Klimaschutzszenario 2050

1. Modellierungsrunde

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Berlin, 4. August 2014

Öko-Institut e.V.

Büro Berlin
Schicklerstr. 5-7
D-10179 Berlin
Tel.: +49-(0)30-405085-0
Fax: +49-(0)30-405085-388

www.oeko.de

Fraunhofer ISI
Breslauer Str. 48
D-76139 Karlsruhe
Tel.: (0721) 6809-203

Fax (0721) 6809-272

www.isi.fhg.de

Bearbeitet von

Öko-Institut e.V.

Julia Repenning
Felix Chr. Matthes
Ruth Blanck
Lukas Emele
Ulrike Döring
Hannah Förster
Markus Haller
Ralph Harthan
Klaus Henneberg
Hauke Hermann
Wolfram Jörß
Peter Kasten
Sylvie Ludig
Charlotte Loreck
Margarethe Scheffler
Katja Schumacher

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung

Wolfgang Eichhammer
Sibylle Braungardt
Rainer Elsland
Tobias Fleiter
Johannes Hartwig
Judit Kockat
Ben Pfluger
Wolfgang Schade
Barbara Schlomann
Frank Sensfuß

dezentec

Uwe Athmann

Hans-Joachim Ziesing

Die wesentlichen Ergebnisse im Überblick

- 80–90 % Treibhausgasminderung bis 2050 bedeutet eine Reduktion des Einsatzes fossiler Energieträger um bis zu 85 %. Die Stromerzeugung muss einen deutlich höheren Minderungsbeitrag leisten, da die Vermeidung der Nicht-CO_2-Treibausgase (vor allem in der Landwirtschaft) an Grenzen stößt.
- Der Anteil erneuerbarer Energien an der inländischen Stromerzeugung muss bis 2050 auf ca. 95 % steigen, um die Ziele zu erreichen. Windkraft und Solarenergie spielen hierbei die wichtigste Rolle.
- Eine Verbesserung der Effizienz in allen Sektoren ist unbedingt erforderlich, um die Klimaschutzziele zu erreichen.
- Der Stromerzeugungssektor sollte zuerst dekarbonisiert werden. Die anderen Sektoren sollten zunächst alle Effizienzpotenziale ausschöpfen und erst dann in Richtung strombasierter Alternativen oder Biomasse umsteuern.
- Die nachhaltigen Biomassepotenziale sind begrenzt. Biomasse sollte deshalb langfristig (nach 2030) nur in den Sektoren eingesetzt werden, in denen wenig klimaneutrale Alternativen zur Verfügung stehen – also vor allem im Verkehrs- und Industriesektor.
- Um eine Treibhausgasminderung von 80 % zu erreichen, müssen auch die Ziele des Energiekonzepts zum Ausbau von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz eingehalten werden. Für eine Treibhausgasminderung von 90 % oder mehr müssen die Ziele sogar übertroffen werden.
- Ambitionierte Zwischenziele für die Jahre 2020–2040 sind notwendig, damit die langfristigen Ziele erreicht werden können. In den ersten Dekaden sind möglichst zügige Minderungsmaßnahmen erforderlich, da zusätzliche Minderungen ab einem gewissen Dekarbonisierungsgrad immer schwieriger zu erreichen sind.
- Deutschland weist seit Jahren eine Schwäche bei den Investitionen auf. Ambitionierte Klimapolitik unterstützt diese Schwäche zu mildern. Die jährlichen Investitionen werden durch Klimapolitik um 40 bis 50 Milliarden Euro angehoben, was einem Anstieg um rund ein Viertel entspricht. Rund 20 bis 25 Milliarden Euro entfallen davon auf Maßnahmen zur energetischen Sanierung der Gebäude.
- Die ökonomische Analyse zeigt, dass die beschriebene Strategie aus Effizienzpolitik plus erneuerbarem Strom (nahe 100 %) plus Produktinnovation eine No-regret-Strategie darstellt, die sich für Deutschland langfristig auszahlen würde.

Kurzfassung

1 Einführung

Die Bekämpfung des globalen Klimawandels ist eine der zentralen Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Sie erfordert eine massive Minderung der Emissionen von Treibhausgasen (THG) und damit grundlegende Veränderungen des Energiesystems, aber auch eine erhebliche Umgestaltung nahezu aller anderen Wirtschaftsbereiche. Den Industriestaaten kommt in der notwendigen Wende eine besondere Rolle zu. Sie sind angesichts ihrer langen Industrialisierungsgeschichte überwiegend verantwortlich für den bereits eingetretenen, wie auch den absehbaren Klimawandel, gleichzeitig verfügen insbesondere sie über die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Kapazitäten und das Innovationspotenzial, um die Voraussetzungen für die notwendigen globalen Veränderungen zu schaffen.

Vor diesem Hintergrund hat sich Deutschland mit dem Energiekonzept 2010/2011 einen Satz von energie- und klimapolitischen Zielen gegeben, die den Weg zur Dekarbonisierung der Volkswirtschaft und zur Umstellung auf ein energieeffizientes und im Wesentlichen auf erneuerbaren Energien beruhendes Energiesystem markieren. Die zugrundeliegenden mittel- und langfristigen klima- und energiepolitischen Ziele wurden auch von der derzeitigen Bundesregierung bestätigt[1]. Die Stromerzeugung spielt hier insbesondere am Anfang der Energiewende eine zentrale Rolle, für die Erreichung der umfassenden Klimaschutzziele wird es jedoch auch notwendig sein, andere Sektoren in die entsprechenden Anstrengungen einzubeziehen.

Viele für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen entscheidende Sektoren sind durch sehr langlebige Kapitalstöcke geprägt. Dies bedeutet, dass die energie- und klimapolitischen Langfristziele für wichtige Bereiche innerhalb nur eines Modernisierungszyklus umgesetzt werden müssen (oder andernfalls mit erheblichen Kosten verbunden sein können). Es sind umfangreiche Maßnahmen notwendig, die an erhebliche Vorlaufzeiten gebunden sind. Dazu gehören Infrastrukturentwicklung, aber auch Innovationsprozesse für viele Bereiche.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit hat in diesem Kontext das Konsortium aus Öko-Institut und Fraunhofer-ISI beauftragt, Szenarien mit verschiedenen klimapolitischen Ambitionsniveaus für den Zeithorizont bis 2050 zu erstellen und zu analysieren.

Zentrale Fragestellungen sind:

- Welche Emissionsminderung könnte erreicht werden, wenn die aktuelle Energie- und Klimapolitik fortgeschrieben wird?

[1] Deutschlands Zukunft gestalten – Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD (18. Legislaturperiode), S. 49 ff.

- Welche Maßnahmen und Strategien sind notwendig, um die Klimaziele zu erreichen?
- Welche Kosten/Nutzen-Relationen ergeben sich daraus für die Verbraucher und die Volkswirtschaft?
- Angesichts des gerade derzeit sehr dynamischen energiewirtschaftlichen und politischen Umfeldes sollen diese Szenarien über einen Zeitraum von drei Jahren jeweils jährlich aktualisiert werden.

In der ersten, abgeschlossenen Modellierungsrunde wurden drei Szenarien mit dem Zeithorizont 2050 erstellt. Kern und Grundlage der Szenarienentwicklung sowie der entsprechenden Analysen bildet dabei das System von Zielvorgaben für Deutschland, das mit dem Energiekonzept 2010/2011 auf die energie- und klimapolitische Agenda gesetzt worden ist. Mit dem Energiekonzept und der Ergänzung dieses Konzepts um den beschleunigten Ausstieg aus der Kernenergie ist für Deutschland ein umfassender Satz von energie- und klimapolitischen Zielen etabliert worden, der die kurz-, mittel- und langfristige Perspektive adressiert.

Tabelle Z-1: Zieldatensatz des Energiekonzepts 2010/2011 und Rahmenvorgaben für die Klimaschutzszenarien

	Treibhausgas-emissionen	Erneuerbare Energien		Minderung Energiebedarf				Steigerung Energie-produktivität
		Brutto-Endenergie	Strom-erzeugung	Primär-energie	Gebäude-Wärme	Endenergie Verkehr	Strom-verbrauch	
2020	-40%	18%	35%	-20%	-20%	-10%	-10%	2,1% p.a.
2030	-55%	30%	50%					
2040	-70%	45%	65%					
2050	-80% -[bis -95%]	60%	80%	-50%	-80%	-40%	-25%	
Basis	1990			2008	2008	2005	2008	2008

Quelle: BMU (2011)[2]

Die folgenden Szenarien wurden erstellt:

- Das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (AMS (2012)): In diesem Szenario werden alle Maßnahmen berücksichtigt, die bis Oktober 2012 ergriffen worden sind. Dieses Szenario bildet den Ist-Stand der energie- und klimapolitischen Rahmensetzungen ab. In diesem Szenario werden die Ziele des Energiekonzepts deutlich verfehlt.
- Das Klimaschutzszenario 80 (KS 80): In diesem Szenario sollten die im Energiekonzept der Bundesregierung festgelegten Ziele für Treibhausgasemissionen, erneuerbare Energien und Energieeffizienz möglichst

[2] BMU (2011): Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011. Berlin, Oktober 2011.

erreicht werden, wobei für das Treibhausgasziel der weniger ambitionierte Wert in Ansatz gebracht wird.

- Das Klimaschutzszenario 90 (KS 90): In diesem Szenario sollte bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 90 % gegenüber 1990 erreicht werden.

Gegenüber dem *Projektionsbericht der Bundesregierung 2013*[3] oder den *Politikszenarien für den Klimaschutz VI*[4] gibt es in dieser Studie wichtige methodische Unterschiede: Die beiden genannten Studien analysieren, mit welchen bereits umgesetzten und welchen geplanten Instrumenten welche Reduktionen von Treibhausgasemissionen erzielt werden können, es handelt sich also um eine maßnahmenorientierte Modellierung. Im Gegensatz dazu versucht das Klimaschutzszenario 2050 zu bestimmen, welche Sektoren welche Minderungsbeiträge erbringen müssen und welche Maßnahmen hierzu erforderlich sind, es handelt sich also um eine zielorientierte Modellierung. Ein weiterer Unterschied ist der Zeithorizont: Der Projektionsbericht und die Politikszenarien schauen bis zum Jahr 2030, Klimaschutzszenario 2050 hingegen – wie bereits in der Bezeichnung ersichtlich – bis zum Jahr 2050.

Eine vollständige und detaillierte Darstellung aller Ergebnisse und Szenarien sowie der vollständigen Beschreibung der verwendeten Methodik findet sich in der Langfassung der Studie. In der hier vorliegenden Zusammenfassung werden nur die wesentlichen Ergebnisse der beiden Klimaschutzszenarien (KS 80 und KS 90) präsentiert. Kapitel 2 gibt einen Überblick über die insgesamt erreichte Emissionsminderung. Kapitel 3 beschreibt die wesentlichen Entwicklungen in den einzelnen Sektoren. Kapitel 4 diskutiert die Entwicklung des gesamten Primär- und Endenergieverbrauchs. Im Anschluss folgen eine kurze ökonomische Analyse, eine Bewertung der Ziele des Energiekonzepts und ein Ausblick auf die Aktivitäten der zweiten Modellierungsrunde.

2 Gesamte Treibhausgasemissionen

Im Jahr 2010 wurde bereits eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 310 Mio. t CO_2-Äq. bzw. etwa 25 % gegenüber 1990 erreicht. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die Minderungen in den verschiedenen Sektoren bis 2050.

Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), also ohne eine Einführung weiterer Klimaschutzmaßnahmen, sind die Emissionsminderungen in den einzelnen Sektoren sehr unterschiedlich. Die Energiewirtschaft, die 1990 die größte Emissionsquelle war, leistet zwar mit einer Reduktion von 253 Mio. t CO_2-Äq. den absolut größten Minderungsbeitrag, was aber nur einer Reduktion von 59 % gegenüber 1990 entspricht. Die Emissionsminderungen der übrigen Sektoren sind sehr unterschiedlich und reichen von nur 19 % in der Landwirtschaft bis hin zu 88 % in der Abfallwirtschaft.

---

[3] Bundesregierung (2013): Projektionsbericht 2013 gemäß Entscheidung 280/2004/EG.

[4] Öko-Institut et al. (2013): Politikszenarien für den Klimaschutz VI – Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030; UBA Climate Change Nr. 04/2013.

Insgesamt werden im AMS (2012) Emissionsreduktionen von 56 % gegenüber 1990 erzielt, was deutlich weniger als das Klimaschutzziel der Bundesregierung in Höhe von 80 bis 95 % Treibhausgasminderung ist. Unter Berücksichtigung der deutlich steigenden Emissionen aus dem Deutschland zuzurechnenden internationalen Luft- und Schiffsverkehrs sowie den Treibhausgasemissionen und -senken aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF), werden allerdings nur noch Emissionsreduktionen von 50 % gegenüber 1990 erzielt.[5]

Im Klimaschutzszenario 80 können die meisten Sektoren bis 2050 ihre Emissionen gegenüber 1990 um 81 % bis 93 % reduzieren, wobei die stärksten relativen Reduktionen im Bereich der prozessbedingten Industrieemissionen (−93 %), der flüchtigen Emissionen des Energiesektors (−92 %) und im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) (−91 %) stattfinden. Eine Ausnahme bildet der Landwirtschaftssektor, dessen Emissionen nur um 25 % gegenüber 1990 zurückgehen.

Die größten absoluten Emissionsreduktionen muss die Energiewirtschaft (Kraft- und Heizwerke, Raffinerien und ähnliches) mit einer Reduktion um 367 Mio. t CO_2-Äq. gegenüber 1990 erbringen. Davon entfallen allein 326 Mio. t CO_2-Äq. auf die Kraftwerke der öffentlichen Stromversorgung[6]. Die zweitgrößten absoluten Reduktionen kommen aus der Industrie; die verbrennungs- und prozessbedingten Emissionen werden hier um zusammen 231 Mio. t CO_2-Äq. reduziert. Bedeutende absolute Reduktionsbeiträge kommen auch aus dem Verkehr, den privaten Haushalten, dem Verkehr und aus der Landwirtschaft.

In Summe wird so im KS 80 bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 82 % gegenüber 1990 erreicht. Unter Berücksichtigung des internationalen Luft- und Schiffsverkehrs sowie LULUCF werden Reduktionen um 79 % gegenüber 1990 erzielt.

[5] Im Rahmen des Kyoto-Protokolls werden in nationalen Treibhausgasemissionen und Emissionsreduktionszielen die Emissionen des internationalen Luft- und Schiffsverkehrs nicht berücksichtigt. LULUCF wird bisher nur teilweise angerechnet.

[6] Industriekraftwerke und Kraftwerke in Raffinerien und im übrigen Umwandlungssektor fallen nicht hierunter.

