **Basisszenario** an TREMOD angelehnt. Die Pkw-Flotte enthält nur Pkw mit Verbrennungsmotor, die Effizienzentwicklung orientiert sich an der Erreichung gesetzlicher Grenzwerte (EU: 95 CO₂ g/km bis 2020) mit einer moderaten Fortschreibung in Folgejahren, unter Berücksichtigung der deutschen Bestandsstruktur. Hybrid-Antriebe werden über Effizienzsteigerungen einbezogen [Öko/DLR 2009b, S. 12, Öko/DLR 2012, S. 7].

Im **Klimaschutz-Szenario** sind auch Elektro-Pkw enthalten. Für diese wurde über ein zweistufiges Verfahren zunächst ein „theoretisches Rahmenpotenzial“ über die Kriterien Reichweite, Stellplatzverfügbarkeit und Haushaltseinkommen ermittelt, anschließend wurden darauf historische Diffusionsraten aus dem Automobilsektor angewendet [Öko/DLR 2009b, S. 30f].

Ebenso werden im Klimaschutz-Szenario Annahmen zu verstärkten Effizienzsteigerungen der Pkw berücksichtigt. Dazu erfolgt eine Auswahl effizienterer Fahrzeug-Varianten aus einer internen Technologie-Datenbasis in Abhängigkeit von der Wirkung von modellierten Maßnahmen. Diese „Effizienzvarianten“ sind in Renewbility auf Basis von CO₂-Minderungskostenkurven hinterlegt, basierend auf Studien im Auftrag der europäischen Kommission [vgl. Öko/DLR 2009a, S. 77f].

3.2.2 Lkw und Busse

Für den Straßengüterverkehr (Lkw >3,5t, Leichte Nutzfahrzeuge) und Busse wurden in den Studien unterschiedliche Abgrenzungen nach Fahrzeug-Größenklassen, Differenzierungen nach Antriebsarten bzw. Energieträgern sowie unterschiedliche Bezugsgrößen der angegebenen spezifischen Energieverbräuche gewählt. Eine Übersicht zu Art und Umfang der Zahlenangaben in den Studien zu Lkw- und Busbeständen sowie deren spezifischen Verbräuchen gibt Tabelle 14. Ein quantitativer Vergleich zu Entwicklungstrends der Fahrzeugflotten und der Energieeffizienz bei Lkw und Bussen zwischen den untersuchten Studien ist anhand dieser Daten nicht möglich.

Tabelle 14: Angaben zu Beständen, Fahrleistungen und Effizienzentwicklung von Lkw und Bussen in den untersuchten Studien

Modell Deutschland gibt Fahrleistungen sowie fahrleistungsbezogene spezifische Energieverbräuche für den Lkw-Bestand differenziert nach Antriebsarten an. Dahinter liegende Größenklassenaufteilungen sowie möglicherweise einbezogene Leichte Nutzfahrzeuge (Lkw <3,5t) sind nicht dokumentiert. Zu Bussen gibt es in der Studie keine Angaben.

Energieszenarien differenzieren Lkw in Sattelzug Diesel, Lkw Benzin sowie Lkw Diesel. Pro Fahrzeuggruppe werden fahrleistungsbezogene spezifische Energieverbräuche für den Bestand pro Bezugsjahr angegeben. Größenklassenverteilungen und der Einbezug von Leichten Nutzfahrzeugen in den angegebenen Zahlen sind nicht dokumentiert. Es gibt keine vollständigen Angaben zum gesamten Lkw-Bestand nach Antriebsarten oder Größenklassen.

Die **Leitstudie 2011** differenziert im Straßengüterverkehr zunächst nach Lkw und Leichten Nutzfahrzeugen sowie anschließend nach Endenergieträgern (inkl. separater Angaben für Biokraftstoffe). Für

Lkw werden Verkehrsleistungen (Tonnen-km) sowie spezifische Energieverbräuche pro Tonnen-km angegeben; für Leichte Nutzfahrzeuge dagegen Fahrleistungen sowie spezifische Energieverbräuche pro Fahrzeug-km. Auch für Busse werden nach Energieträgern differenzierte Angaben zu Verkehrsleistung (Personen-km) und spezifischen Energieverbräuchen pro Personen-km gemacht. Angaben zu Größenklassenverteilungen sowie möglichen Einflüssen variierender Fahrzeugauslastungen auf die spezifischen Energieverbräuche werden nicht gemacht.

Das Modellinstrumentarium **TREMODO** enthält für Lkw >3,5t, Leichte Nutzfahrzeuge und Busse jahresfeine Angaben zu Neuzulassungen, Beständen, Fahrleistungen und fahrleistungsbezogenen spezifischen Energieverbräuchen differenziert nach Größenklassen sowie bei Leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebsart (Benzin, Diesel, Gas). Für Lkw und Busse enthält TREMOD auch Verkehrsleistungsangaben. Im TREMOD-Bericht sind die zeitlichen Entwicklungen von Neuzulassungen und Beständen grafisch dargestellt [IFEU 2012, S. 53ff] sowie angenommene Änderungsraten der spezifischen Verbräuche von Neufahrzeugen angegeben [IFEU 2012, S. 58f].

Renewbility: Die Entwicklung des Energieverbrauchs von Lkw ist im Basisszenario an TREMOD angelehnt (vgl. [Öko 2009b, S. 12ff] für Renewbility I bzw. [Öko 2012, S. 6f] für Renewbility II). Die Fortschreibung des Lkw-Bestands im Klimaschutz-Szenario wird für Renewbility I in [Öko/DLR 2009a, S. 65ff] erläutert. Hier kommt ein eigenes Lkw-Neuzulassungsmodell zum Einsatz, das fünf Fahrzeugklassen, von leichten Nutzfahrzeugen <3,5t bis zu Sattelzugmaschinen differenziert. In dieses Modell fließen auch die unterschiedlichen Maßnahmen der Szenarien ein, sofern sie eine Relevanz für den LKW-Bestand haben (beispielsweise erhöhte Kraftstoffpreise, Lkw-Maut, CO₂-Grenzwerte für leichte Nutzfahrzeuge, vgl. [Öko/DLR 2009b, S. 72]. Eine genauere Untersuchung von alternativen Antrieben wird zwar diskutiert [Öko/DLR 2009a, S. 67f.], jedoch nicht explizit in den Modellrechnungen ausgewiesen.

Auch methodische Aspekte zu neuen Antriebstechnologien und zur fahrzeugspezifischen Energieeffizienz zukünftiger Lkw und Busse können nur begrenzt verglichen werden, da die Studien nur wenige Erläuterungen enthalten.¹⁶ Im Wesentlichen lässt sich festhalten:

Antriebstechnologien

In allen Studien dominiert bis 2050 der Dieselmotor. Z.T. gibt es signifikante Anteile von Gas (CNG, LPG), aber vorwiegend bei kleineren Fahrzeugen (Lieferwagen, Verteilerverkehr, vgl. [WWF 2009, S. 98]).

In maßnahmenorientierten Szenarien gibt es in einigen Studien begrenzte Verschiebungen zu alternativen Antriebstechnologien: In Energieszenarien zu Dieselhybrid, sowie in der Leitstudie 2011 exemplarisch zu Wasserstoff und Elektro-Fahrzeugen. In der Technologiedatenbasis von Renewbility sind neben den konventionellen Antriebstechnologien leichte Nutzfahrzeuge mit Elektroantrieb (Plug-In-Hybrid und batterieelektrisch, vgl. [Öko/DLR 2009a, S. 139f]) definiert sowie Lkw >3,5t mit Hybrid, Erdgas- und Brennstoffzellen-Antrieb [Öko/DLR 2009a, S. 144].

¹⁶ Eine nähere Analyse der Szenarienannahmen wäre nur durch ausführlichen Austausch mit den Studienautoren (z.B. Interviews) möglich, was im Rahmen dieser Kurzstudie nicht möglich war.

Energieeffizienz

Alle Studien nehmen für Lkw zukünftige Effizienzsteigerungen an. Soweit es maßnahmenorientierte Szenarien gibt, werden dort stärkere Effizienzsteigerungen angenommen als im jeweiligen Referenzszenario.

- In Modell Deutschland, Energieszenarien sowie Leitstudie 2011 ist aufgrund der fehlenden Differenzierungen nicht ersichtlich, welche Beiträge effizientere Fahrzeugtechnik leistet und welchen Einfluss möglicherweise Fahrleistungsverschiebungen zwischen Größenklassen haben sowie, in der Leitstudie 2011, Änderungen der Fahrzeugauslastung.
- In der TREMOD-Dokumentation wird für die Entwicklung der Energieeffizienz auf den Zielkonflikt mit der Abgasminderung verwiesen. Daher wird bei Schwere Nutzfahrzeugen bis 2013 kein Rückgang der spezifischen Verbräuche angenommen. Anschließend werden jährliche Minderungen um ca. 1 % p.a. für Neufahrzeuge angesetzt [IFEU 2012, S. 59]. Bei Leichten Nutzfahrzeugen orientieren sich die Minderungsraten bisher noch an den Minderungsraten bei Pkw, da die Konsequenzen der neuen europäischen CO₂-Grenzwerte für Leichte Nutzfahrzeuge noch nicht abgebildet werden konnten [IFEU 2012, S. 58].
Zusätzliche Effizienzsteigerungen pro Transportleistung resultieren aus der Annahme einer zukünftigen Zunahme der durchschnittlichen Lkw-Auslastung [IFEU 2012, S. 48].
- Renewability orientiert sich im Basisszenario für Lkw >3,5t und Busse an TREMOD. Bei Leichten Nutzfahrzeugen wurden in Renewability II separate Annahmen zur Entwicklung der spezifischen Energieverbräuche entsprechend der neuen europäischen CO₂-Grenzwerte getroffen [Öko/DLR 2012, S. 7]. In der Technologiedatenbasis von Renewability sind technologiebasiert effizientere Fahrzeugvarianten abgeleitet (inkl. Hybrid-Beitrag). Im Klimaschutz-Szenario kommen maßnahmenbezogen entsprechende „Effizienzvarianten“ von Fahrzeugen stärker in die Flotte (vgl. z.B. [Öko/DLR 2009b, S. 34f]).

3.2.3 Übrige Verkehrsmittel

Bei den Verkehrsmitteln im Schienen-, Binnenschiff- und Flugverkehr wird in allen untersuchten Studien von einer Beibehaltung der bisherigen **Antriebsarten** ausgegangen. Im Schienenverkehr wird ein fortgesetzter Anstieg von Elektrotraktion und Rückgang der Dieseltraktion angenommen, Binnenschiffe und Flugzeuge werden auch 2050 vollständig mit Diesel bzw. Kerosin sowie alternativ geeigneten Biokraftstoffen (Biodiesel, BTL) betrieben.

Angaben zur Entwicklung der **Energieeffizienz** in den Studien beziehen sich überwiegend auf die Verkehrsleistung (Personen-km, Tonnen-km). Sie können damit neben technischen Effizienzverbesserungen prinzipiell auch die Auswirkungen geänderter Fahrzeugauslastungen beinhalten. Das kann jedoch auf Basis der methodischen Erläuterungen in den Studien nicht differenziert werden. Methodische Erläuterungen zu den getroffenen Annahmen der Effizienzentwicklung finden sich generell nur in den Berichten zu TREMOD und Renewability:

- TREMOD übernimmt für den Schienenverkehr technologiebasierte Annahmen der DB AG, für den Flugverkehr Einschätzungen des UBA [IFEU 2012, S. 59]. Für Binnenschiffe erfolgt „aufgrund der schlechten Informationslage“ nur eine einfache Abschätzung.
- Renewbility orientiert sich im Basisszenario an der Effizienzentwicklung in TREMOD. Zusätzlich werden in der Technologiedatenbasis effizientere Verkehrsmittelvarianten definiert [Öko/DLR 2009a, S. 169ff], die teilweise im Klimaschutz-Szenario eingesetzt werden (vgl. [Öko/DLR 2012, S. 11 & 18]).

In Abbildung 8 sind Angaben zu den Effizienzentwicklungen im Schienen-, Binnenschiff- und Flugverkehr gegenübergestellt, wie sie in den Studien angegeben werden. Der Vergleich zeigt insb. für Schienennahverkehr und Schienengüterverkehr deutliche Unterschiede der angenommenen zukünftigen Entwicklungen, insbesondere im Vergleich der Szenariestudien zum Modellinstrumentarium TREMOD.