Tabelle Z-2: Emissionsreduktionen bis 2050

Sektor	1990	2050			Änderung ggü. 1990		
		AMS (2012)	KS 80	KS 90	AMS (2012)	KS 80	KS 90
	Mio. t CO2-Äq.				%		
Energiewirtschaft	428,1	175,1	61,2	4,7	-59%	-86%	-99%
Industrie	177,3	92,7	34,2	27,0	-48%	-81%	-85%
GHD	88,7	15,8	8,2	4,0	-82%	-91%	-95%
Haushalte	131,5	37,8	17,5	14,8	-71%	-87%	-89%
Verkehr (national)	164,7	89,0	24,7	24,0	-46%	-85%	-85%
Flüchtige Emissionen im Energiesektor	30,5	5,0	2,5	2,1	-84%	-92%	-93%
Industrieprozesse	94,5	56,8	7,0	3,5	-40%	-93%	-96%
Produktverwendung	4,5	2,1	2,1	2,1	-53%	-53%	-53%
Landwirtschaft	83,2	67,7	62,8	38,4	-19%	-25%	-54%
Abfallwirtschaft	43,1	5,1	4,2	3,9	-88%	-90%	-91%
Gesamt ohne int. Verkehr & LULUCF	**1.246,1**	**547,2**	**224,6**	**124,6**	**-56%**	**-82%**	**-90%**
Internationaler ziviler Luft- & Seeverkehr	20,1	50,3	20,7	20,5	150%	3%	2%
LULUCF	-27,7	22,4	8,7	-14,9	*keine sinnvolle Angabe möglich*		
Gesamt mit int. Verkehr & LULUCF	**1.238,6**	**619,8**	**254,0**	**130,1**	**-50%**	**-79%**	**-89%**

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Klimaschutzszenario 90 werden weitergehende Emissionsreduktionen erzielt. Dabei tragen einige Sektoren überdurchschnittlich zur Reduktion bei:

Die Energiewirtschaft wird nahezu vollständig treibhausgasneutral; die THG-Emissionen in diesem Bereich sinken um über 99 % gegenüber 1990. Im Bereich der Kraftwerke der öffentlichen Versorgung werden sogar Emissionsreduktionen von 99,7 % erzielt. Damit verbunden sinken auch die flüchtigen Emissionen des Energiesektors um 93 %.

Die Emissionen des GHD-Sektors und die prozessbedingten Industrieemissionen sinken um etwa 96 % und die Emissionen der Abfallwirtschaft um 91 %. Emissionen der privaten Haushalte hingegen sinken nur um 89 %, die energiebedingten Industrieemissionen um 85 % und die der Landwirtschaft um nur 54 %.

Die Landwirtschaft trägt im KS 90 mit einer zusätzlichen Reduktion um 24 Mio. t CO_2-Äq. gegenüber dem KS 80 am zweitstärksten zur weiteren Reduktion im KS 90 bei. Sie wird nur noch von der Energiewirtschaft übertroffen, der die THG-Emissionen im KS 90 gegenüber dem KS 80 um weitere 57 Mio. t CO_2-Äq. reduzieren kann.

Die Sektoren mit Reduktionen von deutlich mehr als 90 % kompensieren also mit ihren überdurchschnittlichen Emissionsreduktionen die Sektoren (insbesondere Landwirtschaft, aber beispielsweise auch Industrie und Verkehr), die nur unterdurchschnittliche Reduktionsbeiträge aufweisen, um insgesamt bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 90 % gegenüber 1990 zu erzielen.

Unter Berücksichtigung von internationalem Luft- und Schiffsverkehr sowie LULUCF wird eine Reduktion der THG-Emissionen um 89 % erzielt. Da der LULUCF-Sektor im KS 90 wieder zu einer Treibhausgassenke wird, kann so ein Teil der Emissionen des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs kompensiert werden, die auch im KS 90 im

Jahr 2050 nur etwa auf das Niveau von 1990 fallen.[7] Dies stellt jedoch eine deutliche Reduktion gegenüber dem Ist-Zustand dar (im Jahr 2010 lagen die Emissionen des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs etwa 68 % höher als im Jahr 1990).

Abbildung Z-1: Gesamte Treibhausgasemissionen (ohne LULUCF und internationalen Luft- und Seeverkehr)

Quelle: Eigene Berechnungen

3 Entwicklungen und wichtigste Maßnahmen in den einzelnen Sektoren

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick darüber, wie in den einzelnen Verbrauchssektoren, bei der Stromerzeugung und im Bereich der nicht-energetischen THG-Quellen die notwendigen Emissionsminderungen erreicht werden können. Es werden jeweils die Entwicklungen in den beiden Klimaschutzszenarien KS 80 und KS 90 gegenübergestellt.

Alle Sektoren müssen deutliche Beiträge leisten, um die im Energiekonzept verankerten Ziele zu erreichen. Die Analysen zeigen, dass insbesondere eine THG-Minderung von mehr als 80 % in einigen Bereichen erhebliche zusätzliche Anstrengungen erforderlich macht.

[7] Es ist anzumerken, dass die Reduktion der Emissionen des internationalen Flug – und Schiffsverkehrs nicht in nationaler Hand liegt sondern dahinter ein sehr anspruchsvolles internationales Regime stehen muss.

3.1 Stromverbrauch und -erzeugung

In beiden Klimaschutzszenarien sinkt zunächst die Höhe der Stromerzeugung bis 2030. Dies kommt einerseits durch die Effizienzsteigerung der klassischen Verbraucher, andererseits durch den Abbau des Stromexportüberschusses bis zum Jahr 2020 und einem anschließenden Ansteigen des Stromimportanteils auf bis zu 15 % in 2050. Bedingt durch den erhöhten Strombedarf neuer Verbraucher steigt die Stromerzeugung besonders im KS 90 ab 2040 wieder erheblich an.

Abbildung Z-2: Stromerzeugung und Stromimport, 2010-2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Erzeugungsstruktur unterliegt in beiden Szenarien bis 2050 einem grundlegenden Wandel. Der regenerative Anteil an der Stromerzeugung steigt dabei auf 88 % im KS 80 und sogar auf 96 % im KS 90.

Im Klimaschutzszenario 80 sind folgende Maßnahmen zu nennen:

- Durch einen wirksamen Emissionshandel (ETS) mit Vollauktionierung und Zertifikatspreisen von 130 €/EUA in 2050 sinkt der Anteil der Stromerzeugung aus fossilen Energien von 354 TWh auf 43 TWh.
- Der Ausstieg aus der Kernenergie wird bis 2022 wie gesetzlich verankert durchgeführt. Bestehende Braun- und Steinkohlekraftwerke gehen nach einer

Lebensdauer von 45 Jahren außer Betrieb.[8] Es werden im KS 80 keine neuen Kohlekraftwerke über die 9,6 GW hinaus benötigt, die sich bereits heute in Bau oder Planung befinden. Die Auslastung von Gas- und Kohlekraftwerken geht von etwa 4500 Vollaststunden (VLh) im Jahr 2010, auf etwa 3000 VLh im Jahr 2020 und etwa 2500 VLh im Jahr 2050 zurück. Die sinkende Auslastung führt zu steigenden Anforderungen an flexible Fahrweisen der Kraftwerke.

- Die erneuerbaren Energien werden stark ausgebaut: Wichtigste Energiequelle zur Stromerzeugung ist 2050 die Windenergie, deren Anteil von 37 TWh auf 259 TWh bei einer installierten Leistung von 63 GW steigt. Die Windkraftanlagen sind bereits ab dem Jahr 2030, wenn der Stromverbrauch wieder ansteigt, wichtigster Stromerzeuger. Die Photovoltaik wird mit einer Steigerung von 12 TWh auf 64 TWh bei einer Leistung von 67 GW zur zweitwichtigsten inländischen Stromquelle und überholt die Biomasse, deren Anteil von 28 TWh auf 48 TWh steigt. Der Anteil der sonstigen Stromerzeugung, darunter Wasserkraft und Geothermie, aber auch Müllverbrennung, sinkt leicht.
- War Deutschland im Jahr 2010 mit einem Saldo von17 TWh noch ein Stromexporteur, so werden 76 TWh im Jahr 2050 netto importiert. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass in jedem Jahrzehnt ein Seekabel zur Anbindung norwegischer Pumpspeicherkraftwerke installiert wird.

Verbunden mit dem deutlichen Rückgang der fossilen Stromerzeugung sinken die Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung gegenüber 1990 um 92 %. Da für den importierten Strom ein regenerativer Anteil von 94 % angenommen wird, kann davon ausgegangen werden, dass es durch die Stromimporte zu keinen nennenswerten Emissionsverlagerungen ins Ausland kommt.

Im Klimaschutzszenario 90 kommen folgende Maßnahmen verstärkt zum Tragen:

- Durch stärkeres Ansteigen der Zertifikatspreise auf 200 €/EUA im Jahr 2050 kommt es zu einem noch deutlicheren Rückgang der fossilen Stromerzeugung. Im Jahr 2050 wird nur noch etwas mehr als 1 TWh aus fossilen Energieträgern erzeugt.
- Gleichzeitig steigt durch einen stärkeren Ausbau von Wind und PV mit einer Leistung von 105 bzw. 120 GW die erneuerbare Stromerzeugung im Jahr 2050. Biomasse wird weniger stark zur Stromerzeugung genutzt. Die Stromproduktion aus sonstigen Energiequellen steigt leicht an.

Im KS 90 wird eine Strommenge von 74 TWh in 2050 importiert, damit etwa gleich viel wie im KS 80. Da quasi keine fossile Stromerzeugung mehr stattfindet, sinken die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung um über 99 % gegenüber 1990.

[8] Auch dem AMS (2012) ist die Beibehaltung des Ausstiegs aus der Kernenergie bis 2022 unterstellt. Die Annahmen zu den Lebensdauern von Kraftwerken sind in allen Szenarien identisch.

Bei der Betrachtung des Stromverbrauchs hat sich gezeigt, dass eine Unterscheidung von „klassischen Stromverbrauchern“ und „neuen Stromverbrauchern“ sinnvoll ist, da ansonsten Zielkonflikte zwischen dem Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien zur Reduktion des fossilen Brennstoffeinsatzes in vielen Sektoren und der Senkung des Stromverbrauchs insgesamt unvermeidlich sind.

Im Bereich der klassischen Stromverbraucher reduziert sich der Bruttostromverbrauch in beiden Klimaschutzszenarien durch deutliche Einsparungen um 29 % im KS 80 und 34 % im KS 90 im Jahr 2050 gegenüber 2010, die unter anderem durch Effizienzsteigerungen erreicht werden. Im AMS (2012) werden lediglich 9 % Einsparung erreicht.

Abbildung Z-3: Veränderung des Stromverbrauchs, 2010-2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Regenerativ erzeugter Strom, als treibhausgasarme Primärenergie, kann in Zukunft fossile Energieträger ersetzen. Es kommt zu deutlichen Steigerungen des Stromverbrauchs in neuen Stromanwendungen ab 2040:

- Elektrofahrzeuge ersetzen bisherige mit Benzin und Diesel angetriebene Fahrzeuge.
- Wärmepumpen dienen zur Bereitstellung von Wärme in Gebäuden und ersetzen so Heizöl und Erdgas.
- Über die Power-to-Gas-Technologie werden stromgenerierte Brennstoffe (vor allem Wasserstoff) für Verkehr und Industrie hergestellt (insbesondere im Klimaschutzszenario 90).
- Die CCS-Technologie wird in der Industrie eingesetzt, um das in industriellen Prozessen entstehende CO_2 abzuscheiden und zu lagern.

Diese neuen Technologien entsprechen in Summe im Jahr 2050 im KS 80 etwa 26 % des Bruttostromverbrauchs 2010 und im KS 90 sogar etwa 34 %. Im Saldo sinkt der gesamte Bruttostromverbrauch daher bis 2030 um 15 % (KS 80) bzw. 19 % (KS 90) gegenüber 2010 ab, steigt anschließend aber wieder bis 2050 und liegt dann nur noch 5 % (KS 80) bzw. 1 % (KS 90) unterhalb des Niveaus von 2010.

3.2 Sektor Wohn- und Gewerbegebäude

Im Jahr 2050 wird der Gebäudebestand zu einem Drittel aus Gebäuden bestehen, die es heute noch nicht gibt. Der Ersatz alter Gebäude durch neue Gebäude mit besserer Wärmedämmung führt zu Einsparungen von etwa 30 % der Energie, die heute noch für Raumwärme und Warmwasser benötigt wird, wobei sich zwischen den Szenarien leichte Unterschiede ergeben.

Die anderen zwei Drittel des Gebäudebestandes in 2050 existieren bereits und werden genutzt. Wie viel Energie in diesen Bestandsgebäuden eingespart wird, hängt davon ab, wie ambitioniert saniert wird und gleichzeitig welcher Anteil der Gebäude saniert wird. Durch eine sehr ambitionierte Sanierung eines Anteils des Gesamtbestands können gegebenenfalls die gleichen Einsparungen erzielt werden wie durch eine flächendeckende Sanierung auf niedrigerem Sanierungsniveau. Es kann also nur die Kombination einer hohen Sanierungsrate mit einer ambitionierten Sanierungstiefe zu besonders hohen Energieeinsparungen führen.

Diese umfassenden Energieeinsparungen werden benötigt, um die im Energiekonzept festgeschriebenen Ziele zu erreichen. Nach dem Konzept soll der Wärmebedarf von Gebäuden im Jahr 2020 nur 80% des Wärmebedarfs des Jahres 2008 betragen. Weiterhin ist der Primärenergiebedarf der Gebäude bis zum Jahr 2050 auf 20% zu reduzieren.

Der Endenergieverbrauch von Wohn- und Gewerbegebäuden geht im Klimaschutzszenario 80 im Zeitraum von 2008 bis 2050 von 2.939 PJ auf 1.240 PJ zurück. Dies entspricht einer Reduktion um etwa 58 %. Im Klimaschutzszenario 90 sinkt er um 1.856 PJ auf 1.083 PJ. Die Reduktion beträgt hier 63 %. Es zeigt sich ein grundlegender Wandel in der Energieträgerstruktur.

Abbildung Z-4: Veränderung des Endenergieverbrauchs von Wohn- und Gewerbegebäuden

Quelle: Eigene Berechnungen

Den adressierten Einsparungen steht trotz sinkender Bevölkerung ein steigender Bedarf an Wohn- und Nutzflächen gegenüber, da der Pro-Kopf-Flächenbedarf weiter zunimmt.

Im Klimaschutzszenario 80 wird daher von einer Erhöhung der energetischen Sanierungsrate auf 2 % pro Jahr ausgegangen, während im AMS (2012) mittlere Sanierungsraten von 1,2 % pro Jahr angenommen werden. Im Zeitraum zwischen 2010 und 2020 sind aufgrund des angenommenen Sanierungsstaus zunächst höhere Sanierungsraten zu erwarten als beispielsweise im Folgezeitraum zwischen 2020 und 2030.

Auch in Zukunft werden Dämmmaterialien, -systeme und -verfahren weiterentwickelt. Die damit einhergehenden Lerneffekte führen dazu, dass die Gebäude zum gleichen Preis besser energetisch saniert werden können. Dieser Effekt ist über Lernkurven im Modell berücksichtigt.

Um im Gebäudebereich einen Energieträgerwechsel zu forcieren, wird die im Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) festgelegte Nutzungspflicht für erneuerbare Energien auf Bestandsgebäude bei umfangreicher Modernisierung ausgeweitet. Zusätzlich wird die Nutzung von Nah- und Fernwärme – vor allem in Wohngebäuden – deutlich ausgeweitet. Die Fernwärme wird 2050 zu einem relevanten Anteil über Wärmepumpen und Solarthermie bereitgestellt.

Im Klimaschutzszenario 90 werden die im KS 80 adressierten Einsparungen weiter verschärft:

- Die mittlere energetische Sanierungsrate wird auf 3 % erhöht.

- Der Anteil von Wärmepumpen und Solarthermie an der Fernwärme steigt deutlich an.
- Zusätzlich zu den Einsparmaßnahmen im KS 80 wird im KS 90 als Suffizienzmaßnahme von einer Absenkung der Innentemperatur in Wohngebäuden von 20 °C auf 19 °C als ausgegangen.[9]

Im KS 80 kann der Endenergiebedarf bis zum Jahr 2020 um 20% reduziert werden. Das 80% Reduktionsziel bis zum Jahr 2050 wird für den nicht erneuerbaren Anteil des Primärenergiebedarfs[10] nach EnEV im KS 90 erreicht.

Tabelle Z-3: Primärenergiebedarf der Wohn- und Gewerbegebäude

Primärenergiebedarf	2008	2020	2050	Minderung 2020	Minderung 2050
	PJ				
Klimaschutzszenario 80					
Endenergiebedarf	2.939	2.361	1.240	20%	58%
Primärenergiebedarf	3.594	2.789	1.270	22%	65%
Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Anteil	3.266	2.206	764	32%	77%
Klimaschutzszenario 90					
Endenergiebedarf	2.939	2.283	1.083	22%	63%
Primärenergiebedarf	3.594	2.692	1.027	25%	71%
Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Anteil	3.266	2.133	549	35%	83%

Quelle: Eigene Berechnungen

3.3 Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistung – Geräte & Prozesse

Die THG-Emissionen des GHD-Sektors gehen im Klimaschutzszenario 80 im Zeitraum von 2010 bis 2050 von 44 auf 8 Mio. t CO_2-Äq. zurück. Dies entspricht einer Reduktion um 81 %. Im Klimaschutzszenario 90 sinken sie um 40 auf 4 Mio. t CO_2-Äq. Die Reduktion beträgt hier 91 %. Aber auch im AMS (2012) sinken bereits die Emissionen 28 auf 16 Mio. t CO_2-Äq., also um 64 %.

[9] Eine klimabedingte Verringerung der Gradzahltage ist im Szenario nicht berücksichtigt, so dass die Suffizienzmaßnahmen sich durch die ansteigende Außentemperatur teilweise relativieren. Allerdings müsste der umgekehrte Effekt im Bereich der Klimaanlagen berücksichtigt werden.

[10] Den Berechnungen liegen die Primärenergiefaktoren nach EnEV (DIN V 185999) zu Grunde. Ausnahme bilden Strom und Fernwärme. Hier wurden die sich aus den Szenarienrechnungen ergebenden Primärenergiefaktoren verwendet.

Abbildung Z-5: Veränderung des Endenergieverbrauchs sowie Reduktion der THG-Emissionen im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistung (einschließlich Gebäuden im GHD-Sektor)

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Klimaschutzszenario 80 fällt der Strombedarf von Geräten und Prozessen im GHD-Sektor bis 2050 um etwa 28 % (verglichen mit 2010). Dieser drastische Rückgang wird getrieben durch eine ambitionierte Umsetzung von Effizienzmaßnahmen, der schnellen Verbreitung hocheffizienter Geräte und einem veränderten Verhalten der Nutzer von Energiedienstleistungen.

Es werden ausschließlich Effizienzmaßnahmen umgesetzt, die wirtschaftlich realisierbar sind (Diskontierungsraten von 20 %). Allerdings wird davon ausgegangen, dass sämtliche über die reine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hinaus gehenden Hemmnisse zügig beseitigt werden. Die zeitliche Umsetzung der Effizienzmaßnahmen verteilt sich daher nicht gleichmäßig über den Zeitraum bis 2050, sondern findet verstärkt zwischen 2010 und 2030 statt.

Die umgesetzten Maßnahmen sind im Einzelnen:

- Die Beleuchtung trägt besonders zu den Stromeinsparungen bei. Hier sind bis 2030 hocheffiziente LED-Beleuchtungen und Licht- sowie bewegungsabhängige Steuerungen weitgehend verbreitet.
- Auch bei anderen Anwendungen werden die verfügbaren Einsparpotenziale weitestgehend ausgenutzt. Es zeigt sich ein erhebliches Einsparpotenzial.
- Die modellierten Änderungen bei der Nutzung von Energiedienstleistungen drücken sich z. B. durch eine langsamer steigende installierte Lichtleistung je

Gebäudefläche, eine langsamere Verbreitung von weiteren elektrischen Anwendungen, sowie von Kühlregalen in Supermärkten, IKT und Rechenzentren aus.

Das Klimaschutzszenario 90 zeigt bezüglich des Strombedarfs nur eine geringfügig niedrigere Entwicklung als das KS 80. Zwar sind die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit der Einsparmaßnahmen nochmals gesunken (Diskontierungsraten von 10 %), jedoch sind über die bereits im KS 80 sehr ambitionierten Einsparungen kaum weitere Potenziale vorhanden.

Lediglich beim Brennstoffbedarf zeigt sich ein anderes Bild. Hier ist bis 2050 der Großteil auf erneuerbare Energien umgestellt.

3.4 Sektor Industrie

Die energiebedingten THG-Emissionen des Industriesektors (inklusive Industriekraftwerken) gehen im Klimaschutzszenario 80 im Zeitraum von 2010 bis 2050 von 115 auf 34 Mio. t CO_2-Äq. zurück. Dies entspricht einer Reduktion um 70 %. Im Klimaschutzszenario 90 sinken sie um 88 auf 27 Mio. t. CO_2-Äq. Die Reduktion beträgt hier 77 %. Im AMS (2012) hingegen sinken diese Emissionen nur um 22 auf 93 Mio. t CO_2-Äq., also um 19 %.

Abbildung Z-6: Veränderung des Endenergieverbrauch sowie Reduktion der THG- Emissionen im Sektor Industrie

Quelle: Eigene Berechnungen

Das Klimaschutzszenario 80 zeigt bereits eine im Vergleich zum AMS (2012) deutlich ambitioniertere Dekarbonisierung. Diese spiegelt sich zum einen in einem über 500 PJ niedrigeren Endenergiebedarf im Jahr 2050 wieder (-20 % gegenüber. 2010) und zum

anderen in einem deutlich höheren Anteil von CO_2-armen Energieträgern. Auch der Strombedarf sinkt um 30 TWh (109 PJ) von 2010 bis 2050

Dies setzt eine umfangreiche Beseitigung vorhandener Hemmnisse voraus. Entsprechend wird unterstellt, dass 50 % der Unternehmen eine Amortisationszeit von sieben Jahren oder länger für Investitionen in Effizienzmaßnahmen akzeptieren.[11]

Hinter dieser Entwicklung stehen im Einzelnen folgende Vermeidungsoptionen:

- Schnelle Diffusion von Technologien zur Abwärmenutzung und Wärmepumpen im Bereich der Niedertemperaturwärme. Allerdings nur bei noch akzeptablen Amortisationszeiten (weniger als fünf Jahre).
- Umfangreiche Erschließung der Einsparpotenziale bei elektrischen Querschnittstechniken und Vorziehen einiger Maßnahmen, besonders auch im Hinblick auf Systemoptimierung.
- Verstärkte Erschließung der Einsparpotenziale bei industriellen Dampferzeugern und Dampfverteilnetzen.
- Die CO_2-Preise beschleunigen den Brennstoffwechsel in den am EU-Emissionshandel (EHS) teilnehmenden energieintensiven Branchen (z.B. Stahl, Papier, Zement). Für die nicht am EHS teilnehmenden Branchen (z.B. Maschinenbau, Fahrzeugbau, sonstige Chemie) wird davon ausgegangen, dass (monetäre) Anreize zum Brennstoffwechsel geschaffen werden, die ähnlich hoch wie die CO_2-Zertifikatspreise sind.

Der verstärkte Einsatz CO_2-armer Energieträger wird durch den Preis für Emissionszertifikate angereizt, der mit 130 €$_{(2010)}$/EUA in 2050 deutlich höher ist als im AMS (2012) mit 50 €$_{(2010)}$/EUA.

Für alle Potenziale gilt jedoch, dass der „natürliche“ Investitionszyklus größtenteils unbeeinflusst bleibt: Ein Austausch von Anlagen vor Ablauf ihrer technischen Lebensdauer findet nur in geringem Maße statt. Lediglich im Bereich der Querschnittstechniken werden einige Maßnahmen vorgezogen, um das 2020-Stromsparziel zu erreichen. Unwirtschaftliche Maßnahmen werden nicht umgesetzt.

Im Klimaschutzszenario 90 sinkt der Endenergiebedarf von 2010 bis 2050 um 34 %. Die vier zentralen Energieträger im Jahr 2050 sind Strom, Erdgas, Fernwärme, Erneuerbare Energien und Kohle. Letztere wird nur noch im Hochofen für die Herstellung von Oxygenstahl benötigt.

Sowohl Strombedarf als auch Brennstoffbedarf befinden sich 2050 auf einem sehr niedrigen Niveau, was eine konsequente Umsetzung von Effizienzmaßnahmen und Überwindung aller Hemmnisse verlangt. Dennoch werden nur Maßnahmen umgesetzt, die bei den gegebenen Rahmenbedingungen wirtschaftlich sind. Die Anforderungen

[11] Im AMS (2012) liegen die Amortisationszeiten bei knapp einem Jahr

der Unternehmen an die Wirtschaftlichkeit sind jedoch deutlich niedriger und so akzeptieren 50 % der Unternehmen sogar Amortisationszeiten von 11 Jahren oder länger. Diese verlangen zum einen eine vollständige Überwindung existierender Hemmnisse (z. B. über Energiemanagement, Kreditprogramme) und zum anderen finanzielle Anreize bei besonders langen Amortisationszeiten (Förderprogramme, Energiesteuern).

Während sich der Strombedarf im Vergleich zum KS 80 nicht deutlich ändert, liegt der Bedarf anderer Brennstoffe nochmal deutlich niedriger. Im Einzelnen werden über das KS 80 hinaus noch folgende weitere Potenziale erschlossen:

- Im Bereich Abwärmenutzung (inkl. Wärmepumpen) werden auch Maßnahmen umgesetzt, die eine deutlich längere Amortisationszeit haben, als üblicherweise von Unternehmen gefordert (deutlich über fünf Jahre).
- Bei Einsparoptionen im Bereich der Prozesse werden innovative Verfahren berücksichtigt, die sich bisher noch in der Entwicklung befinden, z.B. CO2-arme Zementherstellung, Endabmessungsnahes Stahlgießen, Sauerstoffverzehrkathoden bei der Chlorherstellung, innovative Papiertrocknungsverfahren, Magnetheizer der Aluminiumverarbeitung. Diese Verfahren sind zwar bereits heute bekannt, aber vorwiegend noch in der Forschung und nicht auf dem Markt verfügbar.
- Steigerungen der Materialeffizienz, die zu einem Rückgang (bis zu 5 %) der Produktion von energieintensiven Grundstoffen führt sowie eine Verschiebung hin zu Sekundärprozessen (Papier, Stahl, Aluminium, Kupfer) und Ersatzstoffen (Ersatz für Klinker bei der Zementherstellung).

Durch Umsetzung dieser Maßnahmen ist der Strom- und Brennstoffbedarf im Klimaschutzszenario 90 an der unteren Grenze angelangt, die mit heute bekannten (aber nicht unbedingt verfügbaren) Techniken erreichbar ist. Weitere substantielle Minderungen sind nur über radikale technologische Durchbrüche oder strukturelle Verschiebungen von energieintensiven hin zu weniger energieintensiven Produkten erreichbar. Bei den Treibhausgasemissionen sind weitere Minderungen über eine verstärkte Nutzung von Biomasse oder Strom (power-to-gas oder power-to-heat) möglich.

Prozessbedingte industrielle CO_2-Emissionen und Bedeutung von CCS

Im Industriesektor entstehen neben energiebedingten CO_2-Emissionen in vielen technischen Vorgängen auch Prozessemissionen, die prozessimmanent sind aufgrund der den technischen Vorgängen zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Prozesse. Für prozessbedingte Emissionen wird – anders als im AMS (2012) – in beiden Klimaschutzszenarien ab dem Jahr 2030 schrittweise die Abscheidung und Sequestrierung von CO_2 (CCS) eingeführt. Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2050 die Emissionen in den betroffenen Branchen vollständig abgeschieden werden. Dabei bleibt CCS im KS 80 auf die Sektoren beschränkt, in denen CO_2 in besonders hohen Konzentration anfällt. Im Gegensatz dazu kommt im KS 90 CCS auch in Sektoren mit niedrigeren absoluten Emissionen und mittlerer CO_2-Konzentration zum Einsatz.

Im Klimaschutzszenario 80 wird CCS nur in Industriebranchen mit hohen absoluten Prozessemissionen eingesetzt, sofern das CO_2 in erhöhter Konzentration (mindestens 20-30 % im Abgasstrom) anfällt. Konkret sind das die prozessbedingten Emissionen aus der Herstellung von Zementklinker, Kalkstein, Ammoniak, Methanol, Eisen und Stahl. Da bei der Zementklinker-, Kalkstein-, Eisen- und Stahlproduktion energie- und prozessbedingte Treibhausgasemissionen an der gleichen Stelle anfallen, werden bei diesen vier Branchen die gesamten Emissionen per CCS abgeschieden. Es wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2030 die Emissionen von 20 % der Anlagen abgeschieden werden und bis zum Jahr 2050 die Abscheidung bei 100 % der Anlagen stattfindet. Insgesamt werden so 62 Mio. t CO_2 im Jahr 2050 abgeschieden. Die Freisetzung der prozessbedingten Emission von CO_2 in die Atmosphäre wird bis 2050 um 91 % gesenkt.

Im Klimaschutzszenario 90 kommt CCS auch in Branchen mit niedrigeren absoluten Emissionen und mittlerer CO_2-Konzentration zum Einsatz. Da im KS 90 von höherer Materialeffizienz im Industriesektor (z. B. bei der Stahlproduktion) ausgegangen wird, sind die per CCS abgeschiedenen Mengen in Höhe von 57 Mio. t CO_2 industrieller Treibhausgase geringer. Insgesamt wird im KS 90 die prozessbedingte Emission von CO_2 in die Atmosphäre bis 2050 sogar um 96 % gesenkt. Auch in Biomasseumwandlungsanlagen fällt CO_2 in hoher Konzentration an. Bei einem Teil dieser Anlagen wird im Klimaschutzszenario 90 CCS eingeführt. Dies führt an dieser Stelle zu negativen Emissionen, da in die Atmosphäre freigesetztes biogenes CO_2 als treibhausgasneutral zu betrachten ist.[12] Insgesamt werden 8,5 Mio. t CO_2 im KS 90 von Biogas- und Bioethanolanlagen abgeschieden. Die gesamte per CCS abgeschiedene CO_2-Menge liegt im KS 90 damit bei etwa 66 Mio. t im Jahr 2050.