Aus Abbildung 8 sind auch systematische Unterschiede der in den Studien gemachten spezifischen Verbrauchsangaben für Binnenschiffe und Flugverkehr erkennbar:

- Beim Binnenschiffsverkehr sind die in Modell Deutschland und in der Leitstudie 2011 angegebenen spezifischen Verbräuche nur etwa halb so hoch wie in TREMOD und Energieszenarien. Diese sehr niedrigen Verbrauchsfaktoren in Modell Deutschland und Leitstudie 2011 resultieren höchstwahrscheinlich aus einer Verknüpfung der Verkehrsleistungen im Inland mit den Energieverbräuchen nach Energiebilanz. Dieses Vorgehen ist methodisch nicht unproblematisch, da die Binnenschiffe in Deutschland weit mehr verbrauchen als inländisch getankt wird (gemäß Energiebilanz). Zudem gibt es erhebliche Variationen des Anteils je nach Bezugsjahr (vgl. [IFEU 2012, S. 19f]). Dagegen beziehen sich die Verbrauchsfaktoren in TREMOD direkt auf den realen Verbrauch.
- Im Flugverkehr liegen die in den drei Szenariestudien angegebenen spezifischen Verbrauchsfaktoren (MJ/Pkm) etwa um den Faktor 5 höher als in TREMOD. Auch hier lässt sich das auf die unterschiedlichen Abgrenzungen von Verkehrsleistungen und Energieverbräuchen in den Szenariestudien zurückführen, die ungeachtet dieser Unterschiede direkt verknüpft wurden. Modell Deutschland wird der Energieabsatz im Flugverkehr nach Energiebilanz angegeben, d.h. der Energieverbrauch aller Flüge mit in Deutschland getanktem Flugtreibstoff. Die in der Studie angegebenen Verkehrsleistungen beziehen sich aber nur auf die über Deutschland geflogenen Kilometer (vgl. Kap. 2.1) und sind damit zur verbrauchten Treibstoffmenge nicht kompatibel. In TREMOD werden Verkehrsleistungen wie auch Energieverbräuche einheitlich für von Deutschland abgehende Flüge bis zur ersten Zwischenlandung abgebildet.

Die systematischen Abweichungen der Energieverbrauchsfaktoren zwischen den Studien im Binnenschiff- und Flugverkehr zeigen deutlich die Problematik unterschiedlicher Abgrenzungen für Verkehrsmengen und Energieverbräuche. Ohne detaillierte Beurteilung der Vorge-

hensweisen in den einzelnen Studien und Überprüfung von deren Kompatibilität ist es nicht möglich, Annahmen und Ergebnisse verschiedener Szenarienstudien in ein gemeinsames Modellinstrumentarium zu übernehmen und miteinander zu verknüpfen.

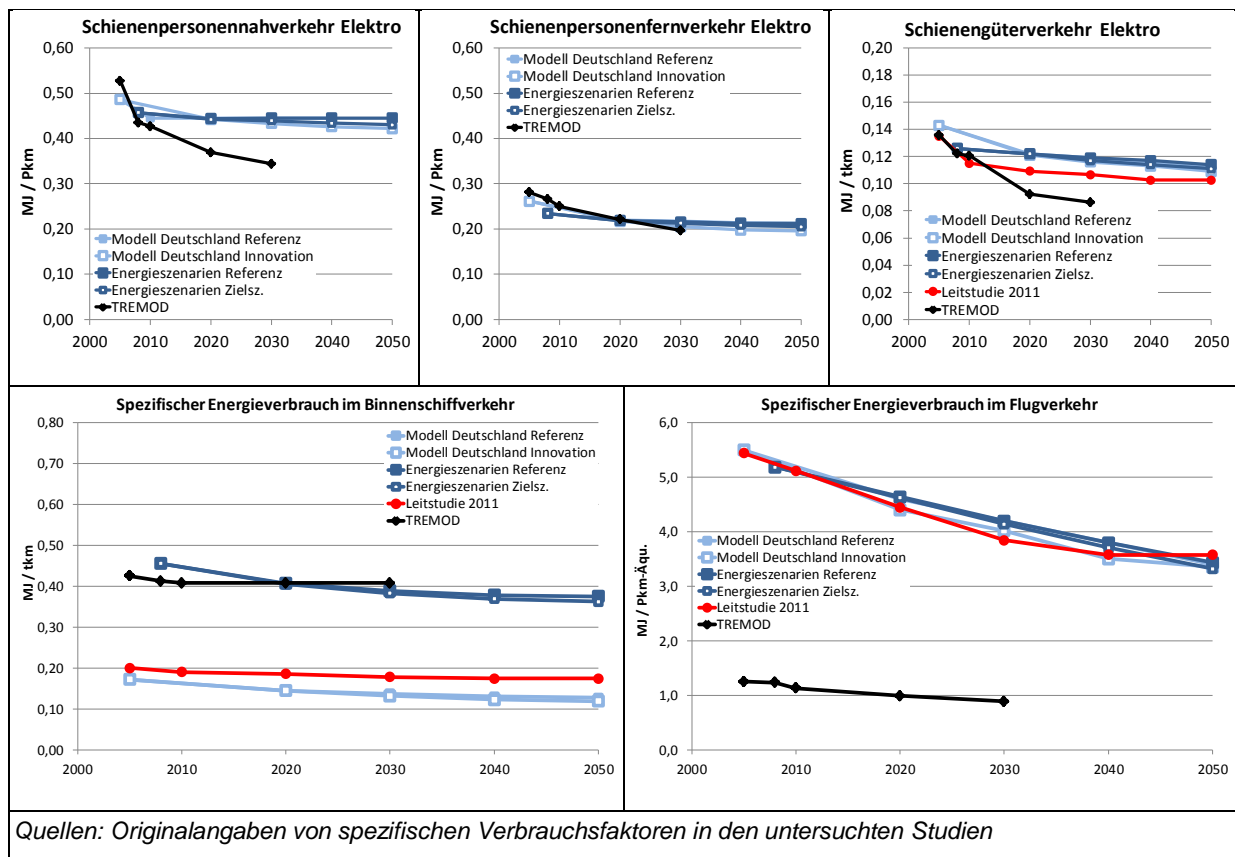


Abbildung 10: Entwicklung der Energieeffizienz im Schienen-, Binnenschiff- und Flugverkehr in den untersuchten Studien

3.2.4 Wesentliche Erkenntnisse für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

Die in dieser Kurzstudie berücksichtigten Szenarienstudien gehen alle auf zukünftige Antriebstechnologien sowie die Entwicklung der Energieeffizienz bei Pkw ein. In allen Szenarien werden bis zum Jahr 2050 relevante Flottenanteile von herkömmlichen Pkw mit Verbrennungsmotor erwartet, gleichzeitig jedoch wird eine zunehmende Substitution durch Elektro-Pkw angenommen¹⁷. In der Leitstudie 2011 werden mit Wasserstoff und synthetisches Methan weitere alternative Technologien zum Einsatz von regenerativem Strom im Verkehr näher betrachtet. Alle Studien gehen zudem von weiteren Effizienzverbesserungen zukünftiger Pkw bei allen Antriebstechnologien aus.

¹⁷ Auch in TREMOD wird im neuen mit UBA abgestimmten Trendszenario (Version 5.4, ab Ende 2013 verfügbar) ein Anstieg der Elektromobilität im Straßenverkehr angenommen.

Die modellierten Anteile herkömmlicher und alternativer Antriebstechnologien in zukünftigen Pkw-Flotten ebenso wie die technologiespezifischen Effizienzverbesserungen variieren erheblich zwischen den Studien. Ursachen für die variierenden Flottenzusammensetzungen (z.B. Modellannahmen zum Pkw-Kaufverhalten) und Effizienzentwicklungen können allein aus den Dokumentationen der Studien nur teilweise entnommen werden. Neben den eingesetzten Modellen spielen auch Festlegungen, die von den Autoren im Vorfeld getroffen worden sind, eine wichtige Rolle (z.B. Mindestanteile von Elektro-Pkw, nur Teilausschöpfung der Effizienzpotenziale bei Benzin- und Diesel-Pkw durch F+E-Fokus der Pkw-Hersteller auf alternative Antriebe). In der Leitstudie 2011 wird hier auch auf den exemplarischen Charakter der modellierten Flotten hingewiesen, die stark durch die jeweils getroffenen Annahmen mitbestimmt werden.

Für Szenarien im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie können Entwicklungen der Pkw-Flotten und der Fahrzeugeffizienz aus vorliegenden Studien nur übernommen werden, wenn zunächst die Grundlagen der Modellierung und die angenommenen Randbedingungen tiefergehend analysiert und auf ihre Anwendbarkeit für die Fragestellungen der MKS überprüft werden. Insbesondere sollten vorhandene Pkw-Flottenmodelle mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen (z.B. Kaufmodelle, TCO-Modelle) gegenübergestellt werden. Eine wichtige Fragestellung für einen solchen Modellvergleich ist auch, auf welche Weise Wechselwirkungen zwischen dem Markterfolg neuer Antriebstechnologien einerseits und der Effizienzentwicklung bei herkömmlichen Pkw-Technologien andererseits, in Modellen abgebildet werden. Es sollte auf den Analysen basierend ein Anforderungskatalog an ein Modell erstellt werden, das die Neuzulassungen der Pkw abbildet. Dies könnte neben der Abbildung der Kosten (Fahrzeug, Betriebskosten...) und deren Wirkung auf die TCO (Total Cost of Ownership) auch die Berücksichtigung von Rahmenbedingungen (z.B. Vorhandensein von Infrastruktur) und Nutzerverhalten (z.B. erhöhte Zahlungsbereitschaft für ausgewählte Gruppen wie „Early Adopters“) sein.

Alle übrigen Verkehrsmittel werden in den untersuchten Szenarienstudien nur sehr eingeschränkt behandelt. Es werden kaum Änderungen der Antriebstechnologien angenommen. Für alle Verkehrsmittel werden zukünftige Effizienzsteigerungen modelliert, die aber überwiegend in den Studien nicht begründet werden. Ein Vergleich der Effizienzsteigerungen ist überwiegend nicht möglich, da die spezifischen Verbrauchsfaktoren unterschiedlich gewichtet (z.B. Lkw-Größenklassen) oder in den Studien über nicht-kompatible Abgrenzungen von Verkehrsleistungen und Energieverbräuchen (Flugzeug, Binnenschiff) abgeleitet worden sind.

Für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie müssen zukünftige Technologie- und Effizienzentwicklungen sowie zusätzliche Potenziale zukünftiger Fahrzeuge in jedem Fall intensiver untersucht werden. Dies betrifft insbesondere Lkw und Flugzeuge, die neben Pkw die größten Anteile an Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr haben. Soweit hier noch keine geeigneten Modelle für ein MKS-Modellinstrumentarium verfügbar sind, sollte die Entwicklung entsprechender abgestimmter Modelle und Datengrundlagen angestrebt werden.

3.3 Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehr

3.3.1 Entwicklung der Biokraftstoffnutzung in den untersuchten Studien

Zum Einsatz erneuerbarer Energieträger im Verkehr wird in den Szenarienstudien neben dem Einsatz von Strom bzw. strombasierten Kraftstoffen in Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien (vgl. Kap. 3.2) weiterhin die Verwendung von Biokraftstoffen anstelle fossiler Kraftstoffe bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor betrachtet. Insbesondere für den Straßengüterverkehr und den Flugverkehr wird der Einsatz von Biokraftstoffen verstärkt diskutiert, da hier alternative Antriebstechnologien nach derzeitiger Einschätzung stark begrenzt sind, während Biokraftstoffe je nach spezifischer Kraftstoffqualität ohne wesentliche Änderungen auch bei heutiger Fahrzeugtechnik einsetzbar sind.

Für den Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehr verfolgen die untersuchten Studien im Wesentlichen zwei unterschiedliche Ansätze.