3.5 Sektor Verkehr

Die THG-Emissionen des Verkehrssektors (inkl. Internationalem Luft- und Seeverkehr) gehen im Klimaschutzszenario 80 im Zeitraum von 2010 bis 2050 von 184 auf 42 Mio. t CO_2-Äq. zurück. Im Klimaschutzszenario 90 sinken die Emissionen nur noch unwesentlich mehr. Im AMS (2012) hingegen sinken diese Emissionen nur auf 136 Mio. t CO_2-Äq.

[12] Allerdings verursacht der Anbau von Biomasse CH_4- und N_2O-Emissionen, die entsprechend im Landwirtschaftsektor zu berücksichtigen sind.

Abbildung Z-7: Veränderung des Endenergieverbrauch sowie Reduktion der THG- Emissionen im Verkehr (ohne internationalen Luft- und Schiffsverkehr)

Quelle: Eigene Berechnungen

Eine Reduktion der Treibhausgasemission im nationalen Verkehr um 85 % gegenüber 1990 wird vor allem durch eine Verminderung der Nutzung der fossilen Kraftstoffe Benzin und Diesel erreicht, unter Berücksichtigung des internationalen Luft- und Schiffsverkehrs werden in beiden Klimaschutzszenarien 77 % der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen eingespart. Im Vergleich dazu sinken die Treibhausgasemissionen des nationalen Verkehrs im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nur um 46 % gegenüber 1990 und unter Berücksichtigung des internationalen Verkehrs sogar nur um 24 %.

Ein wichtiger Treiber hin zu einer effizienteren Kraftstoffnutzung im Verkehr ist die Verteuerung des motorisierten individuellen Verkehrs. So werden im Klimaschutzszenario 80 die Energiesteuern erhöht. Die Mineralsteuer wird mit einem Fokus auf stärkerer CO_2-Besteuerung deutlich angehoben. Zusammen mit der Preisentwicklung für Rohöl führt dies bis 2050 zu einer Erhöhung der realen Endkundenpreise für Benzin um 90 % und für Diesel um 144 %. Die LKW-Maut wird auf LKW größer 3,5 t ausgeweitet und zukünftig alle fünf Jahre erhöht. Für den nationalen Flugverkehr wird eine Kerosinsteuer eingeführt. Gleichzeitig werden die Kraftstoffsteuererleichterungen zur Förderung des öffentlichen Verkehrs von heute 10 % auf 30 % im Jahr 2030 ausgeweitet sowie eine Stromsteuererleichterung von 50 % für den Schienenverkehr eingeführt. Im Klimaschutzszenario 90 wird von einer noch stärkeren Erhöhung der Kraftstoffsteuer nach 2030 ausgegangen.

Durch die Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Verkehrs und die gleichzeitig höheren Kosten für den motorisierten individuellen Verkehr ist der PKW-Besitz weniger

attraktiv. Die Motorisierungsraten im KS 80 und KS 90 sind demnach niedriger als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), das den Referenzfall darstellt, wenngleich auch im KS 80 und KS 90 noch ein leichter Anstieg gegenüber 2010 zu verzeichnen ist. Aufgrund des Bevölkerungsrückgangs geht jedoch der PKW-Bestand in absoluten Zahlen zurück. Durch die Erhöhung der LKW-Maut und der Stromsteuererleichterung des Schienenverkehrs kommt es zu einer deutlichen Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene.

Zusätzlich zur Verteuerung des motorisierten individuellen Verkehrs und des Straßengüterverkehrs wird ein Bündel verschiedener Effizienztechnologien, darunter Leichtbau, Hybridisierung, Rückgewinnung von Bremsenergie und Verbesserung der Aerodynamik im Straßengüterverkehr realisiert. In beiden Klimaschutzszenarien wird von den gleichen Effizienzverbesserungen ausgegangen. Sowohl bei PKW als auch bei LKW kommen zunehmend alternative Antriebe zum Einsatz. Aufgrund der Fortschritte und der Kostendegression in der Batterietechnologie wird davon ausgegangen, dass sich die Reichweiten von rein elektrischen Fahrzeugen und Plug-In-Hybridfahrzeugen (Fahrzeuge mit elektrischem und konventionellem Antrieb) bis 2050 deutlich erhöhen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass 15 % aller Neuzulassungen ab dem Jahr 2030 auf Gasfahrzeuge entfallen. Zusätzlich kommen im KS 90 ab dem Jahr 2040 Wasserstofffahrzeuge zum Einsatz. Für den Luftverkehr wird eine verstärkte Effizienzsteigerung von 1,5 % pro Jahr angenommen. Dies entspricht der Selbstverpflichtung der Luftfahrtindustrie zur Effizienzsteigerung.

Eine Substitution fossiler Kraftstoffe erfolgt durch eine Beimischung von Biokraftstoffen. Die Beimischungsquote wird nach 2020 erhöht und ab 2030 werden auch im Schiffsverkehr und im Luftverkehr Biokraftstoffe eingesetzt. Insgesamt beträgt die Beimischung in 2050 über alle Flüssigkraftstoffe 50%. Zudem kommt Biogas in den Pkw mit Gasantrieb zum Einsatz.

3.6 Landwirtschaft und LULUCF

Die THG-Emissionen des Landwirtschaftssektors gehen im Klimaschutzszenario 80 im Zeitraum von 2010 bis 2050 von 67 auf knapp 63 Mio. t zurück. Die entspricht einer Reduktion um 7 %. Im Klimaschutzszenario 90 sinken sie um 29 auf 38 Mio. t CO_2-Äq. Die Reduktion beträgt hier 43 %. Im AMS (2012) hingegen bleiben diese Emissionen konstant.

Abbildung Z-8: Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft

Quelle: Eigene Berechnungen

Die THG-Emissionen des KS 90 im Jahr 2050 bilden einen Sockel, der etwa einem Drittel der im KS 90 zulässigen Gesamtemissionen in Höhe von 125 Mio. t CO_2-Äq. entspricht. Andere Sektoren müssen diese vergleichsweise geringen relativen Emissionsreduktionen durch größere Emissionsreduktionen kompensieren.

Im Klimaschutzszenario 80 tragen folgende Stellschrauben zur Reduktion bei:

- Die Tierzahlen folgen der abnehmenden Entwicklung der letzten 20 Jahre bis 2030 und bleiben danach konstant. Die damit verbunden Emissionen aus der tierischen Verdauung reduzieren sich.
- Die Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden folgen ebenfalls den abnehmenden Trends der letzten Jahre. Die Reduktion der Tierzahlen hat auch hier entscheidenden Einfluss.
- Der Stickstoff-Mineraldüngereinsatz folgt bis 2040 dem Trend der letzten Jahre.

Das Klimaschutzszenario 90 berücksichtigt im Wesentlichen die gleichen Stellschrauben wie das KS 80 jedoch unter verschärften Bedingungen:

- Durch ein ausgeprägtes Ernährungsbewusstsein in der Bevölkerung gehen die Tierzahlen auch nach 2030 kontinuierlich weiter zurück. Ein sinkender Pro-Kopf-Fleischverbrauch führt bis 2050 zu einer um 30 % verringerten Rinder- und Schweineproduktion. Die Kleintierproduktion hingegen steigt um 18% bis 2050 gegenüber 2010.
- Den größten Einfluss auf die rückläufige Entwicklung der Emissionen (vor allem Lachgas) haben der Rückgang des Düngemitteleinsatzes und die deutliche Abnahme des organischen Bodenanteils bei der Acker- und Grünlandwirtschaft.

Durch Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) werden einerseits Treibhausgasemissionen freigesetzt, andererseits kommt es in diesem Bereich auch – insbesondere in den Wäldern – zur Einbindung von CO_2. Übertrifft die Einbindung von CO_2 die Freisetzung von Treibhausgasen, bekommt der LULUCF-Sektor insgesamt eine Senkenfunktion. Die größten LULUCF-Treibhausgasquellen in Deutschland sind das Ackerland und das Grünland auf organischen Böden.

Insgesamt verursachte der LULUCF-Sektor 2010 THG-Emissionen in Höhe von 17 Mio. t CO_2-Äq. Durch die beschriebenen Entwicklungen sinken die Emissionen im KS 80 auf 9 Mio. t CO_2-Äq. bis 2050. Im KS 90 hingegen bekommt der LULUCF-Sektor eine Senkenfunktion: es werden im Jahr 2050 etwa 15 Mio. t CO_2-Äq. gebunden. Im AMS (2012) hingegen steigen die LULUCF-Emissionen nur um 5 auf 22 Mio. t CO_2-Äq.

Abbildung Z-9: Treibhausgasemissionen und -einbindung im LULUCF-Sektor

Quelle: Eigene Berechnungen

In den Klimaschutzszenarien 80 und 90 wird davon ausgegangen, dass die Umwandlung in Siedlungsflächen von heute 90 ha/d auf 30 ha/d sinkt. In beiden Szenarien wird im Zeitraum 2015 bis 2020 der Abbau von Torfmoor vollständig eingestellt.

Zudem werden folgende Maßnahmen im Zeitraum 2015 bis 2030 der Modellierung zu Grunde gelegt, die sich für die beiden Szenarien lediglich in der Tiefe der Umsetzung der unterscheiden: Im KS 80 wird von einem Umsetzungsgrad von 30 %, im KS 90 hingegen von 90 % ausgegangen.

- Grünland auf organischen Böden (Moorböden) wird hauptsächlich in Feuchtgebiete (Wiedervernässung) und zu kleineren Teilen in Wald und Gehölze umgewandelt.

- Ackerland auf organischen Böden wird hauptsächlich in Feuchtgebiete und Wald und zu einem kleinen Teil in Gehölze umgewandelt. Andere Flächen auf organischen Böden werden nicht mehr in Acker- oder Grünland umgewandelt.
- Ein Umbruch von Grünland zu Ackerland wird unterbunden.

3.7 Sonstige nicht-energetische THG-Emissionen

Neben dem bereits in Kapitel 3.4 beschrieben Einsatz von CCS zur Reduktion der CO_2-Emissionen aus industriellen Prozessen, sind weitere Maßnahmen zur Reduktion der prozessbedingten CH_4- und N_2O-Emissionen erforderlich. Für diese wird in beiden Klimaschutzszenarien die Umsetzung identischer Maßnahmen angenommen: Mit der Einbeziehung der Adipin- und Salpetersäureproduktion in das EU-Emissionshandelssystem ab 2013 werden erhebliche wirtschaftliche Anreize zur Aufrüstung der entsprechenden Produktionsanlagen mit Einrichtungen zur N_2O-Emissionsminderung wirksam. Die prozessbedingten CH_4- und N_2O-Emissionen können so bis 2050 um 89 % gegenüber dem Jahr 2010 gesenkt werden, wobei hier die wesentlichen Emissionsreduktionen auch schon bis zum Jahr 2020 erfolgen.

Geringe Mengen an indirekten Kohlendioxidemissionen entstehen bei Lackierung, Reinigung, Lösemittelanwendungen und ähnlichen chemischen Prozessen. Ebenso werden geringe Mengen an Lachgas als Anästhetika sowie in anderen Prozessen eingesetzt bzw. entstehen aus dem Einsatz von Sprengstoffen. Da diese CO_2- und N_2O-Emissionen im Jahr 2010 aber nur 0,2 % der gesamten Treibhausgasemissionen ausmachten, wurden im Rahmen dieses Projekts diese Treibhausgasemissionen im Wesentlichen als konstant fortgeschrieben oder Projektionen aus anderen Projekten übernommen. In Summe ergibt sich für das Jahr 2050 aufgrund eines leicht ansteigenden Einsatzes von Lacken und Lösemitteln gegenüber 2010 eine geringfügige Steigerung der Emissionen, allerdings sind diese in beiden Klimaschutzszenarien immer noch um 53 % geringer als 1990. Dennoch beträgt der Anteil dieser Emissionen an den Gesamtemissionen 2050 weniger als 1 % (KS 80) bzw. 2 % (KS 90).

Um die Emission fluorierter Treibhausgase (teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe, HFKW; perfluorierte Kohlenwasserstoffe, FKW; Schwefelhexafluorid, SF_6) zu reduzieren, werden in den Klimaschutzszenarien – zusätzlich zu den bereits beschlossenen Maßnahmen – eine Reihe von Einzelmaßnahmen angenommen: Im KS 80 umfasst dies unter anderem Maßnahmen in den Bereichen Kühlung (Industrie- und Gewerbekälte, Kühlanlagen in Supermärkten, Haushaltskühlgeräte), Klimatisierung (Gebäudeklimatisierung, Raumklimageräte, Haushaltswärmepumpen, Fahrzeugklimaanlagen), Schaumprodukte und Substitution von SF_6 als Schutzgas in der Magnesiumproduktion. Im KS 90 wird zusätzlich auf SF_6 in elektrischen Schaltgeräten und -anlagen, beim Schutzgasschweißen und in Flugzeugradarsystemen verzichtet. Dadurch können die Emissionen an F-Gasen um 87 % (KS 80) bzw. 92 % gegenüber 2010 gesenkt werden.

Der Beitrag der Abfallwirtschaft zu weiteren absoluten Emissionseinsparungen ist als eher gering einzuschätzen. Allerdings wurde in diesem Sektor zwischen 1990 und 2010 bereits eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 72 % erzielt. Bis 2050

werden die THG-Emissionen In beiden Klimaschutzszenarien um über 90 % gegenüber 1990 sinken, was einer nochmaligen Minderung um über 65 % gegenüber 2010 entspricht. Aber auch schon im AMS (2012) sinken die Emissionen um 58 % gegenüber 2010. Dazu tragen unter anderem Nachsorge bei älteren Deponien mit verbesserter Deponiegaserfassung, ein verminderter Proteingehalt im Abwasser bedingt durch eine reduzierte Eiweißzufuhr pro Kopf und der Einsatz organischer Reststoffe zur bioenergetischen Verwendung bei.

4 Entwicklung des gesamten Primärenergie- und Endenergieverbrauchs

Die Maßnahmen in den Endverbrauchssektoren führen zu einem deutlichen Rückgang des Endenergieverbrauchs. Insgesamt sinkt dieser von 2010 bis 2050 im KS 80 um 39 % und im KS 90 um 44 %. Die geringste Minderung weist die Industrie (einschließlich Industriekraftwerken) mit einem Rückgang von 16 % (KS 80) bzw. 25 % (KS 90) auf. Der Endenergieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) geht um 52 % bzw. 60 % zurück. Die privaten Haushalte weisen Energieeinsparungen von 50 % bzw. 55 % auf. Beim Endenergiebedarf des Verkehrs zeigen sich unterschiedliche Entwicklungen: Während der nationale Verkehr Einsparungen von 39 % (KS 80) bzw. 44 % (KS 90) erzielt, steigt der Endenergiebedarf des internationalen Luft- und Seeverkehrs um 17 % im KS 80 und mit 16 % etwas geringer im KS 90.

Abbildung Z-10: Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in den Endverbrauchssektoren

Quelle: Eigene Berechnungen

Da neben Energieeinsparung in den genannten Sektoren auch ein Wechsel hin zu emissionsarmen oder -freien Energieträgern stattfindet, ist der Rückgang der Treibhausgasemissionen mit 77 % (KS 80) bzw. 80 % größer als die Einsparung an Endenergie. Ohne Berücksichtigung des internationalen Verkehrs, dessen Energiebedarf steigt, sinken die Emissionen der übrigen Endverbraucher um 80 % (KS 80) bzw. 83 % (KS 90).

Biomasse ist der vielseitigste erneuerbare Energieträger und wird nicht nur gegenwärtig, sondern auch in der langfristigen Perspektive in allen Sektoren eingesetzt (siehe Abbildung Z-11). Allerdings ist in den Klimaschutzszenarien zukünftig eine deutliche Verlagerung zwischen den Sektoren zu erkennen. Im Jahr 2010 entfiel der größte Teil des Biomasseeinsatzes auf die Strom- und Fernwärmerzeugung in öffentlichen und industriellen Kraft- und Heizwerken. Zweitwichtigster Einsatzbereich war die Wärmeerzeugung in privaten Haushalten, gefolgt von Biokraftstoffen im Verkehr. Auf die übrigen Sektoren entfielen eher geringe Anteile.

Da die Potenziale zur nachhaltigen Biomassenutzung begrenzt sind, wird der größte Teil der Nutzung in diejenigen Sektoren verschoben, in denen nur wenige andere Vermeidungsoptionen zur Verfügung stehen. Dies ist in erster Linie der Verkehrssektor und zu einem gewissen Anteil die Bereitstellung von Prozesswärme und KWK im Industriesektor. In diesen Bereichen nimmt die Nutzung von Biomasse in beiden Klimaschutzszenarien deutlich zu. Im Jahr 2050 wird etwa die Hälfte der Biomasse durch den Verkehr, entweder direkt in Form von Biokraftstoffen oder indirekt durch Umwandlungsverluste in Bioraffinerien zu Herstellung der Biokraftstoffe, benötigt. Den zweitwichtigsten Anteil hat die Industrie, entweder durch direkte Biomassefeuerungen in Wärmeerzeugern oder aber in Form von gekoppelter Strom- und Wärmebereistellung in industriellen Heizkraftwerken. Dahingegen sinkt der Biomasseeinsatz in Kraft- und Heizwerken der öffentlichen Versorgung. Während es durch Effizienzsteigerungen zu einem Rückgang des Biomassebedarfs der privaten Haushalte kommt, steigt der Bedarf bei Gewerbe, Handel und Dienstleistungen an.

Das für diese Modellierungsrunde zur Verfügung stehende Potential von 2.100 PJ an Biomasse wird im KS 80 leicht überzogen, aber im KS 90 dagegen eingehalten. Allerdings wird für die zweite Modellierungsrunde von einem deutlich niedrigeren Biomassepotenzial ausgegangen, was für alle Sektoren eine Verschärfung der Anforderungen an die Biomassenutzung bedeutet.

Abbildung Z-11: Energetische Nutzung von Biomasse im Vergleich

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Primärenergieverbrauch sinkt im Klimaschutzszenario 80 bis zum Jahr 2050 um 49 % gegenüber 2008. Den größten Minderungsbeitrag liefert dabei die Reduktion der fossilen Energieträger um 78 %. Trotzdem stellen fossile Energieträger mit einem Anteil von 34 % auch im Jahr 2050 noch den größten Anteil am Primärenergiemix. Knapp dahinter liegt die Biomasse mit einem Anteil von 32 %. Auf die Windenergie entfallen 14 % und auf die Solarenergie 7 % des Primärenergieverbrauchs. Die sonstigen Energieträger (darunter Wasserkraft, Geothermie und Müll) decken 13 % des Primärenergieverbrauchs.

Durch die weitergehenden Maßnahmen kommt es im Klimaschutzszenario 90 sowohl zu einer stärkeren Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 55 % gegenüber 2008 als auch zu einer Verschiebung zwischen den Energieträgern: Wichtigster Primärenergieträger wird die Biomasse mit einem Anteil von 31 %, gefolgt von den fossilen Energieträgern, die aufgrund ihrer Einsparung um 86 % gegenüber 2008 nur noch einen Anteil von 23 % haben. Deutlich höhere Anteile haben ebenfalls die Windenergie mit 19 % und die Solarenergie mit 12 %, wohingegen der Anteil der übrigen Energieträger mit 14 % im KS 90 nur geringfügig höher als im KS 80 liegt.

Abbildung Z-12: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der gesamten energiebedingten Treibhausgasemissionen

Quelle: Eigene Berechnungen

5 Ökonomische Analyse

Für die ökonomische Analyse wurden Informationen über die Veränderungen in Investitionen, Betriebsausgaben (Strom-, Energieausgaben), Importe und staatliche Förderausgaben aus den sektoralen Modellen (Industrie, Gebäude, Verkehr, etc.) zusammengeführt.

Zentrale Impulse für die gesamtwirtschaftliche Betrachtung sind:

- Investitionsimpuls [zwischen 21 und 62 Milliarden Euro jährlich gegenüber dem AMS (2012)].
- Strompreisimpuls (leicht steigende Preise in KS 80, sinkende Preise in KS 90).
- Energieausgaben (Preis × Menge für Strom, Wärme, Verkehr), teils moderat steigend, meist stark sinkend [sektoral bis zu 45 % sinkend gegenüber AMS (2012)].
- Importänderungen (verringerte Energieimporte, erhöhte Biomasseimporte und Importe von Vorleistungen für Investitionsgüter).
- Staatliche Förderausgaben (F&E, direkte Zuschüsse, Kreditverbilligungen).

Diese Impulse ziehen Veränderungen im Investitions- und Konsumverhalten, der Handelsbilanz sowie bei den energiebezogenen und staatlichen Ausgaben nach sich. Die Impulse induzieren Veränderungen der gesamtwirtschaftlichen Bestandsgrößen (wie

z.B. der Kapitalstock oder die Gesamtfaktorproduktivität) und verändern damit auch die langfristigen Pfade der ökonomischen Entwicklung, die sich in die Zukunft fortsetzen können. Somit sind nicht nur die primären Veränderungen der Impulse (direkte Effekte) erfasst, sondern auch noch die daraus resultierenden Zweitrundeneffekte (indirekte Effekte) berücksichtigt worden. Eine Gegenfinanzierung zusätzlicher Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen gewährleistet wird, sei es durch Einsparungen in den Energieausgaben, durch staatliche Fördermaßnahmen oder durch Weitergabe in den Produktpreisen. Bei einigen wenigen Konsumveränderungen wurden Präferenzverschiebungen angenommen z.B. geringerer Fleischkonsum.

Die daraus bis 2050 resultierenden gesamtwirtschaftlichen Effekte sind qualitativ in der folgenden Tabelle Z-4 zusammengefasst.

Tabelle Z-4: Qualitative Zusammenfassung der gesamtwirtschaftlichen Effekte bis 2050

(Gesamt-)wirtschaftliche Größen	**KS 80 gegen AMS (2012)**	**KS 90 gegen AMS (2012)**
Investition	↗	↑
Strompreis	↗	↘
Energieausgaben	→	↘
Bruttoinlandsprodukt	→	↗
Beschäftigung	→	→

Quelle: Eigene Darstellung.
Gelbe Pfeile = aus ökonomischer Sicht negativ,
grüne Pfeile = aus ökonomischer Sicht positiv,
rote Pfeile (treten nicht auf) = aus ökonomischer Sicht untragbar.
Richtung der Pfeile gibt Veränderung der gesamtwirtschaftlichen Größen gegenüber dem AMS (2012) für das Jahr 2050 an.

Die Investitionen für energetische Maßnahmen im Gebäudesektor im Rahmen von Sanierungen, Heizsystemwechseln und Installation von Solaranlagen betragen im Mittel jährlich 23 Milliarden Euro im AMS (2012) und 40 bis 45 Milliarden Euro im KS 90 Szenario. Ausschlaggebend für energetische Sanierungen ist der verfügbare und günstigste technische Standard. Gerade einmal 35% der Sanierungen gehen im gesamten Simulationszeitraum über die Minimalanforderungen hinaus. Unter ihnen befinden sich auch besonders ambitionierte Lösungen die insgesamt etwa 10 Prozent der Sanierungen ausmachen.

Die Implementierung der Klimaschutzmaßnahmen bewirkt ein stärkeres Wachstum des Bruttoinlandproduktes im Zeitverlauf, als im AMS (2012) angenommen wurde. Dieses

liegt nach 2030 im KS 90 sogar höher als im KS 80. Allerdings kommt das zusätzliche Wachstum auf unterschiedlichen Wegen zustande: die sektorale Entwicklung unterscheidet sich zwischen KS 80 sowie KS 90 deutlich, insbesondere durch die unterschiedliche Entwicklung des Strompreises. Dieser steigt im KS 80 bis zum Jahre 2050 und dämpft damit strom- und energieintensivere Sektoren, während er im KS 90 nach 2030 sinkt. Dies hat Auswirkungen auf die Beschäftigung, welche von der sektoralen Wertschöpfungsentwicklung sowie der Produktivitätsentwicklung abhängt. Damit ist die Gesamtbeschäftigung in KS 90 durchweg positiver als im AMS (2012), während dies für das KS 80 nicht uneingeschränkt gilt und in 2050 eine leichte Verringerung der Beschäftigung gegenüber dem AMS (2012) festgestellt wird.

Weitere wichtige Gründe für die unterschiedlichen Entwicklungen in den beiden Klimaschutzszenarien sind zum einen die zusätzlich benötigten Investitionen im KS 90, die kumuliert um 50,7% höher als im KS 80 sind und damit größere Akzelerator- und Multiplikatoreffekte entfalten. Außerdem haben sie einen positiveren Einfluss auf den Produktivitätsfortschritt. Zum anderen sind die Einsparungen bei den Energieausgaben höher und ermöglichen damit zusätzlichen Konsum in anderen Sektoren. Hinzu kommt noch der unterschiedliche Verlauf der Strompreise in den drei Szenarien, welcher einen Effekt auf die Preisweitergabe über Vorleistungen an die belieferten Sektoren sowie auf die Preise von Endprodukten an die Verbraucher hat.

Auf den Staatshaushalt haben die Veränderungen zum Teil gegenläufige Wirkungen: durch den höheren Konsum werden höhere indirekte Steuereinnahmen generiert, während die Fördermaßnahmen die Staatsausgaben erhöhen. Die ambitionierteren Maßnahmen im KS 90 werden punktuell erheblich teurer als in im KS 80. Außenhandelswirkungen sind insofern betrachtet, als dass die Differenzimporte für Energieträger (z.B. entwickelt Deutschland sich vom Stromex- zum –importeur) und die Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen erfasst sind (ein Teil der notwendigen Investitionen wird aus dem Ausland importiert). Der Einfluss der Energieausgaben auf die Ex- und Importgüter und etwaige Lead-Market-Effekte wurden nicht weiter berücksichtigt. In Sensitivitätsrechnung wurden die beiden wichtigsten Impulse, Investitionen und Konsumverschiebung, untersucht. Fällt einer der beiden Impulse aus, bleiben die Szenarien immer noch positiv. Allerdings wirkte sich die Veränderung im Konsum gesamtwirtschaftlich stärker positiv aus als der Investitionsimpuls.

Die ökonomische Analyse zeigt, dass die beschriebene Strategie aus Effizienzpolitik plus erneuerbarem Strom (nahe 100%) plus Produktinnovation eine no-regret Strategie darstellt, die sich für Deutschland langfristig auszahlen würde.

6 Einordnung der Ergebnisse hinsichtlich der Energiekonzeptsziele

Die im Energiekonzept definierten Ziele erstrecken sich auf drei Bereiche: Die Reduktion von Treibhausgasemissionen, den Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien sowie die Minderung des Energiebedarfs. Aufgabe im Rahmen des hier vorgestellten Projekts war, zwei Klimaschutzszenarien zu entwickeln, in denen alle diese Ziele bzw. das ambitionierte THG-Ziel erreicht werden.

6.1 Klimaschutz: Ambitionierte Zwischenziele sind wichtig

Abbildung Z-13 zeigt den zeitlichen Verlauf der Restemissionen gemäß den Zielen des Energiekonzepts sowie in den entwickelten Klimaschutzszenarien. Im Energiekonzept ist eine lineare Reduktion der Emissionen um 80-95% bis zum Jahr 2050 vorgesehen – allerdings verlaufen diese beiden Zielpfade bis zum Jahr 2040 identisch. Somit wäre, wenn die Emissionsminderungen bis 2050 den Mindestwert von 80% übersteigen sollen, in der letzten Dekade eine besonders große Anstrengung erforderlich. Die Analysen zeigen, dass gerade in diesem Zeitraum der Aufwand für die Vermeidung der Restemissionen, die nach einer Minderung um 70 % bis 80 % verbleiben, besonders groß ist. Um für diese Periode Spielraum zu schaffen bzw. überhaupt in der Lage zu sein, diese Herausforderung zu bewältigen, ist es dringend notwendig, bereits in den Dekaden davor einem strikteren Zielpfad zu folgen und, wenn möglich, Maßnahmen möglichst zügig umzusetzen. Daher werden in den beiden hier entwickelten Szenarien in den Jahren 2020 bis 2040 die Emissionsminderungsziele des Energiekonzepts sogar übererfüllt. Im Jahr 2050 wird dann eine dem Energiekonzept entsprechende Emissionsminderung um 80 % bzw. 90% erreicht.[13]

Ambitionierte kurz- und mittelfristige Zwischenziele sind von elementarer Bedeutung für langfristigen Klimaschutz. Die Szenarienanalyse zeigt, dass die bisher definierten Ziele für 2020 bis 2040 eher Mindestziele darstellen, deren Verschärfung angesichts der langfristigen Zielstellung sinnvoll wäre. Dies gilt nicht nur für die Minderung der Treibhausgasemissionen – auch für die Minderung des Energiebedarfs wird empfohlen, Zwischenziele für die Jahre 2030 und 2040 einzuführen.

[13] In der folgenden Modellierungsrunde des Projekts sollen zusätzliche Maßnahmen identifiziert werden, mit welchen eine noch weiter gehende Reduktion um 95% erreicht werden kann.

Abbildung Z-13: Dynamik der Emissionsreduktion

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Ziele des Energiekonzepts zum Ausbau erneuerbarer Energien und zur Minderung des Energiebedarfs können in den dargestellten Szenarien zum überwiegenden Teil erfüllt werden – in einigen Bereichen ist sogar eine Übererfüllung erforderlich. Das überrascht nicht, denn die in den vorangehenden Abschnitten präsentierten Ergebnisse zeigen, dass die ambitionierten Reduktionen der Treibhausgasemissionen nur umgesetzt werden können, wenn ein konsequenter Ausbau erneuerbarer Energienutzung stattfindet und Effizienzpotenziale in allen Sektoren erschlossen werden. Ein Erreichen der Klimaschutzziele ohne Einhalten der anderen Ziele des Energiekonzepts ist somit schwer vorstellbar. Klar definierte sektorale Ziele für den Ausbau der Erneuerbaren Energien und Effizienz sind also unbedingt erforderlich, um effektiven Klimaschutz betreiben zu können. Das Zielsystem des Energiekonzepts sollte beibehalten werden, und die Bundesregierung sollte sich auch auf europäischer Ebene für eine „Zieltrias“ mit bindenden Zielen nicht nur beim Klimaschutz, sondern auch für den Ausbau Erneuerbarer Energien und für Effizienzsteigerung einsetzen.