1. Die verkehrsspezifischen Modellinstrumentarien TREMOD und Renewbility verwenden **Biokraftstoffquoten** in Anlehnung an die gesetzlichen Vorgaben in Deutschland und Europa.
 - Im TREMOD-Trendszenario entwickelt sich der Einsatz von Biokraftstoffen entsprechend den gesetzlichen Vorgaben (geändertes Biokraftstoffquotengesetz, EU-Nachhaltigkeitskriterien nach 2009/28EG) [IFEU 2012, S. 56f]. Bis zum Jahr 2020 steigt der Anteil von Biokraftstoffen am Kraftstoffverbrauch im Verkehr auf 12 % (energetisch). Die spezifische Treibhausgasreduktion der Biokraftstoffe (inkl. Vorketten) gegenüber fossilen Kraftstoffen steigt auf 60 % (Einhaltung der Mindestanforderung nach 2009/28/EG). Damit sind ab 2020 die Treibhausgasemissionen der im Verkehr eingesetzten Kraftstoffe insgesamt um 7 % gegenüber einem Einsatz rein fossiler Kraftstoffe reduziert und erfüllen damit die Vorgaben des geänderten Biokraftstoffquotengesetzes. In den Folgejahren bis 2030 bleibt die Biokraftstoffquote in TREMOD konstant.
 - In Renewbility werden im Basis- wie auch im Klimaschutz-Szenario prozentuale Anteile von Biokraftstoffen im Verkehr entsprechend den Vorgaben des Biokraftstoffquotengesetzes und unter Berücksichtigung der EU-Nachhaltigkeitsstandards abgeleitet. In Renewbility II wird in beiden Szenarien bis zum Jahr 2020 ein Biokraftstoffanteil am Energieverbrauch im Straßenverkehr von 10% erreicht. Bis 2030 steigt die Biokraftstoffquote weiter bis auf 20% an [Öko/DLR 2012, S. 7]¹⁸.
2. Die sektorübergreifenden Szenarienstudien ermitteln **Biomassepotenziale** über alle Sektoren und deren anteilige Nutzung im Verkehr. Auf die Berücksichtigung aktueller gesetzlicher Vorgaben für den Biokraftstoffeinsatz im Verkehr wird in den Berichten nicht eingegangen.
 - In Modell Deutschland wird im Referenzszenario eine Beimischungspflicht für Biokraftstoffe und ein Anstieg auf knapp 25 % am gesamten Kraftstoffverbrauch unterstellt [WWF 2009, S. 91]. Im Jahr 2020 beträgt der Anteil von Biokraftstoffen am gesamten Kraftstoffverbrauch knapp 8 %.¹⁹

¹⁸ Renewbility I: 2020: 10 %; 2030: 15 % [Öko/DLR 2012, S. 7]

¹⁹ Ob das Referenzszenario die Anforderungen des geänderten Biokraftstoffquotengesetzes und der europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG) erfüllt, kann nicht beurteilt werden. Beide Regelungen beziehen die Treibhausgasemissionen aus der Biokraftstoffherstellung ein, die in Modell Deutschland nicht dem Verkehrssektor zugerechnet und nicht separat ausgewiesen werden.

Für das Innovationsszenario wird ein deutlich höherer Biokraftstoffeinsatz angenommen. Dazu wird die Verfügbarkeit von Biokraftstoffen durch inländische und „nachhaltige“ Biomassepotenziale inkl. Importe ermittelt [WWF 2009, S. 25].

- In den Energieszenarien wird im Referenzszenario ein Biokraftstoffanteil von 24% am Kraftstoffbedarf des Straßenverkehrs im Jahr 2050 angenommen, in den Zielszenarien sind rund 85% der Kraftstoffe im Straßenverkehr Biokraftstoffe. Diese Annahmen werden nicht näher erläutert, für die Zielszenarien wird lediglich auf die Einhaltung des Gesamtrahmens für nachhaltige Biomassennutzung über alle Sektoren verwiesen [EWI 2010, S. 101].
- In der Leitstudie 2011 wird die im Verkehr eingesetzte Biokraftstoffmenge über die in Deutschland insgesamt zur Verfügung stehende Anbaufläche für Energiepflanzen sowie die anteilige Verwendung für den Verkehrssektor ermittelt [BMU 2012, S. 83f].

Die Art der eingesetzten Biokraftstoffe wird in allen Studien nicht im Detail erörtert.

- In der Leitstudie 2011 wird angenommen, dass 2050 überwiegend Kraftstoffe der „2. Generation“ zum Einsatz kommen „also Biogas, Biomethan und synthetische Biokraftstoffe aus fester Biomasse (BtL)“ [BMU 2012, S. 88]. Wie hoch die Anteile einzelner Biokraftstoffe sind, ist aus der Studie nicht ersichtlich.
- In den Energieszenarien und Modell Deutschland wird allgemein auf den Einsatz von Biokraftstoffen der zweiten und dritten Generation verwiesen, ohne nähere Spezifizierung. Ein möglicher Einsatz von Biogas/Biomethan im Verkehr ist aus den Studien nicht ersichtlich.
- In TREMOD müssen den fossilen Kraftstoffen beigemischte Biokraftstoffe die Nachhaltigkeitskriterien gemäß Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG) erfüllen [IFEU 2012, S. 57]. Es wird eine genaue Einhaltung der Mindestanforderungen an die spezifische THG-Emissionsminderung (-60 % gegenüber fossilen Kraftstoffen ab dem Jahr 2018) angenommen. Ergänzende Annahmen, welche Biokraftstoffe konkret eingesetzt werden, sind zur Modellierung in TREMOD nicht erforderlich.
- In Renewbility wird ein zunehmender Einsatz von Biokraftstoffen der zweiten Generation und die „Berücksichtigung der EU-Nachhaltigkeitsstandards beim Biomasseanbau“ angegeben [Öko/DLR 2012, S. 7]. Dazu werden Annahmen zu den Beiträgen von Biokraftstoffen unterschiedlicher Herkunft getroffen (vgl. [Öko/DLR 2009b S. 33] für Renewbility I).

Gesamt mengen von Biokraftstoffen im Verkehr

In allen untersuchten Studien nimmt die Gesamtmenge von Biokraftstoffen im Verkehr zukünftig deutlich zu (vgl. Abbildung 11). In der Leitstudie 2011 und in TREMOD entwickelt sich der Biokraftstoffeinsatz trotz der unterschiedlichen methodischen Ansätze bis zum Jahr 2020 ähnlich und verdoppelt sich gegenüber 2010. Anschließend steigt in der Leitstudie 2011 die über inländische Biokraftstoffpotenziale abgeschätzte Menge bis 2030 weiter leicht an und bleibt in den Folgejahren konstant. In TREMOD dagegen sinkt die Biokraftstoffmenge nach 2020 leicht ab, infolge der gleichbleibenden Biokraftstoffquote am insgesamt sinkenden Kraftstoffbedarf, und liegt 2030 um ca. 20 % niedriger als die Leitstudie 2011.

In Renewability II ist die Biokraftstoffmenge im Basisszenario im Jahr 2030 um 30 % höher als in der Leitstudie 2011 und um 57 % höher als in TREMOD, da eine Erhöhung der Biokraftstoffquote am Kraftstoffverbrauch auf 20 % angenommen wird. Im Klimaschutz-Szenario ist die Biokraftstoffmenge entsprechend des geringeren Gesamtbedarfs an Kraftstoffen deutlich geringer [vgl. Öko/DLR 2012, S. 15].

Modell Deutschland und Energieszenarien liegen in den Referenzszenarien sehr eng beieinander. Im Jahr 2020 werden im Verkehr demnach etwa 25-30 % weniger Biokraftstoffe eingesetzt als in der Leitstudie 2011, bis 2050 steigen die Biokraftstoffmengen etwa auf das gleiche Niveau wie in der Leitstudie. In den Zielszenarien beider Studien nimmt der Einsatz von Biokraftstoffen hingegen sehr viel stärker zu als in allen anderen Szenarien. 2050 kommen beide Studien zu 2,5 bis 3-fach höheren Biokraftstoffmengen als die Leitstudie.

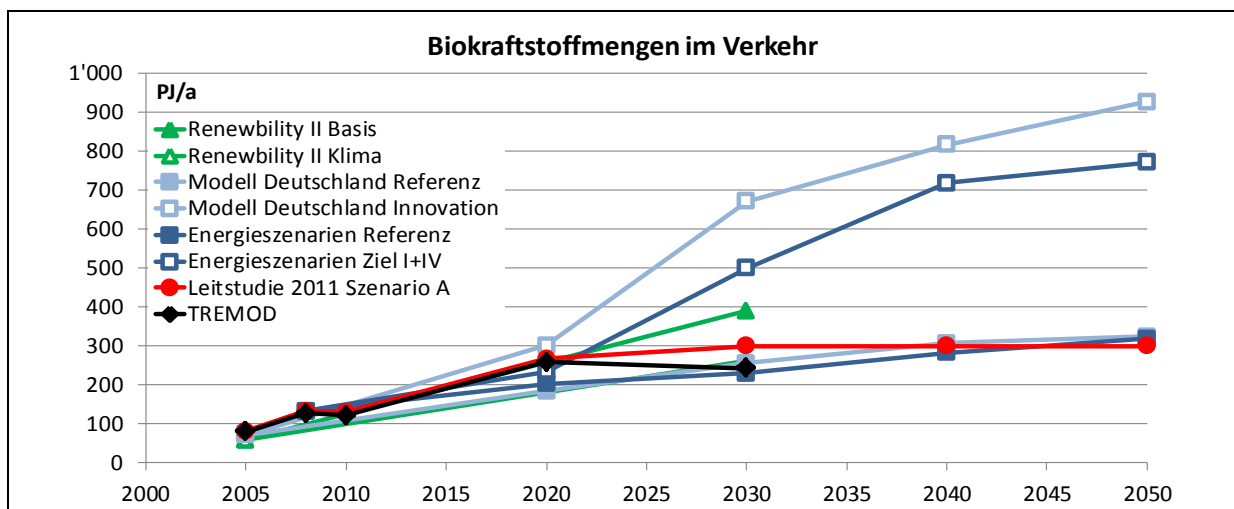


Abbildung 11: Szenarienwerte der Gesamtmengen von Biokraftstoffen im Verkehr

Biokraftstoffeinsatz bei verschiedenen Verkehrsträgern

In den untersuchten Szenarienstudien wird der Einsatz von Biokraftstoffen als strategische Zukunftsoption vor allem für Lkw und Flugzeuge diskutiert, weil hier der Einsatz alternativer Antriebstechnologien (z. B. Elektrizität, Wasserstoff) mit den größten technischen Hürden verbunden ist (vgl. z.B. [WWF 2009, S. 3 & S. 168], [BMU 2012, S. 135+139]). In den Szenarien werden Biokraftstoffe aber ebenso im Pkw-Verkehr eingesetzt, soweit dort zukünftig weiterhin Verbrennungskraftstoffe benötigt werden. In Abbildung 12 wird die Aufteilung von Biokraftstoffen zwischen den Szenarien verglichen.

- In Modell Deutschland werden Biokraftstoffe fast nur im Straßenverkehr genutzt. Dabei wird keine bestimmte Aufteilung zwischen Personen- und Güterverkehr angegeben. Im Innovationsszenario sind im Straßenverkehr eingesetzte flüssige Kraftstoffe ausschließlich Biokraftstoffe. Weder im Referenz- noch im Innovationsszenario wird im Flugverkehr Kerosin durch Biokraftstoffe ersetzt. Lediglich in einer zusätzlichen Modell-Variante wird der Einsatz von Biokraftstoffen im Flugverkehr thematisiert [WWF 2009, S. 3].

- In der Leitstudie 2011 werden im Jahr 2030 20 % sowie im Jahr 2050 40 % aller Biokraftstoffe in Form von BTL im Flugverkehr eingesetzt, in den Schienen- und Binnenschiffsverkehr fließen zusammen 3 % (2030) bis 5 % (2050). Der Großteil der Biokraftstoffe wird im Straßenverkehr eingesetzt. Dabei variiert die Aufteilung auf Pkw und Lkw zwischen den Szenarien. In Szenario A und B fließt im Jahr 2050 knapp die Hälfte der Biokraftstoffe im Straßenverkehr in die Pkw-Flotte (die noch größere Anteile Pkw mit Verbrennungsmotor umfasst). In Szenario C dagegen benötigt der durchgängig elektrifizierte Pkw-Verkehr (BEV und PHEV) deutlich weniger Verbrennungskraftstoffe, so dass hier etwa drei Viertel der Biokraftstoffe in den Lkw-Verkehr gehen (s. auch [BMU 2012, S. 139]).
- In TREMOD sind jährliche prozentuale Quoten von Biokraftstoffen am fossilen Kraftstoffverbrauch (je Energieinhalt) für alle Verkehrsträger definiert. Diese ergeben sich für die vergangenen Jahre anhand vorliegender Statistiken (vgl. [IFEU 2012, S. 20ff]). Für zukünftige Jahre werden Biokraftstoffquoten entsprechend der gesetzlichen Vorgaben modelliert, insbesondere unter Berücksichtigung von Mindestanteilen von Biokraftstoffen an Benzin und Diesel sowie der Mindestanforderungen an die Minderung der Treibhausgasemissionen durch Biokraftstoffe. Der Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehr erfolgt zukünftig allein über Beimischung zu konventionellen Otto- und Dieselmotoren. Der Anteil reiner Biokraftstoffe geht von 0,3 % im Jahr 2011 bis 2015 auf 0 % zurück [IFEU 2012, S. 56f]. Im Jahr 2030 fließt im Trend-Szenario jeweils knapp die Hälfte aller Biokraftstoffe in den Straßenpersonen- und Straßengüterverkehr. Schienen- und Binnenschiffsverkehr haben zusammen nur einen Anteil von ca. 1 %. Im Flugverkehr werden keine Biokraftstoffe verwendet.

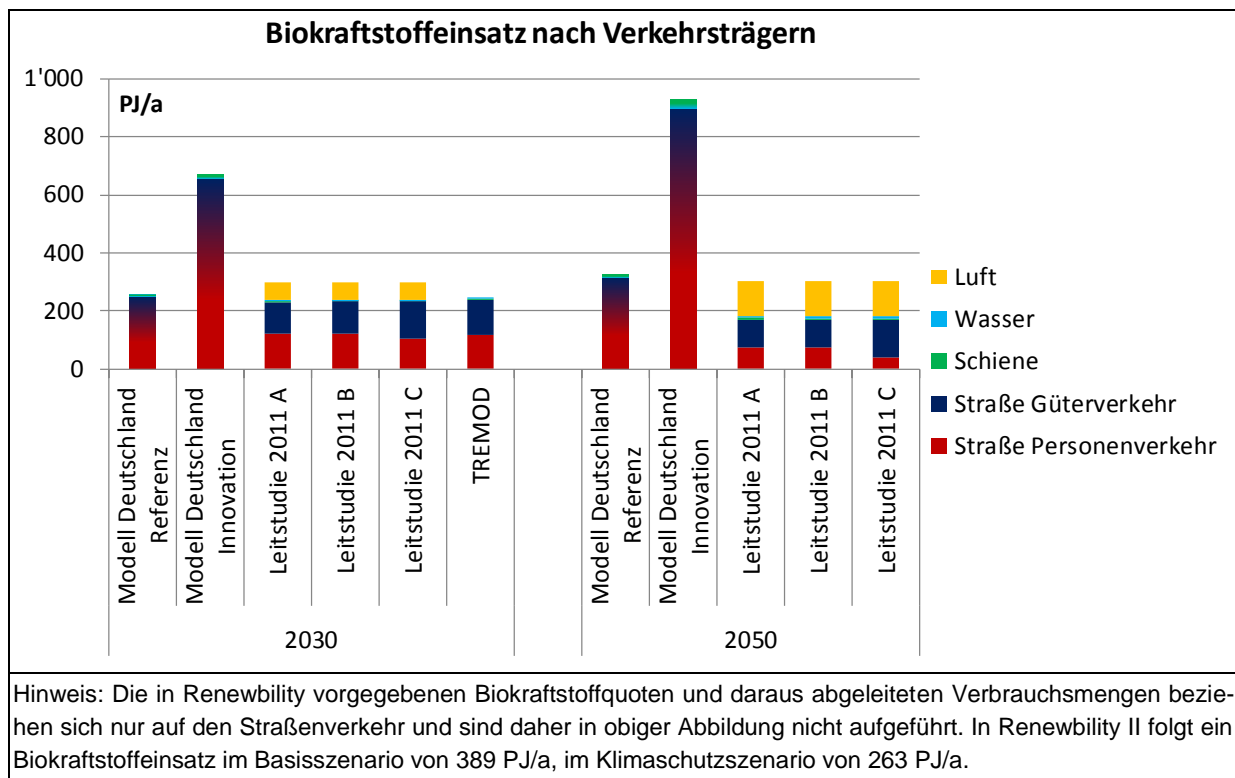


Abbildung 12: Biokraftstoffeinsatz bei verschiedenen Verkehrsträgern

3.3.2 Wesentliche Erkenntnisse für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

In allen hier berücksichtigten Studien wird für die Zukunft eine deutliche Steigerung des Biokraftstoffeinsatzes im Verkehr angenommen, die dazu beiträgt, den auch für das Jahr 2050 in allen Szenarien noch vorhandenen Bedarf an Kraftstoffen zunehmend aus nicht-fossilen Quellen zu decken. Allerdings variieren die insgesamt eingesetzten Biokraftstoffmengen deutlich zwischen den Studien und deren Szenarien:

- In den verkehrsspezifischen Modellinstrumentarien werden Biokraftstoffquoten verwendet, die Biokraftstoffmenge ist prozentual an die Höhe des gesamten Kraftstoffbedarfs gekoppelt. Die Ermittlung der Biokraftstoffquoten orientiert sich an den zum Zeitpunkt der Szenarienerstellung aktuellen gesetzlichen Regelungen. Das sind insbesondere die im geänderten Biokraftstoffquotengesetz geforderte Gesamtmineralölreduzierung von Treibhausgasen aller in Deutschland im Verkehr eingesetzten Kraftstoffe (Minderung um 7 % ab 2020) sowie die Anforderungen an spezifische Treibhausgasreduzierungen von Biokraftstoffen in der europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG). Die Modellannahmen in TREMOD verwenden allerdings nur die Mindestanforderungen an die spezifischen Emissionsminderungen eingesetzter Biokraftstoffe (60 % Minderung gegenüber fossilen Kraftstoffen ab 2018). Falls zukünftige Biokraftstoffe höhere spezifische Minderungen erreichen, werden zur Erreichung der insgesamt geforderten Emissionsminderungen niedrigere Biokraftstoffmengen als im Szenario benötigt (vgl. DBFZ 2012, S. 12f).
- In den sektorübergreifenden Szenarienstudien werden in den Referenzszenarien prozentuale Beimischungen von Biokraftstoffen zu fossilen Kraftstoffen angenommen, mögliche Anlehnungen an bereits geltende gesetzliche Regelungen werden dabei nicht erörtert. In den Zielszenarien werden Biokraftstoffpotenziale abgeschätzt. Während in der Leitstudie 2011 ausschließlich inländische Potenziale berücksichtigt werden, ist in den Energieszenarien und Modell Deutschland auch ein Import nachhaltig erzeugter Biokraftstoffe enthalten. Die Höhe der Biokraftstoffpotenziale variiert erheblich zwischen den Szenarien.

Die Art der eingesetzten Biokraftstoffe wird in den Studien nicht im Detail erörtert. Grundsätzlich wird in allen Studien ein zunehmender Anteil von Biokraftstoffen der zweiten sowie teilweise der dritten Generation angenommen. Dies wird in vier Studien explizit angegeben, in TREMOD ergibt sich ihr verstärkter Einsatz implizit mit der Einhaltung der Nachhaltigkeitskriterien der EU für Biokraftstoffe (2009/28/EG, Art. 17).

In den analysierten Szenarien werden Biokraftstoffe vor allem im Straßenverkehr eingesetzt. In der Leitstudie 2011 wird gezielt eine Biokraftstoffnutzung auch im Flugverkehr modelliert. Qualitativ wird auch in anderen Studien diskutiert, dass Biokraftstoffe zukünftig v.a. im Straßengüterverkehr und im Flugverkehr benötigt werden, da hier andere Alternativen zu fossilen Kraftstoffen nach aktuellen Einschätzungen nicht oder nur mit hohem Aufwand realisierbar sind.

Die Szenarienannahmen zur zukünftigen Biokraftstoffnutzung im Verkehr sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Sie müssen für eine Verwendung in einem möglichen Modellinstrumentarium der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie weitergehenden Analysen unterzogen werden. Biokraftstoffpotenziale für den Verkehr hängen von den zukünftigen Rahmenbedingungen ab. Neben generellen Kapazitäten zur Biomasse- respektive Biokraftstoffbereitstellung in Deutschland und weltweit sowie deren anteiliger Verfügbarkeit für den Verkehrssektor sind insbesondere die Nachhaltigkeitsanforderungen zu ihrer Bereitstellung (nicht nur für Treibhausgase) durch geltende und zukünftige gesetzliche Regelungen ausschlaggebend für die Höhe der Potenziale.

Für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung sind daher weitergehende Potenzialanalysen zur Verfügbarkeit von Biokraftstoffen im Verkehr notwendig. Dabei sollten inländische Potenziale, aber auch globale Potenziale von (zunehmend international gehandelten) Biokraftstoffen einbezogen werden. Besonderes Augenmerk sollte auf Nutzungskonkurrenzen der verfügbaren Flächen, Biomassen und Bioenergieträger (für den Energiesektor mit Bezug auf Verkehr vs. Strom/Wärme/Kälte) sowie den Einfluss unterschiedlich ambitionierter Nachhaltigkeitsstandards auf die Potenziale für den Verkehr liegen.

Ausgehend von den Potenzialanalysen sollten Ziele für den Biokraftstoffeinsatz im Verkehr bis 2030 und 2050 formuliert werden. Dabei muss die Verwendung von Biokraftstoffen stets auch in Verbindung mit den Potenzialen alternativer Antriebstechnologien und der Energieeffizienz zukünftiger Fahrzeuge diskutiert werden. Der Einsatz von Biokraftstoffen sollte gezielt vor allem dort gefördert werden, wo andere Alternativen zu fossilen Kraftstoffen nicht oder nur mit hohem Aufwand verfügbar sind.

3.4 Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor ist in Referenz- bzw. Trendszenarien das Ergebnis der modellierten Entwicklungen von Verkehrsleistungen sowie von Antriebstechnologien und Energieeffizienz der Verkehrsmittel. Gleiches gilt für explorative Maßnahmenszenarien. Bei Zielszenarien kann der Weg umgekehrt sein. Insbesondere wenn (wie in der Leitstudie 2011) sektorbezogene Ziele für den Verkehr vorgegeben sind, ist die Entwicklung des Endenergieverbrauchs nicht nur Ergebnis der Modellierungen, sondern gleichzeitig auch Ausgangspunkt für Vorfestlegungen bestimmter Entwicklungspfade bei Verkehrsmengen und Technik. Entsprechend sind die Entwicklungen des verkehrsbedingten Endenergieverbrauchs in den untersuchten Szenarien zu interpretieren.

3.4.1 Gesamter Endenergieverbrauch im Verkehrssektor

Die Minderungen des Endenergieverbrauchs für den Verkehr in Deutschland zwischen heute und 2030 liegen in den untersuchten Referenz-/Basis-Szenarien zwischen 0 % und 10 % (Abbildung 13, links):

- In den Referenzszenarien von Modell Deutschland und Energieszenarien sinkt der Endenergieverbrauch des Verkehrs bis 2030 um etwas mehr als **10 %** gegenüber 2005. Bis 2050 beträgt der modellierte Rückgang ca. 25 %.
- Im Basisszenario von Renewability II wird bis 2030 ein Rückgang um **5 %** ermittelt.
- Im Trendszenario von TREMOD ergibt sich **keine Abnahme** des Endenergieverbrauchs im Verkehr bis 2030.