Allgemein ist festzuhalten, dass die Ziele zum Ausbau erneuerbarer Energien und zur Verbrauchsminderung beibehalten werden müssen, wenn eine Emissionsminderung um 80 % erreicht werden soll. Wenn 90 % oder mehr Emissionsminderung erreicht werden soll, sind in der Tendenz sogar noch weitergehende Ziele erforderlich. Darüber hinaus sollten einige der Ziele inhaltlich überarbeitet werden.

6.2 Stromverbrauch: Neue Stromverbraucher bei Einsparziel berücksichtigen

Das Energiekonzept sieht eine Minderung des Stromverbrauchs um 25 % bis zum Jahr 2050 vor. Regenerativer Strom kann fossile Energieträger in den Endverbrauchssektoren ersetzen. Tatsächlich wird dieses Ziel – bezogen auf die „klassischen“ Verbraucher, definiert als diejenigen Bereiche von Stromverbrauchern, die bereits heute existieren – in den Klimaschutzszenarien erfüllt. Gleichzeitig jedoch steigt die Stromnachfrage in anderen Bereichen deutlich an, weil regenerativ erzeugter Strom fossile Energieträger in verschiedenen Endverbrauchssektoren ersetzt. Die wichtigsten dieser „neuen“ Stromverbraucher sind Elektromobilität, Wärmepumpen für die Bereitstellung von Heizwärme im Gebäudesektor sowie die Herstellung von Methan und Wasserstoff (Power-to-Gas). In der Summe führen beide Effekte sogar zu einem leichten Anstieg des Stromverbrauchs. Das Erschließen neuer Einsatzbereiche für erneuerbar erzeugten Strom stellt eine wichtige Option zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen dar und sollte im Energiekonzept angemessen berücksichtigt werden. Daher wird empfohlen, die genannten neuen Verbraucher bei der Bewertung hinsichtlich der Stromverbrauchsziele auszunehmen.

6.3 Gebäudesektor: Zielpfad zum „klimaneutralen Gebäudebestand“ definieren

Die Bundesregierung bekennt sich laut Koalitionsvertrag zu dem Ziel, bis zum Jahr 2050 einen „nahezu klimaneutralen Gebäudebestand“ zu erreichen. Laut Energiekonzept bedeutet dies, dass der Primärenergiebedarf um 80 % gesenkt werden soll. Weiterhin ist der verbleibende Energiebedarf „überwiegend durch erneuerbare Energien“ zu decken.

In der aktuellen Diskussion und durch Auswertung von Szenarioergebnissen klären sich die Unsicherheiten in Bezug auf die im Energiekonzept genannte Zielgröße Primärenergiebedarf nach und nach auf. Die Szenarien zeigen, dass eine 80%ige Reduktion nur dann erreicht werden kann, wenn die Beiträge von Effizienzmaßnahmen und von erneuerbarer Energieträgersubstitution einbezogen werden.

Die Maßnahmen finden, wie folgt Eingang, in die Rechengrößen. Effizienzmaßnahmen mindern zunächst den zu deckenden Endenergiebedarf[14] (Raumwärme und Warmwasser). Der Effekt erneuerbarer Energieträgersubstitution besteht darin, dass der betroffene Teil des zu deckenden Heizenergiebedarfs klimaneutral bereit gestellt wird. Dieser Effekt zeigt sich rechnerisch durch die Anwendung der nicht-erneuerbaren Primärenergiefaktoren.

[14] Energie, die dem Heizsystem zugeführt werden muss, um die Bedarfe für Heizwärme und für Warmwasserbereitung decken zu können. Darin sind enthalten: Verluste bei Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Übergabe der Wärme. Diese Definition findet sich wieder in der Definition des Jahres-Heizenergiebedarfes der Norm 4108-6 : 2003-06 Abschnitt 5.4 S.12 und Abschnitt 3.1.15 der DIN EN 832. In der DIN V 4701-10:2003-08 S.11 werden der Heizenergiebedarf und der Trinkwasser-Endenergiebedarf separat definiert.

Im Hinblick auf die Klimaneutralität bietet sich als Zielgröße der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf an. Dieser Ansatz entspricht der Logik der Berechnung nach EnEV 2009 / 2013.

Zu beachten ist, dass durch die Anwendung der Primärenergiefaktoren, die Maßnahmen in Gebäuden mit denen im Umwandlungssektor vermischt werden. So ist die Zielerreichung etwa vom Strommix stark abhängig. Das betrifft grundsätzlich alle Umwandlungsprozesse aber vor allem die durch relativ hohe Verluste gekennzeichneten Prozesse für Strom und Fernwärme. Um Transparenz zu erhalten, empfiehlt sich neben der separaten Bilanz für Strom auch eine Fernwärmebilanz, die neben dem Anteil Erneuerbarer auch die einzelnen Energieträger ausweist.

Die Ergebnisse der Szenariorechnungen unterstreichen die Forderung nach einem klimaneutralen Gebäudebestands als Beitrag zum CO_2-Reduktionsziel für Deutschland. Die Szenarien zeigen jedoch ebenfalls, dass es enormer Anstrengungen bedarf das vorliegende Einsparpotential zu heben. Die energetischen Mehrinvestitionen für Maßnahmen in Gebäuden erreichen im jährlichen Durchschnitt ein Niveau von 20 Milliarden Euro im AMS (2012) bis zu 40 Milliarden Euro im KS 90.

6.4 Vollständige Dekarbonisierung des Stromsektors erfordert höheren Beitrag der erneuerbaren Stromerzeugung als bisher anvisiert

Eine nahezu vollständige Dekarbonisierung des Stromsektors ist unverzichtbar, wenn ambitionierte Klimaschutzziele erreicht werden sollen. Dementsprechend steigt in beiden Klimaschutzszenarien der Anteil der Erneuerbaren Energien an der inländischen Stromerzeugung auf nahezu 100 %. Im Energiekonzept ist ein Ziel für den regenerativen Anteil am inländischen Bruttostromverbrauch definiert. Dieser Anteil soll bis 2050 auf 80 % steigen. In den hier vorgestellten Szenarien werden die Klimaschutzziele trotzdem erreicht, da bis zu 15 % des Stromverbrauchs über Importe aus den benachbarten Staaten gedeckt werden. Das Ausbauziel würde aber auch eingehalten werden, wenn stattdessen 20 % des inländischen Bruttostromverbrauchs durch heimische Braunkohlekraftwerke gedeckt würden – mit fatalen Folgen für die THG-Bilanz.

In den Klimaschutzszenarien wird diese Entwicklung durch einen hohen CO_2-Preis im europäischen Emissionshandelssystem vermieden. Für eine Überarbeitung des Energiekonzepts wird empfohlen, durch zusätzliche oder erweiterte Zielformulierungen sicherzustellen, dass fossile Kraftwerke langfristig vollständig aus dem Stromsektor verdrängt werden. Dies könnte beispielsweise durch ein sektorspezifisches Emissionsminderungsziel für die Stromerzeugung oder ein Ziel von 100 % für den Anteil erneuerbarer Energien an der inländischen Stromerzeugung erreicht werden.

7 Übersicht: Die wichtigsten Maßnahmen für eine Emissionsminderung von 80 % bis 90 % bis 2050

Abbildung Z-14 zeigt, wann wesentliche Maßnahmen auf den Weg gebracht werden müssen, um bis zum Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um 80 bzw. 90 % zu mindern.

Von zentraler Bedeutung ist die sektorübergreifende Steigerung der Effizienz beim Einsatz von Energie. Ohne eine deutliche Minderung des Energiebedarfs können ambitionierte Klimaschutzziele nicht erreicht werden. Hier können in allen Sektoren wesentliche Beiträge geleistet werden.

Im Stromsektor, der mittel- bis langfristig durch die zunehmende Elektrifizierung deutlich an Bedeutung gewinnt, wird bis 2022 der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie vollzogen. Parallel dazu, und auch über den darauf folgenden Zeitraum hinweg, muss ein konsequenter Ausbau der erneuerbaren Erzeugungskapazitäten stattfinden – insbesondere im Bereich der Windenergie und der Photovoltaik. Die Nutzung der Windenergie kann sich hierbei nicht auf Offshore- und küstennahe Standorte beschränken. Auch im Binnenland müssen zahlreiche Standorte erschlossen werden. Gleichzeitig müssen die Emissionen im verbleibenden fossilen Kraftwerkspark konsequent gesenkt werden. Hierfür ist ein wirksames Emissionshandelssystem erforderlich – es müssen also auf europäischer Ebene zügig Maßnahmen ergriffen werden, um den CO_2-Preis im ETS auf einem hohen Niveau zu stabilisieren.

Im Verkehrssektor können in den kommenden zehn bis 15 Jahren deutliche Emissionsminderungen durch Vermeidung und Verlagerung erzielt werden. Beispiele sind die Verlagerung von Gütertransporten auf die Schiene und eine Stärkung der Rolle des öffentlichen Nahverkehrs. Ein flächendeckender Einsatz von Elektromobilität ist nicht vor 2030 zu erwarten; Maßnahmen zum Aufbau der erforderlichen Infrastruktur und Innovationsförderung im Bereich von Schlüsseltechnologien (z. B. Batterien) müssen jedoch mit deutlichem Vorlauf ergriffen werden. Ab 2040 wird im KS 90 zusätzlich auch Wasserstoff als Energieträger eine stärkere Rolle im Verkehrssektor spielen.

Für industrielle Verbraucher wird -- zusätzlich zu den kurz- bis mittelfristigen Effizienzsteigerungen – ab 2030 eine deutliche Steigerung der Materialeffizienz im KS 90 zu verzeichnen sein. Ab 2030 spielt bei der Vermeidung von Prozessemissionen in beiden Klimaschutzszenarien auch die Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff (CCS) eine wichtige Rolle. Wasserstoff als Energieträger gewinnt ab 2040 an Bedeutung.

Im Gebäudesektor wird die energetische Sanierung des Gebäudebestands eine wichtige Rolle spielen. Für eine Emissionsreduktion um 80 % bis zum Jahr 2050 ist eine durchschnittliche jährliche Sanierungsrate von 2 % erforderlich, im KS 90 sogar von 3 %. Zusätzlich sollten die Regelungen für den verpflichtenden Einsatz von erneuerbaren Energien in Gebäuden verschärft und ausgeweitet werden. Eine deutliche Reduktion des Energiebedarfs kann darüber hinaus durch eine Absenkung der durchschnittlichen Raumtemperatur erzielt werden.

Im land- und forstwirtschaftlichen Bereich können durch Maßnahmen wie den verminderten Einsatz von Düngemitteln, die Reduktion der Tierzahlen und die Vernässung von Mooren über den gesamten Zeitraum hinweg Emissionen vermieden werden.

Insgesamt wird deutlich, dass in allen Sektoren erhebliche Beiträge geleistet werden müssen und können.

Abbildung Z-14: Erforderliche Maßnahmen für eine 80-90-prozentige Reduktion der Treibhausgasemissionen

Quelle: Eigene Berechnungen

8 Ausblick auf die zweite Modellierungsrunde

Die gesamte Laufzeit des hier vorgestellten Projekts beträgt drei Jahre. Innerhalb dieses Zeitraums werden die entwickelten Klimaschutzszenarien jährlich aktualisiert. Seit Anfang des Jahres 2014 laufen die Arbeiten für die zweite Modellierungsrunde. Hierfür ist eine Reihe von Anpassungen vorgesehen.

Ein wesentlicher inhaltlicher Schwerpunkt liegt in der Verschärfung des THG-Minderungszieles für das Jahr 2050 von 90% auf 95%. Damit sollen analysiert werden, wie die Maximalforderungen des Energiekonzepts umgesetzt werden können. Es ist abzusehen, dass dieser zusätzliche Vermeidungsschritt für die meisten Sektoren eine anspruchsvolle Aufgabe darstellt.

Zusätzlich soll die Größenordnung des zur Verfügung stehenden Potenzials zur Nutzung von Biomasse überprüft werden. Es soll untersucht werden, inwiefern eine Beschränkung der Biomassenutzung auf inländische Quellen durchführbar ist. Diese Einschränkung resultiert (gegenüber den Szenarien in der ersten Modellierungsrunde) nahezu in einer Halbierung des verfügbaren Biomassepotenzials. Ebenso sollen die Rahmenbedingungen für die Einführung von CCS im Bereich der industriellen Prozessemissionen überprüft werden.

Parallel zu den inhaltlichen Arbeiten sind Erweiterungen und Verbesserungen im Bereich der Modellierung geplant: Die Ausbaupfade für erneuerbare Stromerzeugung sollen zukünftig nicht auf die Vorgaben der Leitstudie beschränkt sein, sondern werden konsistent zu den Szenario-Daten im Rahmen der Modellierung ermittelt. Darüber hinaus wird die modellseitige Darstellung der Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Sektoren verbessert. Ein Beispiel hierfür sind die Auswirkungen energetischer Biomassenutzung auf Landwirtschaft und LULUCF.

Die ökonomische Analyse wird in der zweiten Modellierungsrunde durch Simulationen mit dem gesamtwirtschaftlichen, multiregionalen und multisektoralen Gleichgewichtsmodell FARM-EU ergänzt. Mit seinem globalen Ansatz lassen sich mit FARM-EU insbesondere Erkenntnisse über die Veränderung der Handelsströme (Importe, Exporte) und Wirtschaftsstrukturen bei stringenteren Klimaschutzzielen gewinnen. Darüber hinaus werden mögliche klimapolitikbedingte Verlagerungen von Produktion oder Investition in Regionen, die kein Emissionsreduktionsziel haben (Carbon Leakage), betrachtet. Die Erkenntnisse werden jeweils für Deutschland, die EU (ohne Deutschland) und den Rest der Welt dargestellt und vergleichend beschrieben.

9 Fazit

Die Klimaschutzziele der Bundesregierung bedeuten langfristig den Übergang zu einer nahezu treibhausgasfreien Volkswirtschaft. Die Gestaltung dieses Umwandlungsprozesses ist eine hoch komplexe Aufgabe, die unsere Gesellschaft vor zahlreiche Herausforderungen stellt. Die Weiterentwicklung und Diffusion von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energieträger in allen Sektoren sowie die Steigerung von Energie- und Materialeffizienz spielen eine wichtige Rolle. Die ökonomische Analyse zeigt, dass die beschriebene Strategie aus Effizienzpolitik plus erneuerbarem Strom (nahe 100%) plus Produktinnovation eine No-regret-Strategie darstellt, die sich langfristig auszahlt. Es ist Aufgabe der Politik, klare Innovations- und Investitionsanreize zu setzen, um diese Entwicklung voranzutreiben. Hierbei ist schnelles Handeln wichtig – denn auf Grund des langlebigen Kapitalstockes (z.B. bei Gebäuden, Kraftwerken und im Infrastrukturbereich) können Umwandlungsprozesse oft nur langsam umgesetzt werden.