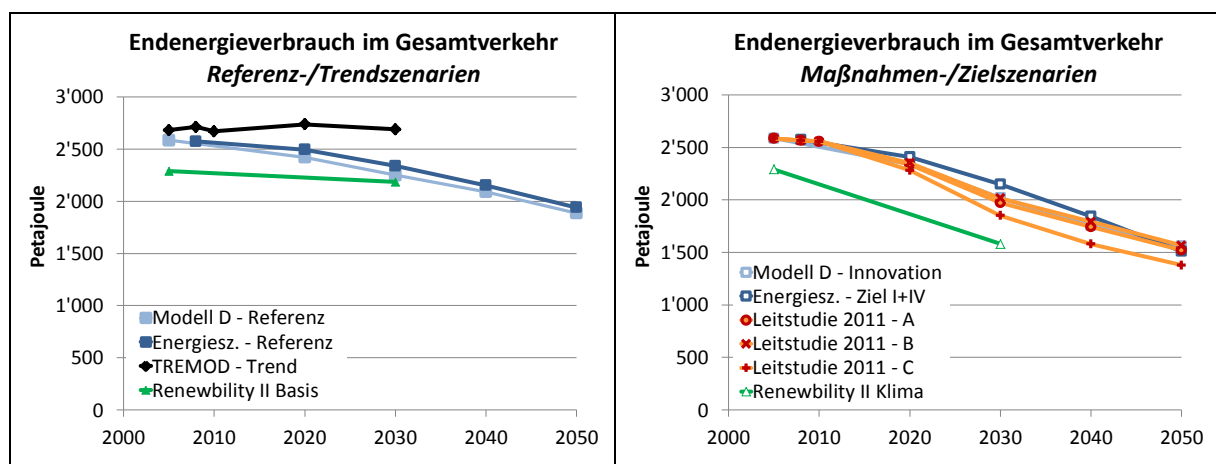


Abbildung 13: Endenergieverbrauch im Gesamtverkehr in den untersuchten Szenarien

In den maßnahmenorientierten Szenarien nimmt der Endenergieverbrauch deutlich stärker ab als in den Referenzszenarien (Abbildung 13, rechts).

- Die Zielszenarien in Modell Deutschland, Energieszenarien sowie die Szenarien A und B der Leitstudie kommen zu einem Verbrauchsrückgang um ca. **40 % bis zum Jahr 2050** gegenüber 2005, Szenario C der Leitstudie um **47 %**. Alle Zielszenarien erreichen damit das Endenergieverbrauchsziel für den Verkehr aus dem Energiekonzept der Bundesregierung [BMWi/BMU 2010, S. 5].
- Im Klimaschutz-Szenario von Renewbility, in dem Potenziale konkreter Maßnahmen modelliert wurden, sinkt der Endenergieverbrauch des Verkehrs **bis 2030 um 31 %** gegenüber 2005 [vgl. Öko/DLR 2012, S. 15]. Die Minderungsrate ist für diesen Zeitraum damit höher als in den oben genannten Zielszenarien, wo nur Minderungen um **17-28 %** für diesen Zeitraum modelliert werden.

Endenergieverbrauch im Personen- und Güterverkehr

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs muss getrennt nach Personenverkehr und Güterverkehr analysiert werden. In allen Szenarien kommen zukünftige Minderungen des Endenergieverbrauchs nahezu ausschließlich aus dem Personenverkehr. Der Endenergieverbrauch im Güterverkehr nimmt in Referenz- und Trendszenarien zukünftig zu, in den Zielszenarien wird weitgehend ein gegenüber heute gleichbleibender Verbrauch modelliert (Abbildung 14).

Der **Vergleich der Referenzszenarien** zeigt Ähnlichkeiten wie auch Unterschiede.

- Modell Deutschland und Energieszenarien haben insgesamt ähnliche Entwicklungen des Endenergieverbrauchs im gesamten Verkehrssektor. Allerdings nimmt in den Energieszenarien der Verbrauch im Personenverkehr stärker ab, während der Verbrauch im Güterverkehr stärker ansteigt als in Modell Deutschland.
- TREMOD hat im Trend einen ähnlichen Rückgang des Endenergieverbrauchs im Personenverkehr wie die Szenarienstudien. Die Unterschiede beim Gesamtverbrauch des Verkehrssektors im Vergleich zu den anderen Studien resultieren hauptsächlich aus einem deutlich stärkeren Anstieg des Energieverbrauchs im Güterverkehr.

Vergleich der Zielszenarien: Es werden in der Leitstudie 2011 abhängig vom Szenario Minderungen der Endenergieverbräuche im Personenverkehr um 52 % bis 62 % berechnet, die Zielszenarien der anderen zwei Szenarienstudien liegen innerhalb dieser Bandbreite. Im Güterverkehr kommt die Leitstudie ebenfalls zu Verbrauchsminderungen, die mit 3-8 % allerdings deutlich geringer ausfallen. Die anderen Szenarienstudien kommen dagegen auch in den Zielszenarien auf einen schwachen Anstieg im Güterverkehr um 1-3 %.

Ergänzend zeigt auch der **Vergleich zwischen Referenz- und Zielszenarien** Unterschiede zwischen den Studien. In Modell Deutschland ist im Jahr 2050 der Endenergieverbrauch des Personenverkehrs im Zielszenario um 24 % niedriger als im Referenzszenario, im Güterver-

kehr nur um 9 %. In den Energieszenarien liegen im Jahr 2050 Personen- und Güterverkehr im Zielszenario jeweils um ca. 22 % niedriger als im Referenzszenario, beide Bereiche tragen also ähnlich stark zu den zusätzlichen Energieeinsparungen im Verkehr bei.

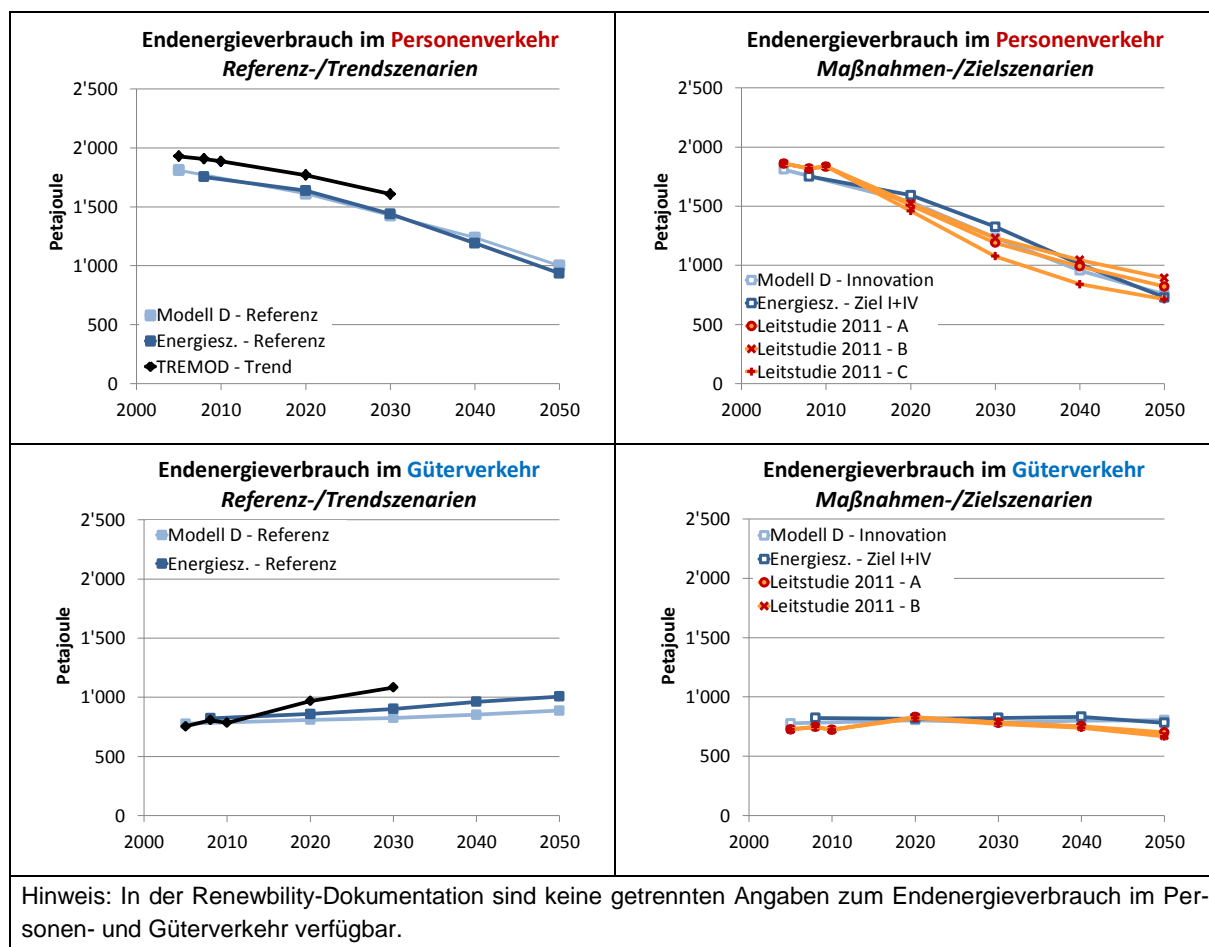


Abbildung 14: Endenergieverbrauch im Personen- und Güterverkehr in den untersuchten Szenarien

Spezifischer Endenergieverbrauch im Personen- und Güterverkehr

Wie im vorigen Absatz dargestellt, nimmt der Endenergieverbrauch im **Personenverkehr** im TREMOD-Trendszenario ähnlich stark ab wie in den Referenzszenarien von Energieszenarien und Modell Deutschland. Gleichzeitig steigen die Personenverkehrsleistungen in TREMOD aber deutlich stärker im Vergleich zu den beiden Szenarienstudien (Kap. 3.1.1). Demnach wird in TREMOD zukünftig ein insgesamt geringerer spezifischer Endenergiebedarf pro Verkehrsleistung modelliert als in den beiden anderen Studien, wie Abbildung 15, links, veranschaulicht. Diese unterschiedliche Entwicklung des zukünftigen Endenergiebedarfs pro Personen-km in den Studien resultiert aus mehreren Einflussfaktoren: Einerseits wurden unterschiedliche Modellannahmen zu alternativen Antriebstechnologien und fahrzeugspezifischer Energieeffizienz aller Verkehrsmittel (Kap. 3.2) gewählt; andererseits wurden unterschiedliche Modal-Split-Anteile öffentlicher Verkehrsmittel (mit niedrigeren spezifischen Verbräuchen als der MIV (Kap. 3.1) angenommen.

Im **Güterverkehr** ist der stärkere Anstieg des Endenergieverbrauchs im TREMOD-Trend-szenario gegenüber den Referenzszenarien der Szenarienstudien hauptsächlich Folge einer stärkeren Verkehrsleistungszunahme in TREMOD (Kap. 3.1.1). Dagegen entwickelt sich der durchschnittliche Endenergiebedarf pro Tonnen-km in allen dargestellten Szenarien ähnlich (Abbildung 15, rechts). Diese Entwicklung wird im Güterverkehr beeinflusst durch Modal-Split und technische Effizienzentwicklung sowie zusätzlich durch die Modellannahmen zu eingesetzten Fahrzeuggrößen und -auslastungen. Das Gewicht der verschiedenen Einzeleinflüsse kann in den untersuchten Studien sehr unterschiedlich sein. Eine diesbezügliche Bewertung der spezifischen Verbrauchsentwicklungen ist aufgrund der fehlenden Hintergrundinformationen der Studien hier nicht möglich (vgl. Kap. 3.2.2 und 3.2.3).

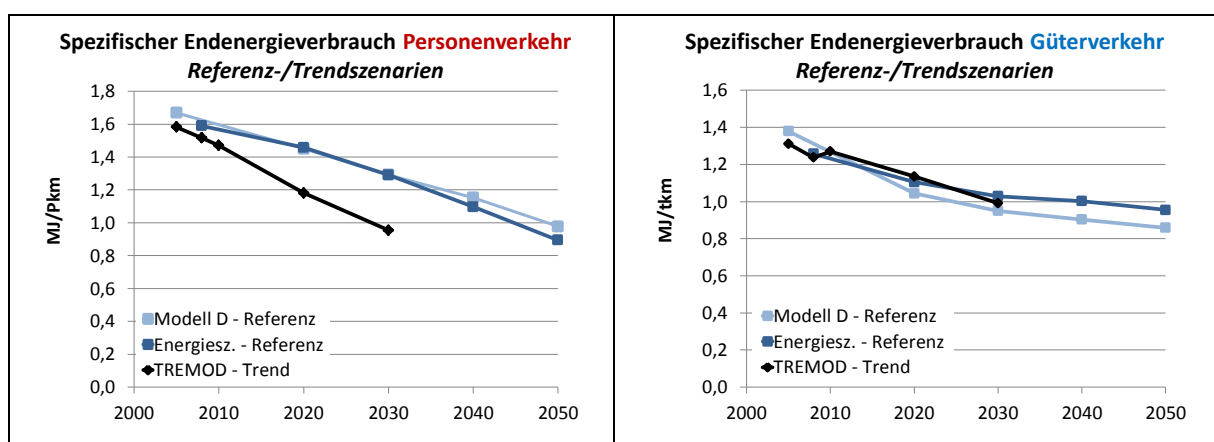


Abbildung 15: Durchschnittlicher Endenergieverbrauch pro Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr in den untersuchten Referenzszenarien

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs in den Zielszenarien gegenüber den Referenzszenarien wird primär von folgenden Änderungen beeinflusst:

- Im Klimaschutz-Szenario von Renewbility führen sowohl eine Verringerung der Gesamtverkehrsnachfrage und die Verlagerung auf energieeffizientere Verkehrsmittel als auch verstärkte technische Entwicklungen (alternative Antriebstechnologien, fahrzeugspezifische Energieeffizienz) zu einer Minderung des Endenergieverbrauchs im Verkehr.
- In den Zielszenarien sinken die Endenergieverbräuche nahezu ausschließlich durch eine endenergieeffizientere Abwicklung des Verkehrs: in der Leitstudie allein durch Einsatz effizienterer Antriebstechnologien; in Modell Deutschland und Energieszenarien auch durch zusätzliche Effizienzsteigerungen einzelner Antriebstechnologien sowie begrenzte Modal-Shifts von der Straße zu effizienteren Verkehrsträgern (Schiene, Wasser).

Eine Differenzierung, wie hoch die Beiträge der einzelnen Effekte sind, ist anhand der Studiendokumentationen nicht möglich.

3.4.2 Deckung des Endenergiebedarfs im Verkehr durch fossile Kraftstoffe und alternative Endenergieträger

Die Reduktion des Bedarfs an fossilen Kraftstoffen im Verkehr ist ein wichtiges Ziel zur Verringerung der Abhängigkeit von Energieimporten und zur Minderung von Treibhausgasen. Sie ist erreichbar durch eine Verringerung des Gesamtbedarfs an Energie und den Einsatz alternativer Energieträger (insbesondere Strom, strombasierte Kraftstoffe und Biokraftstoffe).

Zukünftig steigt der **Endenergieverbrauch alternativer Endenergieträger** im Verkehr in allen untersuchten Szenarien an (vgl. Abbildung 16):

- In den **Referenzszenarien** der Szenarienstudien und im TREMOD-Trendszenario steigt er zwischen 2005 und 2030 etwa um den Faktor 2,5 und im Renewability-Basisszenario um mehr als den Faktor 4. Bis 2050 erhöht sich der Einsatz alternativer Energieträger auch in den Referenzszenarien der Szenarienstudien auf das Vierfache gegenüber 2005.
- In den **Zielszenarien** der Szenarienstudien steigt der Verbrauch an alternativen Energieträgern deutlich stärker als in den Referenzszenarien. Im Jahr 2050 ist ihr Einsatz im Verkehr in Modell Deutschland und Energieszenarien 8- bis 9-mal so hoch wie 2005, in der Leitstudie immer noch ca. 5-mal so hoch.
- Nur im maßnahmenorientierten **Klimaschutz-Szenario** in Renewability I und II liegt der Einsatz alternativer Endenergieträger niedriger als im Basisszenario: Da der Biokraftstoffeinsatz über eine prozentuale Quote an den Energieverbrauch gekoppelt ist, werden im Klimaschutz-Szenario weniger Biokraftstoffe eingesetzt als im Basisszenario, was auch durch den im Klimaschutz-Szenario höheren Stromverbrauch nicht kompensiert wird.

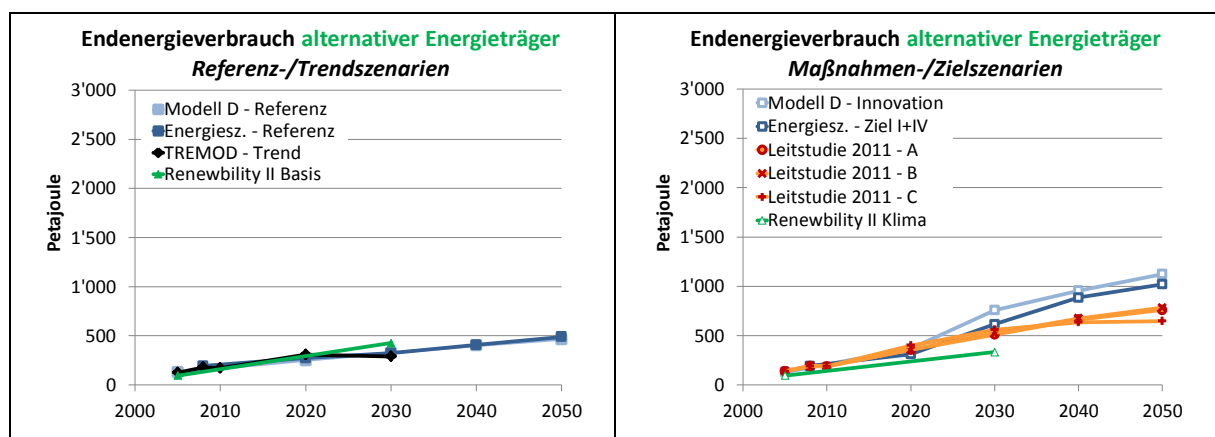


Abbildung 16: Verbrauchsentwicklung alternativer Endenergieträger (Strom, strombasierte Kraftstoffe, Biokraftstoffe) im Verkehr in den Szenarien

Der **Bedarf an fossilen Kraftstoffen** sinkt wegen des steigenden Einsatzes alternativer Energieträger stärker als der Gesamtendenergiebedarf (vgl. Abbildung 17). Dabei variiert die zukünftig benötigte Menge an fossilen Kraftstoffen erheblich zwischen den Szenarien. Dies ist

Folge sowohl der szenarienspezifischen Gesamtverbräuche als auch der unterschiedlichen Deckungsbeiträge alternativer Endenergieträger.

- Bis 2030 sinkt der Bedarf an fossilen Kraftstoffen in den Referenzszenarien von Modell Deutschland und Energieszenarien sowie im Renewability-II-Basisszenario jeweils um ca. 20 %. Für diese Reduktion hat in Renewability II der Einsatz alternativer Endenergieträger eine größere Bedeutung als in den Szenarienstudien.
- Im derzeitigen TREMOD-Trendszenario sinkt der Bedarf an fossilen Kraftstoffen bis 2030 nur um 6 % gegenüber 2005. Das liegt vor allem an der Stagnation des Gesamtendenergieverbrauchs, aber auch am etwas geringeren Einsatz von alternativen Endenergieträgern gegenüber den Referenz- bzw. Basisszenarien der anderen Studien.
- Bis 2050 kommen die Szenarienstudien auf einen Rückgang des fossilen Kraftstoffbedarfs um ca. 40 % gegenüber 2005.
- In den Zielszenarien sinkt der fossile Kraftstoffbedarf bis 2050 deutlich stärker als in den Referenzszenarien: um 70 % in der Leitstudie 2011 und bis 80 % in Modell Deutschland und Energieszenarien. Das ist durch einen niedrigeren Gesamtbedarf an Endenergie wie auch einen stärkeren Einsatz alternativer Endenergieträger gegenüber den Referenzszenarien begründet.

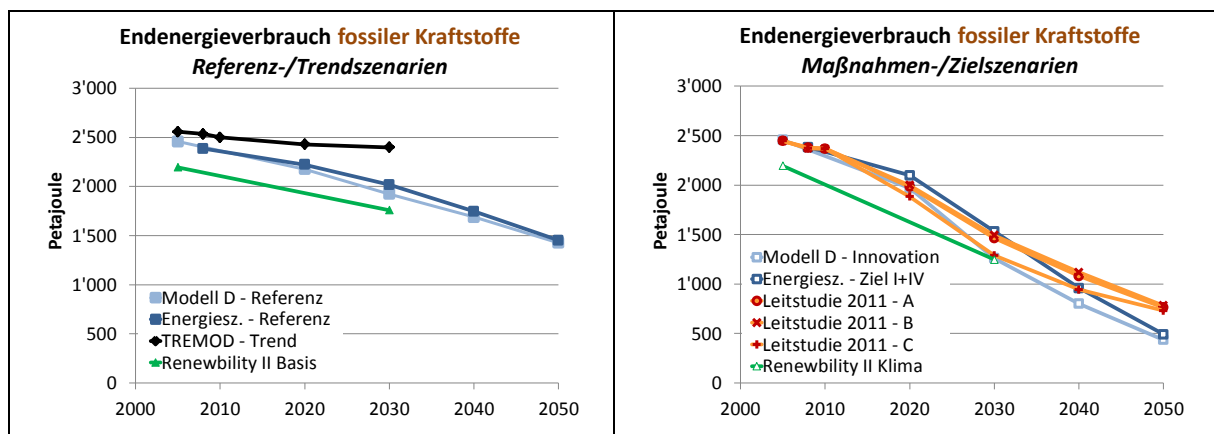


Abbildung 17: Entwicklung des Bedarfs an fossilen Kraftstoffen im Verkehr in den untersuchten Szenarien

Abbildung 18 stellt für die Jahre 2030 und 2050 Anteile fossiler Kraftstoffe und alternativer Endenergieträger (Strom, strombasierte Kraftstoffe und Biokraftstoffe) am Endenergieverbrauch des Verkehrs dar.

- In den Referenz-/Trendszenarien wird 2030 ein Anteil alternativer Energieträger am gesamten Endenergieverbrauch des Verkehrs von 15-19 % erreicht, im Jahr 2050 von ca. 25 %.
- Die Maßnahmen-/Zielszenarien zeigen im Jahr 2030 eine deutliche Bandbreite von 21 % (Renewability II) bis 38 % (Modell Deutschland).
- 2050 liegt der Anteil alternativer Energieträger in Modell Deutschland und Energieszenarien bei etwa 70 %, in der Leitstudie 2011 bei etwa 50 %.

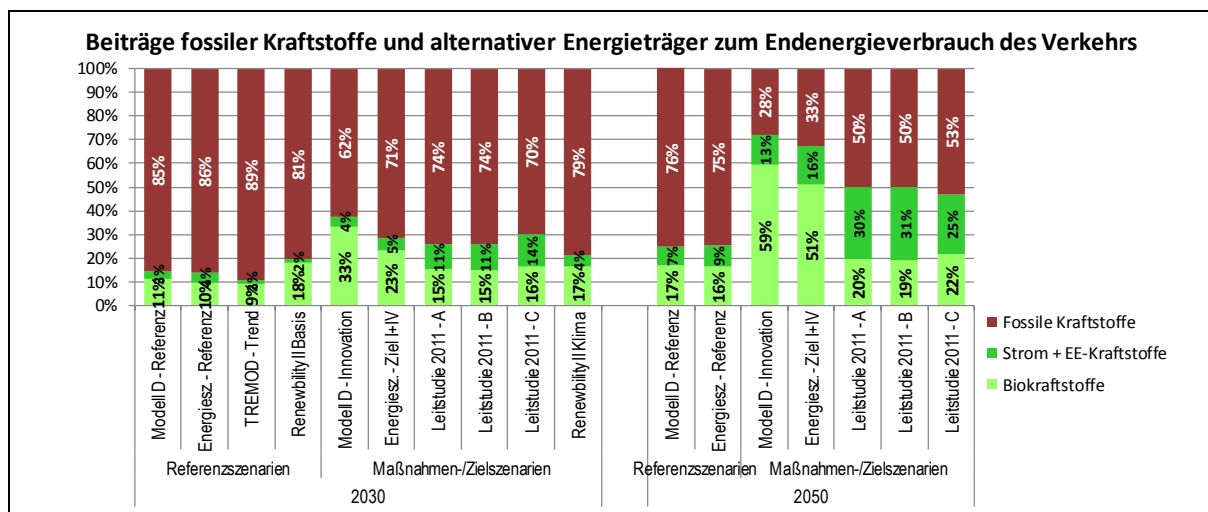


Abbildung 18: Deckung des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor durch fossile Kraftstoffe und alternative Energieträger in den Jahren 2030 und 2050

Mit der europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG) wird für das Jahr 2020 ein Mindestanteil von 10 % Erneuerbare Energien am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors vorgegeben. Für dieses Ziel werden sämtliche erneuerbaren Energien aller Verkehrsträger berücksichtigt, Stromverbrauch im Straßenverkehr wird dabei mit Faktor 2,5 angerechnet. Als Gesamtenergieverbrauch, auf den sich das 10 %-Ziel bezieht, wird allerdings nur der Endenergieverbrauch im Straßen- und Schienenverkehr herangezogen (vgl. 2009/28/EG Art. 3).