Bisher wird die Energiewende hauptsächlich im Zusammenhang mit der Umstellung der Stromversorgung auf erneuerbare Energien diskutiert. Damit eine Emissionsreduktion von 80 % oder mehr gelingt, muss die Politik aber bisher noch vernachlässigte Bereiche wie die Landwirtschaft, LULUCF, der Gebäudebereich und die Industrie stärker berücksichtigen. Auch hier müssen sowohl Minderungsmaßnahmen als auch die verstärkte Nutzung von erneuerbarer Wärme angestoßen werden.

Die Herausforderungen steigen deutlich, wenn zusätzlich zu dem Mindestziel von 80 % Reduktion noch weitere Emissionen vermieden werden sollen. Die umstrittene Option der Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff (CCS) wird im Stromsektor zwar nicht erforderlich sein. Im Bereich prozessbedingter Emissionen im Industriesektor spielt CCS allerdings eine wichtige Rolle.

Rein technologieorientierte Maßnahmen werden allerdings nicht ausreichen, um die ambitionierten Ziele zu erreichen. Der Übergang zu einem nahezu kohlenstofffreien Energiesystem wird nur gelingen, wenn auf breiter Basis ein Wandel hin zu einem bewussteren und nachhaltigerem Umgang mit endlichen Ressourcen stattfindet. Entsprechende Verhaltensänderungen betreffen zahlreiche Sektoren und Lebensbereiche – Beispiele sind die verstärkte Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel im Personenverkehr, eine Senkung der durchschnittlichen Raumtemperatur im Gebäudesektor und ein Rückgang des Fleischkonsums. Solche Verhaltensänderungen sind schon zur Erreichung einer Treibhausgasminderung von 80 % hilfreich, für eine Minderung um 90 % werden sie unverzichtbar.

Um das gesteckte Ziel einer Treibhausgasreduktion von 80 bis 95 % bis zum Jahr 2050 zu erreichen, müssen die Zwischenziele für 2020 bis 2040 mindestens erreicht werden. Das bedeutet, dass bereits kurz- und mittelfristig die Weichen für eine Erreichung des langfristigen Klimaschutzziels gestellt werden. Daher erscheint eine Verschärfung der Zwischenziele sinnvoll, um einen ambitionierten Klimaschutz zu unterstützen.

Die bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt umgesetzten Maßnahmen sind zwar bei weitem nicht ausreichend, um die im Energiekonzept verankerten langfristigen Klimaschutzziele zu erreichen. Die mit diesem Projekt vorgelegten Klimaschutzszenarien belegen

jedoch eindrücklich, dass eine weitgehende Dekarbonisierung der Volkswirtschaft sowohl technisch als auch wirtschaftlich erreichbar und auch lohnend ist, wenn der politische und gesellschaftliche Wille dazu besteht.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 1

2 Beschreibung Szenarien ... 3

3 Methodik ... 4

3.1 Methodischer Ansatz für die Projektionen der drei Szenarien ... 4
3.2 Modellierungsansätze der Sektoren ... 6
3.2.1 Wärmebedarf im Gebäudebereich ... 6
3.2.2 Industrie ... 9
3.2.3 Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) – außer gebäudebezogener Energiebedarf ... 17
3.2.4 Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung ... 21
3.2.5 Verkehr ... 23
3.2.6 Strom- und Fernwärmeversorgung ... 30
3.2.7 Industrieprozesse (CO_2-, CH_4- und N_2O-Emissionen) ... 38
3.2.8 Industrieprozesse und Produktverwendung (Verwendung von FKW, HFKW und SF_6) ... 39
3.2.9 Abfallwirtschaft ... 39
3.2.10 Landwirtschaft ... 40
3.2.11 LULUCF ... 42
3.3 Ökonomische Modellierung ... 44
3.3.1 Modellieransatz ASTRA-D ... 44
3.3.2 Implementierung der Maßnahmen aus den Bottom-up Modellen ... 45

4 Rahmendaten und -annahmen für die Szenarien ... 48

4.1 Demographische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten ... 48
4.1.1 Bevölkerung ... 48
4.1.2 Wirtschaftsentwicklung ... 49
4.1.3 Beschäftigungsentwicklung ... 52
4.2 Entwicklung der Primärenergiepreise ... 55
4.2.1 Vorbemerkungen ... 55
4.2.2 Preisprojektionen für Rohöl auf dem Weltmarkt ... 55
4.2.3 Projektion für die Entwicklung der Wechselkurse ... 58
4.2.4 Preisprojektionen für Erdgas und Steinkohle ... 58
4.2.5 Preisprojektionen für Braunkohle ... 62
4.2.6 Zusammenfassung für die Projektion der Primärenergiepreise ... 63
4.3 Preise für Treibhausgas-Emissionsberechtigungen ... 64
4.4 Rahmendaten in einzelnen Sektoren ... 67
4.4.1 Verkehr ... 67
4.4.2 Private Haushalte ... 74
4.4.3 Industrie ... 76
4.4.4 Gewebe, Handel und Dienstleistung (GHD) ... 76
4.5 Potenzialrestriktionen ... 77

4.5.1 Biomasse ... 77
4.5.2 Carbon Capture and Storage (CCS) ... 80
4.5.3 Speicher ... 81
4.5.4 Stromimporte ... 82

5 Projektionen für die energiebedingten Treibhausgasprojektionen und den Energieverbrauch ... 84

5.1 Gebäudebereich – Wärmebereitstellung ... 84
5.1.1 Annahmen und Parameter ... 84
5.1.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 87
5.1.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 91
5.1.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 93
5.1.5 Vergleich der Szenarien ... 96
5.1.6 Zielerreichung Wärme in Gebäuden ... 98
5.2 Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung ... 102
5.2.1 Annahmen und Parameter ... 102
5.2.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 104
5.2.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 106
5.2.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 108
5.2.5 Vergleich der Szenarien ... 109
5.3 Industrie ... 112
5.3.1 Annahmen und Parameter ... 112
5.3.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 124
5.3.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 130
5.3.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 132
5.3.5 Vergleich der Szenarien ... 137
5.4 GHD – Geräte und Prozesse ... 146
5.4.1 Annahmen und Parameter ... 146
5.4.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 150
5.4.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 153
5.4.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 156
5.4.5 Vergleich der Szenarien ... 158
5.5 Verkehr ... 163
5.5.1 Annahmen und Parameter ... 163
5.5.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 172
5.5.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 180
5.5.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 187
5.5.5 Vergleich der Szenarien ... 195
5.6 Erneuerbare und fossile Stromerzeugung ... 198
5.6.1 Annahmen und Parameter ... 198
5.6.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 206
5.6.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 208
5.6.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 211
5.6.5 Vergleich der Szenarien ... 213

5.7 Andere Umwandlungssektoren ... 215
5.7.1 Annahmen und Parameter ... 215
5.7.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 217
5.7.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 218
5.7.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 219
5.7.5 Vergleich der Szenarien ... 220
5.8 Flüchtige Emissionen des Energiesektors ... 221
5.8.1 Annahmen und Parameter ... 221
5.8.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 223
5.8.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 224
5.8.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 225
5.8.5 Vergleich der Szenarien ... 226
5.9 Primärenergiebedarf ... 227
5.9.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 228
5.9.2 Klimaschutzszenario 80 ... 229
5.9.3 Klimaschutzszenario 90 ... 231
5.9.4 Vergleich Szenarien ... 232
5.10 Endenergiebedarf ... 233
5.10.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 233
5.10.2 Klimaschutzszenario 80 ... 237
5.10.3 Klimaschutzszenario 90 ... 242
5.10.4 Vergleich Szenarien ... 247
5.11 Gesamte verbrennungsbedingte Treibhausgasemissionen ... 251

6 Projektion für die nicht-energiebedingten Treibhausgasemissionen ... 253

6.1 Industrieprozesse (CO_2-, CH_4- und N_2O-Emissionen) ... 253
6.1.1 Annahmen und Parameter ... 253
6.1.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (CO_2-Emissionen) ... 254
6.1.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 (CO_2-Emissionen) ... 254
6.1.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 (CO_2-Emissionen) ... 255
6.1.5 Ergebnisse der Projektionen für prozessbedingte CH_4 und N_2O–Emissionen ... 257
6.1.6 Vergleich der Szenarien ... 258
6.2 Industrieprozesse und Produktverwendung (Verwendung von FKW, HFKW und SF_6) ... 259
6.2.1 Annahmen und Parameter ... 260
6.2.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 262
6.2.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 264
6.2.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 266
6.2.5 Vergleich der Szenarien ... 269
6.3 Abfallwirtschaft ... 270
6.3.1 Annahmen und Parameter ... 270
6.3.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 275

6.3.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 277
6.3.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 277
6.3.5 Vergleich der Szenarien ... 278
6.4 Landwirtschaft ... 279
6.4.1 Annahmen und Parameter ... 279
6.4.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 285
6.4.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 ... 286
6.4.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 ... 288
6.4.5 Vergleich der Szenarien ... 290
6.5 LULUCF ... 291
6.5.1 Annahmen und Parameter ... 291
6.5.2 Ergebnisse zu Flächenänderungen (Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), Klimaschutzszenario 80, Klimaschutzszenario 90) ... 301
6.5.3 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (THG) ... 304
6.5.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 (THG) ... 306
6.5.5 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 (THG) ... 308
6.5.6 Vergleich der Szenarien ... 310

7 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen und deren Komponenten ... 312

7.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 312
7.2 Klimaschutzszenario 80 ... 314
7.3 Klimaschutzszenario 90 ... 317
7.4 Vergleich der Szenarien ... 321

8 Analyse gesamtwirtschaftlicher Effekte ... 326

9 Vergleich der Szenarienergebnisse mit den Zielen des Energie- und Klimaschutzkonzepts der Bundesregierung ... 329

9.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 330
9.2 Klimaschutzszenario 80 ... 331
9.3 Klimaschutzszenario 90 ... 333

10 Fazit: Wie können die Energiekonzept-Ziele erreicht werden? ... 334

10.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 334
10.2 Klimaschutzszenario 80 ... 336
10.3 Klimaschutzszenario 90 ... 339

11 Referenzen ... 343

11.1 Literatur ... 343
11.2 Deutsche Gesetze und Verordnungen ... 352

Anhang 1 Verzeichnis der Abkürzungen, Akronyme und Symbole ... 353

Anhang 2 Komponenten- und Sensitivitätsanalyse ... 358

Anhang 3 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach Verursachern (Verursacherbilanz) ... 364

Anhang 3-1 Methodik der Emissionsbilanzierung nach Verursachern ... 364
Anhang 3-2 Verursacherbilanz für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 365
Anhang 3-3 Verursacherbilanz für das Klimaschutzszenario 80 ... 368
Anhang 3-4 Verursacherbilanz für das Klimaschutzszenario 90 ... 371
Anhang 3-5 Vergleich der Szenarien ... 374

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1 Modellübersicht zur Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen ... 5

Abbildung 3-2 Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab ... 8

Abbildung 3-3 Schematische Darstellung der Modellhierarchie am Beispiel des Papiergewerbes ... 12

Abbildung 3-4 Zusammenhang von Diffusionsgeschwindigkeit und Einsparpotenzialen ... 16

Abbildung 3-5 Vereinfachte Darstellung des “bottom-up“ Mengengerüsts für den Sektor GHD im Modell FORECAST ... 20

Abbildung 3-6 Übersicht über das Geräte-Modul von FORECAST-Residential ... 23

Abbildung 3-7 Schematische Darstellung der Modellierung des Verkehrssektors ... 24

Abbildung 3-8 Klassisches Vier-Stufen-Modell in der Implementierungsdichte von ASTRA-D ... 26

Abbildung 3-9 Interaktion der Modelle PowerACE (ISI) und ELIAS / PowerFlex (Öko-Institut) zur Abbildung des Stromsektors ... 31

Abbildung 3-10 Iteration zwischen Kraftwerksstilllegung und -investition (ELIAS) und Kraftwerkseinsatz (PowerFlex) ... 35

Abbildung 3-11 Schematische Darstellung des Modells PowerACE ... 38

Abbildung 3-12 Makroökonomische Modellierlogik in ASTRA-D ... 45

Abbildung 3-13 Überblick über den Ablauf der Modellierung der gesamtwirtschaftlichen Effekte ... 47

Abbildung 4-1 Bevölkerungsentwicklung nach Altersklassen ... 48

Abbildung 4-2 Projektion des preisbereinigten BIP in Mrd. $€_{2010,}$ basierend auf (OECD, 2012) -0,3 Prozentpunkte(blau) und (OECD, 2012) (rot, gestrichelt) ... 50

Abbildung 4-3 Beschäftigungsentwicklung nach Sektoren ... 54

Abbildung 4-4 Historischer Verlauf und aktuelle Projektionen für die Entwicklung des Rohölpreises auf dem Weltmarkt, 1980 – 2050 ... 56

Abbildung 4-5 Historischer Verlauf und Modellierung von Rohöl-, Erdgas- und Steinkohlenpreisen, 1970 – 2010 ... 59

Abbildung 4-6 Historischer Verlauf und aktuelle Projektionen für die Entwicklung des Erdgaspreises auf dem kontinentaleuropäischen Markt, 1980 – 2050 ... 60

Abbildung 4-7 Historischer Verlauf und aktuelle Projektionen für die Entwicklung des Steinkohle-Weltmarktpreises für Lieferungen nach Nordwest-Europa, 1980 – 2050 ... 61

Abbildung 4-8 Historischer Verlauf und Projektion für die Entwicklung des Weltmarktpreises für Rohöl sowie der europäischen Preise für Erdgas und Steinkohle Markt, 2000 – 2050 ... 62

Abbildung 4-9 Settlement-Preise für den EUA-Spotmarkt sowie EUA-Futures mit Lieferung im Dezember 2012 und Dezember 2020, 2010 bis 2011 ... 65

Abbildung 4-10 Entwicklungsparameter für die Verkehrsleistung im Flugverkehr im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (indiziert), historische Entwicklung und Fortschreibung bis 2050 ... 73

Abbildung 4-11 Entwicklung der Wohnfläche 2008-2030 ... 76

Abbildung 4-12 Konversionsstufen von Biomasse (schematisch) ... 78

Abbildung 5-1 Entwicklung der Sanierungsrate für alle Szenarien ... 85

Abbildung 5-2 Endenergiebedarf im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 89

Abbildung 5-3 Endenergiebedarf im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 90

Abbildung 5-4 Endenergiebedarf im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 80 ... 92

Abbildung 5-5 Endenergiebedarf im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 80 ... 93

Abbildung 5-6 Endenergiebedarf im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 90 – 2050 ... 94

Abbildung 5-7 Endenergiebedarf im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 90 ... 95

Abbildung 5-8 Endenergiebedarf für Wärmebereitstellung in Gebäuden in den Sektoren GHD und Haushalte ... 98

Abbildung 5-9 Energienachfrage im AMS (2012) nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050 (Quellen: Schätzungen Fraunhofer ISI) ... 105

Abbildung 5-10 Energienachfrage im KS 80 nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050 ... 107

Abbildung 5-11 Energienachfrage im KS 90 nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050 ... 108

Abbildung 5-12 Vergleich der Energienachfrage der Szenarien AMS (2012), KS 80 und KS 90 für den Zeitraum 2010-2050 ... 110