In TREMOD, Renewability und der Leitstudie 2011 sowie in den Zielszenarien von Modell Deutschland und Energieszenarien wird das 10 %-Ziel der Erneuerbare-Energien-Richtlinie bereits allein mit dem Einsatz von Biokraftstoffen erreicht. In den Referenzszenarien von Modell Deutschland und Energieszenarien decken Biokraftstoffe allein 9 - 9,5 % des Endenergieverbrauchs Verkehr gemäß EE-Richtlinie (nur Straße und Schiene). Bei Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen wird das EE-Ziel auch in diesen Szenarien erreicht.

3.4.3 Wesentliche Erkenntnisse für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

Entwicklung des gesamten Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor

Der zukünftige Endenergieverbrauch des motorisierten Verkehrs in Deutschland sinkt in den untersuchten **Trend-/Referenzszenarien** bis 2030 zwischen 0 % und 10 %. Bis 2050 beträgt die Minderung in Szenarien mit diesem Zeithorizont ca. 25 %. Während der Energieverbrauch im Personenverkehr abnimmt, steigt er im Güterverkehr weiter an. Die Änderungen und die Gründe für die modellierten Entwicklungen weichen allerdings zwischen den Studien ab.

- Für den Personenverkehr kommen die Referenzszenarien der sektorübergreifenden Szenarienstudien und das TREMOD-Trendszenario insgesamt zu ähnlichen Entwicklungen des Endenergieverbrauchs – allerdings aus anderen Gründen: Ein stärkeres Verkehrswachstum in TREMOD wird durch eine stärkere Absenkung des spezifischen Endenergiebedarfs pro Personen-km kompensiert.

- Im Güterverkehr variiert die Höhe des gesamten Endenergieverbrauchs hauptsächlich durch unterschiedlich hohe Verkehrsleistungen. Dagegen resultieren in den untersuchten Referenzszenarien ähnliche Entwicklungen des über alle Verkehrsmittel gewichteten spezifischen Endenergiebedarfs pro Tonnen-km. Aus den Dokumentationen der Studien konnte aber nicht ermittelt werden, inwieweit auch ähnliche Annahmen für die Beiträge einzelner Einflussparameter (insb. Antriebstechnologien, Fahrzeugeffizienz, Lkw-Größenklassen und Auslastung) zugrunde liegen.

Die Analysen in den vorhergehenden Kapiteln haben gezeigt, dass zusätzliche detaillierte Analysen notwendig sind, um die jeweiligen Verkehrs- bzw. Technologieentwicklungen der einzelnen Studien besser bewerten zu können. Für ein Modellinstrumentarium in der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie muss demnach eine tiefergehende Analyse von verwendeten Modellen und Basisannahmen erfolgen. Auf dieser Grundlage können die unter den Randbedingungen der MKS plausibelsten Entwicklungen von Verkehrsmengen und Technologien bzw. die Eignung der zugrunde liegenden Modelle und Methoden ermittelt und deren Verwendung im MKS-Modellinstrumentarium angestrebt werden.

In einem neuen Referenzszenario für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie könnten die plausibelsten Entwicklungen (z.B. Verkehrsentwicklung Studie A; Effizienzentwicklung Studie B; Biokraftstoffeinsatz Studie C) übernommen werden. Dabei muss auf innere Plausibilität der Annahmen geachtet werden. Im Ergebnis könnte der zukünftige Endenergiebedarf des Personen- und Güterverkehrs in diesem neuen Referenzszenario relevant von allen hier analysierten Referenzszenarien abweichen.

Maßnahmen- und Zielszenarien der untersuchten Szenarienstudien kommen durchgängig zu deutlich stärkeren Verbrauchsminderungen im Personen- wie auch im Güterverkehr als die jeweiligen Referenzszenarien. Allerdings konzentrieren sich die untersuchten Szenarien überwiegend auf ausgewählte Minderungspfade (Vermeidung &, Verlagerung vs. Antriebstechnologien vs. Fahrzeugeffizienz) und adressieren nicht alle möglichen Pfade mit ähnlicher Gewichtung. Für neue maßnahmenorientierte Szenarien stellt sich daher ebenfalls die Frage, welche Gesamtminderungspotenziale des Endenergieverbrauchs im Verkehr ermittelt werden, wenn beispielsweise Vermeidungs- und Verlagerungspotenziale von Renewability I/II mit technischen Effizienzpotenzialen wie in der Leitstudie 2011 verknüpft werden.

Für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie stellt sich damit die Herausforderung, Potenziale sowohl technischer als auch nicht-technischer Pfade zu untersuchen. Dabei müssen auch die Wechselwirkungen der verschiedenen Pfade analysiert sowie die Realisierbarkeit von Potenzialen abhängig von den Rahmenbedingungen, z.B. von konkreten (politischen) Maßnahmen, und dem damit verbundenen Aufwand (z.B. Kosten) beurteilt werden.

Verringerung des zukünftigen Energiebedarfs an fossilen Kraftstoffen

Die Beiträge alternativer Energieträger zur Verringerung des zukünftigen Bedarfs an fossilen Kraftstoffen im Verkehr differieren stark zwischen den untersuchten Studien und Szenarien. Gründe dafür sind unterschiedliche Szenarienergebnisse einerseits zu zukünftigen Verkehrsleistungen, alternativen Antriebstechnologien und Fahrzeugeffizienz und der daraus resultierende Restbedarf an Verbrennungskraftstoffen sowie andererseits differierende Annahmen zum Ersatz fossiler Kraftstoffe durch Biokraftstoffe.

Mit dem Ziel, die Abhängigkeit des Verkehrs in Deutschland von fossilen Kraftstoffen zu verringern, muss auch die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie alle diese unterschiedlichen Minderungspfade adressieren. Wie stark der zukünftige Bedarf an fossilen Kraftstoffen in einem neuen MKS-Referenzszenario sinken wird und welche Beiträge verschiedene Entwicklungen dazu leisten, hängt entscheidend davon ab, welche Einzelentwicklungen im Ergebnis einer tiefergehenden Modellanalyse in der MKS für den Referenzfall zugrunde gelegt werden.

Primärenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen des Verkehrs

In den untersuchten Szenariestudien konzentrieren sich die Betrachtungen zum Verkehrssektor auf den Endenergieverbrauch und direkte Treibhausgasemissionen im Fahrbetrieb. Wenn die Bewertung der Umweltwirkungen des Verkehrs im Fokus stehen, müssen aber auch der damit verbundene Primärenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen der Energiebereitstellung diskutiert werden.

Mit Elektromotoren betriebene Fahrzeuge (Batterieelektrisch, Brennstoffzelle) haben deutlich niedrigere spezifische Endenergieverbräuche als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (vgl. Abbildung 8 in Kap. 3.2.1.2). Damit führt ein höherer Anteil dieser Fahrzeuge zu einer Absenkung des Endenergieverbrauchs im Verkehr. Das gilt jedoch nicht zwangsläufig für den gesamten mit dem Verkehr verbundenen Energieverbrauch und auch nicht für die Treibhausgasemissionen. Mit der Bereitstellung von Fahrstrom oder Wasserstoff können je nach Bereitstellungspfad auch relevante zusätzliche Energieaufwendungen sowie Treibhausgasemissionen verbunden sein. Auch wenn diese nicht dem Verkehrssektor zugerechnet werden, schlagen sie sich **trotzdem in der nationalen Gesamtbilanz** nieder. Gleiches gilt für Biokraftstoffe, soweit diese aus Deutschland stammen.

Anteilige Vorkettenbeiträge zu Energieverbrauch und Emissionen werden in den Modellinstrumentarien TREMOD und Renewbility über entsprechende Faktoren direkt dem Verkehr zugerechnet, wobei hier nicht zwischen Vorkettenemissionen im Inland (= Teil der nationalen Bilanz) oder Ausland differenziert wird.

Auch in den sektorübergreifenden Szenariestudien werden Vorkettenemissionen des Verkehrs berücksichtigt, allerdings werden sie über die Interaktion mit dem Umwandlungssektor erfasst und nicht differenziert für den Verkehr ausgewiesen. Eine Einschätzung, wie stark der

Verkehr über die notwendige Bereitstellung der Endenergieträger zu Primärenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen in Deutschland beiträgt, ist anhand der aus den Studien verfügbaren Daten nicht möglich.

Insbesondere durch die stärkere Elektrifizierung des Verkehrs und den Einsatz von erneuerbaren Energieträgern wird es immer wichtiger, die Bereitstellungsemissionen („vom Bohrloch bis zum Tank“) zu ermitteln. Dabei sollte zukünftig auch überprüft werden, ob es möglich ist, diese Bereitstellungsemissionen nach „inländisch“ und „ausländisch“ zu differenzieren, um eine Zuordnung für nationale Emissionen machen zu können. Nur dann ist im Vergleich verschiedener Optionen ersichtlich, in welchem Umfang alternative Antriebstechnologien insgesamt zu Minderungen der nationalen Treibhausgasemissionen beitragen können, insbesondere auch im Vergleich zur Optimierung konventioneller Antriebe, dem Einsatz von Biokraftstoffen sowie Maßnahmen zur Vermeidung und Verlagerung von motorisiertem Verkehr.

4 Fazit und Empfehlungen

Für viele Fragestellungen im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie werden abgestimmte Szenarien zur zukünftigen Entwicklung des Verkehrs und damit einhergehendem Energieverbrauch und Umweltwirkungen benötigt. Zur Erstellung solcher Szenarien ist ein anerkanntes und transparentes Modellinstrumentarium erforderlich, mit dem Effekte von Trendentwicklungen und Maßnahmen auf Energieverbrauch, Treibhausgasausstoß und andere Emissionen aus dem Verkehr flexibel und kurzfristig abgeschätzt werden können. Existierende Szenarien zukünftiger Energieverbrauchs- und Emissionsentwicklungen, die in den letzten Jahren in verschiedenen Studien untersucht worden sind, bieten dafür prinzipiell eine wichtige Grundlage. Ihre Ergebnisse sind zudem bereits heute wichtige Aspekte in den Diskussionen zwischen der Bundesregierung und allen in der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie beteiligten Gruppen.

In der vorliegenden Kurzstudie wird eine Übersicht und Gegenüberstellung wichtiger Arbeiten mit unterschiedlichen Szenarien zu zukünftigen Verkehrs- und Emissionsentwicklungen sowie zugrunde liegender Einflussparameter und Annahmen gegeben. Dafür wurden die Modellinstrumentarien Renewbility und TREMOD, die ausschließlich den Verkehrssektor berücksichtigen, sowie drei Szenarienstudien (Modell Deutschland, Energieszenarien, Leitstudie 2011), die alle Energieverbrauchssektoren umfassen und in diesem Rahmen auch Aussagen zum Verkehr treffen, einbezogen. Die Kurzstudie schafft damit wichtige Voraussetzungen für die weitere Diskussion vorliegender Szenarienergebnisse und der Entwicklung abgestimmter Szenarien im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie.

Die ausgewählten Arbeiten wurden detailliert auf diejenigen Aspekte hin analysiert und miteinander verglichen, welche ausschlaggebend für die zukünftige Entwicklung des Energiebedarfs für den Verkehrssektor sowie die damit verbundenen Treibhausgasemissionen sind:

- die Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr
- die Eigenschaften der Verkehrsmittel (Antriebstechnologien und Energieeffizienz) und
- den Einsatz erneuerbarer Energieträger im Verkehr.

Die Einzelentwicklungen der genannten Parameter in den Trend- bzw. Referenzszenarien sowie deren Änderungen in maßnahmenorientierten Szenarien wurden herausgearbeitet und verglichen. Anschließend wurden die Gesamtergebnisse der Szenarien zur Entwicklung des Endenergieverbrauchs sowie der Beiträge fossiler Kraftstoffe und alternativer Energieträger zur Deckung des zukünftigen Energiebedarfs im Verkehrssektor gegenübergestellt. Zur Beurteilung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden der dargestellten Entwicklungen wurden die methodischen Vorgehensweisen der Studien herausgearbeitet, soweit dies anhand der vorliegenden Dokumentationen möglich war.

Die durchgeführte Analyse zeigt zwischen den berücksichtigten Studien Gemeinsamkeiten, aber auch deutliche Unterschiede der zukünftigen Entwicklungen sowohl in Referenzszenarien

als auch in maßnahmenorientierten Szenarien bei allen untersuchten Parametern. Die Ursachen dafür konnten im Rahmen der vorliegenden Kurzstudie nur bedingt nachvollzogen werden. Wesentliche Bestimmungsparameter bei der Entwicklung von Szenarien sind einerseits die eingesetzten Modelle, deren Einflussparameter und Algorithmen, andererseits die exogen getroffenen Annahmen zu den Eingangsdaten für die Modelle. Zu beidem geben die vorliegenden Dokumentationen der untersuchten Szenarien nur einen eingeschränkten Einblick, da die für eine Nachvollziehbarkeit notwendige Transparenz teilweise nicht gegeben ist.

Die Vergleichbarkeit der maßnahmenorientierten Szenarien ist zusätzlich limitiert. Ihre Annahmen und Ergebnisse hängen stark von den jeweiligen Fragestellungen ab. Es gibt explorative Maßnahmen Szenarien ebenso wie normative Zielszenarien. Die meisten Szenarien verfolgen unterschiedliche technik-orientierte Ansätze, in Renewability liegt ein wesentlicher Schwerpunkt auch auf nicht-technischen Potenzialen (Vermeidung, Verlagerung). Alle Szenarien demonstrieren damit jeweils einen ausgewählten Entwicklungspfad, sie stellen aber keine unter dem Kriterium eines effizienzmaximierenden Einsatzes von Ressourcen abgestimmten Gesamtstrategien zur Erreichung energie- bzw. klimapolitischer Ziele dar.

Die vorliegenden Studien ermöglichen einen guten Überblick zu der Frage, welche Daten und Rahmenbedingungen in Verkehrs- und Technologieentwicklungen einfließen und welche Auswertungen und Ergebnisse mittels einer modelltheoretischen Herangehensweise erzielt werden können. Gleichzeitig zeigen sie, wie stark die Szenarienergebnisse von den angenommenen bzw. erwarteten Rahmenbedingungen abhängig sind. Eine direkte Übernahme vorliegender Szenariomethoden bzw. deren Ergebnissen für ein eigenes Modellinstrumentarium der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie ist daher ohne weitergehende Analysen nicht möglich. Denkbar wäre allerdings, dass Modellgrundlagen (Methodik, Einflussparameter, Basisannahmen) für Teilentwicklungen aus existierenden Szenarien auch für das MKS-Modellinstrumentarium verwendbar sind. Das muss zunächst im Rahmen tiefergehender Modellanalysen näher geprüft werden.

Das in den meisten Arbeiten verwendete Instrumentarium eines Basis- bzw. Referenzszenario soll plausible Möglichkeiten zukünftiger Entwicklungen darstellen, die sich mit einer Beibehaltung heute angelegter Politiken und Fortführung vergangener Trends einstellen können. Allerdings stehen wir heute in einer Welt mit zunehmend unsicherer Fortschreibung des „business as usual“, wie auch die Bandbreite der Ergebnisse in den untersuchten Referenzszenarien zeigt. Zunehmend deuten Indikatoren darauf hin, dass der Welt grundsätzliche Veränderungen der Energieversorgungs- und -verbrauchsmuster bevorstehen (Paradigmenwechsel), wobei dieser Wandel bereits begonnen hat. Exakte Zeiträume von Veränderungen sind nicht belastbar absehbar.

Vor diesem Hintergrund könnten neben der Ableitung eines einzelnen „plausiblen“ Referenzszenarios auch Leitplankenszenarien ein adäquates Vorgehen sein, in denen stärkere Variationen von Rahmenbedingungen wie Kosten (Fahrzeuge, Kraftstoffe...) und anderen Parame-

tern abgebildet werden und deren Einfluss auf die Gesamtentwicklungen ermittelt wird. Durch die Abdeckung eines breiten Spektrums denkbarer Entwicklungen wird der mögliche Rahmen für notwendige zusätzliche Anstrengungen zur Erreichung von (nicht nur) Energie- und Umweltzielen aufgezeigt. Die Szenarienannahmen sollten mit Stakeholdern und Experten abgestimmt werden, ebenso ist auch eine fundierte Ergebnisinterpretation sehr wichtig.

Gleichzeitig muss das Modellinstrumentarium die Untersuchung gezielter Veränderungen verkehrsbezogener Entwicklungen in maßnahmenorientierten Szenarien ermöglichen, um den möglichen Einfluss und die Auswirkungen unterschiedlicher Entwicklungspfade zu analysieren. Dabei sollten Analysen nicht-technischer Pfade zur Vermeidung und Verlagerung von Verkehr ebenso wie technischer Pfade für alle Antriebstechnologien und Energieträger erfolgen. Ein Bestandteil der Analysen für technische Pfade sollten prinzipiell auch Einschätzungen zu den globalen Potenzialen der benötigten Rohstoffe unter hohen Nachhaltigkeitsstandards und deren anteiliger Verfügbarkeit für den Verkehr in Deutschland sein. Darauf aufbauend könnte das Modellinstrumentarium einerseits Potenziale individueller Entwicklungen verschiedener Pfade abhängig von den gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen aufzeigen, andererseits Möglichkeiten zum Erreichen konkreter energie- und umweltbezogener Zielwerte unter Berücksichtigung eines effizienten Einsatzes von Ressourcen (Energie, Material, Geld) abbilden – und somit die Entwicklung einer Langfriststrategie im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie unterstützen.

Die Szenarienstudien mit Einbezug des gesamten Energiesystems konzentrieren sich bei den Betrachtungen zum Verkehrssektor auf den Endenergieverbrauch und direkte Treibhausgasemissionen im Fahrbetrieb. Rückwirkungen auf die Verfügbarkeit von Energie- und Materialressourcen sind ‚blinde Flecken‘ dieser Studien. Die strategische Einordnung von alternativen Energieträgern (auch fossilen) steht damit auf keinem robusten Fundament. Mit der Umstellung der Energieversorgung des Verkehrs auf alternative Energieträger wächst allerdings die Bedeutung der vorgelagerten Prozesse zur Energiebereitstellung. Mit einer starken Senkung der direkten Energieverbräuche muss nicht zwangsläufig auch eine ähnliche Reduktion der damit verbundenen Umweltwirkungen (Klimawirkung, Luftqualität, Biodiversität u.a.) einhergehen. Daher sollten Szenarien im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie in jedem Fall auch die Analyse von vorgelagerten Umweltwirkungen einbeziehen, die sich abhängig von der eingesetzten Menge erneuerbarer Energieträger und deren Bereitstellungsketten (spezifiziert nach verschiedenen Biokraftstoffoptionen, Strompfaden, strombasierten Kraftstoffen) ergeben. Schließlich sollten auch die Möglichkeiten und Notwendigkeit für einen Einbezug der Fahrzeugherstellung (z.B. Bedarf und Potenziale benötigter seltener Rohstoffe) sowie ggf. neuer Verkehrsinfrastrukturbedarf (z.B. Oberleitungen für Lkw) in das Modellinstrumentarium und Szenarien der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie zumindest geprüft werden.

5 Literaturverzeichnis

- BMU (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.
- BMU (2012): 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, März 2012.
- BMVBS (2007): Prognose der bundesweiten Verkehrsverflechtungen 2025; ITP/BVU im Auftrag des BMVBS; FE-Nr. 96.0857/2005; München/Freiburg 2007.
- BMWi/BMU (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin 2010.
- DBFZ (2012): DBFZ Report Nr. 11; Monitoring Biokraftstoffsektor. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig (Hrsg.), mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Leipzig 2012.
- EWI (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Studienprojekt Nr. 12/10 im Auftrag des BMWi, EWI Köln, Prognos Basel, GWS Osnabrück, 2010.
- IFEU (2011): Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative. IFEU zusammen mit Fraunhofer ISI, Prognos, GWS, in Zusammenarbeit mit IfnE, Fraunhofer ISE, IREES. Gefördert durch das Bundesumweltministerium. Heidelberg, Karlsruhe, Berlin, Osnabrück, Freiburg, 2011.
- IFEU (2012): Fortschreibung und Erweiterung Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMODO, Version 5). Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, Heidelberg, 2012.
- IFEU (2013): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs im Kontext des Energiekonzepts der Bundesregierung bis 2050. IFEU zusammen mit INFRAS und LBST. Im Auftrag des UBA (UFOPLAN 2012 – FKZ 3712 45 100). In Bearbeitung
- INFRAS (2010): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 3.1; www.hbefa.net; Bern, Februar 2010; Dokumentation in Vorbereitung.

- IWES (2013): Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung - Ableitung von optimalen strukturellen Entwicklungspfaden für den Verkehrs- und Wärmesektor. Projektpartner: Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU), Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stiftung Umweltenergierecht (SUER). Im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). In Bearbeitung
- MiD 2002: Mobilität in Deutschland; INFAS und DIW Berlin, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; Berlin/Bonn; April 2004.
- MiD 2008: Mobilität in Deutschland 2008: Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen - Emissionen - Trends, INFAS, DLR-IVF; Berlin 2010.
- NOW (2013): Überleitung der Ergebnisse aus GermanHy in das Emissionsberechnungsmodell TREMOD. gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie (NOW). Autoren: Wolfram Knörr (IFEU), Alexander Schacht (IFEU), Patrick R. Schmidt (LBST), Werner Weindorf (LBST), Martin Wietschel (Fraunhofer ISI), Julia Michaelis (Fraunhofer ISI), Frank Merten (Wuppertal Institut), Peter Viebahn (Wuppertal Institut), Hans Holdik (BAST). Veröffentlichung in Vorbereitung
- Öko/DLR (2009a): Renewbility – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Teil 1: Methodik und Datenbasis. Untersuchung im Auftrag des BMU, Öko-Institut, Berlin, DLR Berlin, IFEU Heidelberg, DBFZ Leipzig, TU Dresden, 2009.
- Öko/DLR (2009b): Renewbility – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Teil 2: Szenario-Prozess und Szenarioergebnisse. Untersuchung im Auftrag des BMU, Öko-Institut, Berlin, DLR Berlin, IFEU Heidelberg, DBFZ Leipzig, TU Dresden, 2009.
- Öko/DLR (2012): Renewbility II – Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs. Zentrale Ergebnisse. Öko-Institut Berlin, DLR Berlin, Fraunhofer ISI Karlsruhe. Berlin, Oktober 2012.
- StatBA 8.6.2: Luftverkehr auf allen Flugplätzen; Statistisches Bundesamt Fachserie 8, Reihe 6.2; Erscheinungsweise jährlich
- UBA (2011): Umweltbundesamt [Hrsg.]: Energieeffizienz in Zahlen. Öko-Institut, Fraunhofer ISI Karlsruhe, H.J. Ziesing; im Auftrag des Umweltbundesamtes (FKZ 3708 41 121). Dessau-Roßlau 2011.

UBA (2013a): Politikszenerarien für den Klimaschutz VI – Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Öko-Institut, FZ Jülich IEK-STE, DIW Berlin, Fraunhofer ISI Karlsruhe; im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hrsg.). Dessau-Roßlau, 2013.

UBA (2013b): Luftqualität 2020/2030: Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien“, FKZ 3710 43 219. Öko-Institut, IZT Berlin, IFEU Heidelberg, TNO (NL), Stern (FU Berlin), IER Stuttgart, Thünen-Institut (Braunschweig). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Laufendes Projekt.

ViZ: BMVBS (Hrsg.): Verkehr in Zahlen; bearbeitet von DIW; Erscheinungsweise jährlich; Bonn/Berlin.

WWF (2009): Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050. Untersuchung von Prognos Basel, Öko-Institut Berlin, H.-J. Ziesing Berlin im Auftrag des WWF Deutschland (Hrsg.), Frankfurt, 2009.