Abbildung 5-13 Kumulative Verteilung der maximal zulässigen Amortisationszeit für Investitionen in Energieeinsparoptionen je Szenario 118

Abbildung 5-14 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern im AMS (2012), 2010 - 2050 125

Abbildung 5-15 Entwicklung des Brennstoffbedarfs im AMS (2012) nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) 126

Abbildung 5-16 Entwicklung der Stromnachfrage im AMS (2012) nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) 128

Abbildung 5-17 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern im KS 80, 2010–2050 131

Abbildung 5-18 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern im KS 90, 2010 - 2050 133

Abbildung 5-19 Entwicklung des Brennstoffbedarfs im KS 90 nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) 134

Abbildung 5-20 Entwicklung der Stromnachfrage im KS 90 nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) 136

Abbildung 5-21 Endenergiebedarf im Sektor Industrie je Szenario, 2010 - 2050 139

Abbildung 5-22 Beitrag der einzelnen Technologiefelder zu den erzielten Brennstoffeinsparungen je Szenario im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) 140

Abbildung 5-23 Vergleich des Energiebedarfs je Energieträger und Szenario 141

Abbildung 5-24 Veränderung des Brennstoffbedarfs je Wirtschaftszweig im Vergleich zum Jahr 2010 142

Abbildung 5-25 Veränderung des Brennstoffbedarfs je Prozess in der Branche Metallerzeugung im Vergleich zum Jahr 2010 143

Abbildung 5-26 Veränderung des Strombedarfs je Wirtschaftszweig im Vergleich zum Jahr 2010 144

Abbildung 5-27 Veränderung des Strombedarfs je Querschnittstechnik im Vergleich zum Jahr 2010 145

Abbildung 5-28 Strombedarf im Sektor GHD nach Wirtschaftszweig und Energieanwendungen für das Jahr 2010 148

Abbildung 5-29 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nach Energieträgern 151

Abbildung 5-30 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Klimaschutzszenario 80 nach Energieträgern 154

Abbildung 5-31 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Klimaschutzszenario 90 nach Energieträgern 157

Abbildung 5-32 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Vergleich, 2010 - 2050 160

Abbildung 5-33 Veränderung des Strombedarfs im Sektor GHD – Prozesse und Geräte nach Anwendungen und Szenarien im Vergleich zu 2010..... 161

Abbildung 5-34 Veränderung des Strombedarfs im Sektor GHD – Prozesse und Geräte nach Branchen und Szenarien im Vergleich zu 2010 162

Abbildung 5-35 Personenverkehrsnachfrage im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050 173

Abbildung 5-36 Güterverkehrsnachfrage im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050..... 175

Abbildung 5-37 Endenergiebedarf des Verkehrssektors (Bilanzgrenze nach Nationalem Inventarbericht) im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050 177

Abbildung 5-38 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050..... 179

Abbildung 5-39 Personenverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050 181

Abbildung 5-40 Güterverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050 182

Abbildung 5-41 Endenergiebedarf des Verkehrssektors (Bilanzgrenze nach Nationalem Inventarbericht) im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050 184

Abbildung 5-42 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050 186

Abbildung 5-43 Personenverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050 188

Abbildung 5-44 Güterverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050 190

Abbildung 5-45 Endenergiebedarf des Verkehrssektors (Bilanzgrenze nach Nationalem Inventarbericht) im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050 192

Abbildung 5-46 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Klimaschutzszenario 90, 2010 – 2050..... 194

Abbildung 5-47 Endenergiebedarf im Verkehrsektor im Vergleich der Szenarien, 1990 - 2050..... 196

Abbildung 5-48 Nettostromerzeugung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) 207

Abbildung 5-49 Entwicklung der Nettostromerzeugung im Klimaschutzszenario 80 209

Abbildung 5-50 Entwicklung der Nettostromerzeugung im Klimaschutzszenario 90 212

Abbildung 5-51 Primärenergiebedarf nach Energieträgern im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010–2050 228

Abbildung 5-52 Primärenergiebedarf nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 80, 2010–2050 229

Abbildung 5-53 Primärenergiebedarf nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 90, 2010–2050 231

Abbildung 5-54 Differenzen des Primärenergiebedarfs zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 bzw. zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 90, 2020–2050 232

Abbildung 5-55 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (ohne internat. Luft- und Seeverkehr), 2010–2050 234

Abbildung 5-56 Sektorale Aufteilung des Endenergieverbrauchs im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (mit internationalem Luft- und Seeverkehr), 2010–2050 235

Abbildung 5-57 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 80 (ohne internat. Luft- und Seeverkehr), 2010–2050 238

Abbildung 5-58 Sektorale Aufteilung des Endenergiebedarfs im Klimaschutzszenario 80 (mit internationalem Luft- und Seeverkehr), 2010–2050 240

Abbildung 5-59 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 90 (ohne internat. Luft- und Seeverkehr), 2010–2050 243

Abbildung 5-60 Sektorale Aufteilung des gesamten Endenergiebedarfs im Klimaschutzszenario 90 (mit internationalem Luft- und Seeverkehr), 2010–2050 245

Abbildung 5-61 Differenzen des Endenergiebedarf zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 bzw. zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 90 nach Energieträger, 2020–2050 248

Abbildung 5-62 Sektorale Differenzen des Endenergiebedarfs zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 bzw. zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 90, 2020–2050 249

Abbildung 5-63 Entwicklung des Stromverbrauchs in den Endenergiesektoren, 2010–2050 ... 250

Abbildung 6-1 Emissionen an fluorierten Treibhausgasen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 263

Abbildung 6-2 Emissionen an fluorierten Treibhausgasen im Klimaschutzszenario 80 ... 265

Abbildung 6-3 Emissionen an fluorierten Treibhausgasen im Klimaschutzszenario 90 ... 267

Abbildung 6-4 Entwicklung der Methan-Emissionen aus der Abfalldeponierung in Deutschland, 1990-2050 ... 272

Abbildung 6-5 LULUCF-Senken (Anteil der Flächentypen an der eingelagerten THG-Menge) ... 292

Abbildung 6-6 LULUCF-Quellen (Anteil der Flächentypen an den THG-Emissionen) ... 293

Abbildung 6-7 Flächenänderungen der LULUCF-Flächentypen für die drei Szenarien (Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90) von 1990 bis 2050 ... 303

Abbildung 6-8 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) von 1990 bis 2050 ... 305

Abbildung 6-9 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Klimaschutzszenario 80 von 1990 bis 2050 (alle Maßnahmen, 30% Umsetzung) ... 307

Abbildung 6-10 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Klimaschutzszenario 90 von 1990 bis 2050 (alle Maßnahmen, 95% Umsetzung) ... 309

Abbildung 7-1 Verminderung von Treibhausgasemissionen in den Jahren 2020–2050 gegenüber 1990 im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 314

Abbildung 7-2 Verminderung von Treibhausgasemissionen in den Jahren 2020-2050 gegenüber 1990 im Klimaschutzszenario 80 ... 317

Abbildung 7-3 Verminderung von Treibhausgasemissionen in den Jahren 2020-2050 gegenüber 1990 im Klimaschutzszenario 90 ... 320

Abbildung 7-4 Zusätzliche Verminderung von Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80-Szenario und im Klimaschutzszenario 90 gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 321

Abbildung 7-5 Anteile der einzelnen Sektoren an den gesamten Treibhausgasemissionen im Jahr 1990 bzw. im Jahr 2050 für die drei Szenarien ... 323

Abbildung 7-6 Anteile der einzelnen Gase an den gesamten Treibhausgasemissionen im Jahr 1990 bzw. im Jahr 2050 für die drei Szenarien ... 324

Abbildung 10-1: Erforderliche Maßnahmen für eine 80- bis 90prozentige Reduktion der Treibhausgasemissionen ... 334

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Zieldatensatz des Energiekonzepts 2010/2011 und Rahmenvorgaben für die Klimaschutzszenarien ... 3

Tabelle 3-1 Eingangsparameter der Sektormodule des Modells FORECAST ... 11

Tabelle 3-2 Branchenstruktur von FORECAST-Industry ... 13

Tabelle 3-3 Prozessstruktur des Moduls FORECAST-Industry ... 14

Tabelle 3-4 Klassifizierung der Branchen des Sektors GHD im Modell FORECAST ... 18

Tabelle 3-5 Energiedienstleistungen (EDL), die für die Berechnung des Energiebedarfs je Branche summiert werden ... 19

Tabelle 3-6 Aktivitätsdaten und Einflussgrößen für die Berechnung der Emissionen aus der Landwirtschaft ... 41

Tabelle 4-1 Bevölkerungsentwicklung nach Altersklassen ... 48

Tabelle 4-2 Preisbereinigte Bruttowertschöpfung nach Sektoren und Bruttoinlandsprodukt (Preisbasis 2010), 2008 – 2050 ... 51

Tabelle 4-3 Anteile Bruttowertschöpfung der Industrie (Mrd. Euro 2010), 2008 – 2050 ... 52

Tabelle 4-4 Durchschnittliche Wachstumsraten der Bruttowertschöpfung ausgewählter Bereiche der Wirtschaft 2008-2030 ... 52

Tabelle 4-5 Beschäftigungsentwicklung nach Sektoren ... 54

Tabelle 4-6 Entwicklung der Brennstoffkosten für Braunkohle in Deutschland, 2008 bis 2050 ... 63

Tabelle 4-7 Ergebnisse der Referenzpreis-Projektionen für Rohöl, Erdgas, Stein- und Braunkohle, 2008-2050 ... 64

Tabelle 4-8 Projektion der EU Energy Roadmap 2050 für die Preise von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen, 2020-2050 ... 65

Tabelle 4-9 Preise für Treibhausgas-Emissionszertifikaten in den Szenarien, 2010-2050 ... 67

Tabelle 4-10 Überblick über Eigenschaften des Mobilitätspanels ... 68

Tabelle 4-11 Überblick über Eigenschaften von Mobilität in Deutschland ... 69

Tabelle 4-12 Zentrale Mobilitätseckwerte aus MoP 2008 und MiD 2008 70

Tabelle 4-13 Überblick über Eigenschaften von Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 71

Tabelle 4-14 Entwicklung der Anzahl der Personen je privatem Haushalt 2008-2050 aus ausgewählten Studien 74

Tabelle 4-15 Entwicklung der Anzahl an Personen je privatem Haushalt und der Privaten Haushalte 2008-2050 75

Tabelle 4-16 Entwicklung von Nutzfläche und Wohnfläche 75

Tabelle 4-17 Entwicklung der Energiebezugsfläche im Sektor GHD in allen Szenarien 77

Tabelle 4-18 Reststoffpotenzial und Flächenpotenzial für den Anbau von Energiepflanzen in Deutschland. 79

Tabelle 5-1 Entwicklung der Sanierungsrate 84

Tabelle 5-2 U-Werte im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) 86

Tabelle 5-3 Veränderung der energetischen Qualität im Klimaschutzszenario 80 gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (Faktor) 87

Tabelle 5-4 Endenergiebedarf von Gebäuden im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) 88

Tabelle 5-5 Endenergiebedarf von Gebäuden im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) 90

Tabelle 5-6 Endenergiebedarf der Gebäude im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 80 91

Tabelle 5-7 Endenergiebedarf im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 80 92

Tabelle 5-8 Endenergiebedarf im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 90 94

Tabelle 5-9 Endenergiebedarf im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 90 95

Tabelle 5-10 Endenergiebedarf für Wärmebereitstellung in Gebäuden in den Sektoren GHD und Haushalte 97

Tabelle 5-11 Endenergiebedarf für Wärmebereitstellung in Gebäuden 100

Tabelle 5-12 Primärenergiefaktoren 101

Tabelle 5-13 Primärenergie in Gebäuden 102

Tabelle 5-14 Energienachfrage nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050 – AMS (2012) 106

Tabelle 5-15 Energienachfrage nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050 – KS 80 ... 107

Tabelle 5-16 Energienachfrage nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050 – KS 90 ... 109

Tabelle 5-17 Vergleich der Energienachfrage der Szenarien AMS (2012), KS 80 und KS 90 für den Zeitraum 2010-2050 ... 110

Tabelle 5-18 Emissionsentwicklungen für den Haushaltssektor (Gebäude + Geräte) im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 ... 111

Tabelle 5-19 Entwicklung der industriellen Produktion im Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 (Teil 1) ... 113

Tabelle 5-20 Entwicklung der industriellen Produktion im Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 (Teil 2) ... 114

Tabelle 5-21 Entwicklung ausgewählter Kennwerte zur Nutzung von Sekundärrouten bei energieintensiven Produkten im Vergleich zwischen den Szenarien ... 115

Tabelle 5-22 Entwicklung der industriellen Produktion im Klimaschutzszenario 90 (Teil 1) ... 116

Tabelle 5-23 Entwicklung der industriellen Produktion im Klimaschutzszenario 90 (Teil 2) ... 117

Tabelle 5-24 Anteile der Querschnittstechniken am Stromverbrauch der Wirtschaftszweige der Industrie im Jahr 2010 [%] ... 119

Tabelle 5-25 Anteil einzelner Anwendungen am Brennstoffbedarf der Industrie ... 121

Tabelle 5-26 Technisches Potenzial zur Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen nach Wirtschaftszweig und Temperaturniveau ... 122

Tabelle 5-27 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern, 2010 - 2050 ... 124

Tabelle 5-28 Entwicklung des Brennstoffbedarfs im AMS nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) [PJ] ... 127

Tabelle 5-29 Entwicklung der Stromnachfrage im AMS nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) [TWh] ... 129

Tabelle 5-30 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern, 2010 – 2050 ... 130

Tabelle 5-31 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern, 2010 - 2050 ... 132

Tabelle 5-32 Entwicklung des Brennstoffbedarfs im KS 90 nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) [PJ] ... 135

Tabelle 5-33 Entwicklung der Stromnachfrage im KS 80 nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) [TWh] ... 137

Tabelle 5-34 Übersicht Endenergiebedarf im Sektor Industrie je Szenario, 2010 - 2050 ... 138

Tabelle 5-35 Beitrag der einzelnen Technologiefelder zu den erzielten Brennstoffeinsparungen je Szenario im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 141

Tabelle 5-36 Emissionsentwicklungen für den Industriesektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 ... 146

Tabelle 5-37 Anteile der Anwendungen am Strombedarf je Wirtschaftszweig des Sektors GHD im Jahr 2010 ... 147

Tabelle 5-38 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nach Energieträgern ... 150

Tabelle 5-39 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Wirtschaftszweigen ... 152

Tabelle 5-40 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Anwendungen[40] ... 152

Tabelle 5-41 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Klimaschutzszenario 80 nach Energieträgern ... 153

Tabelle 5-42 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Wirtschaftszweigen[40] ... 155

Tabelle 5-43 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Anwendungen[40] ... 155

Tabelle 5-44 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Klimaschutzszenario 90 nach Energieträgern ... 156

Tabelle 5-45 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Wirtschaftszweigen[40] ... 157

Tabelle 5-46 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Anwendungen[40] ... 158

Tabelle 5-47 Übersicht Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Vergleich, 2010 – 2050 ... 159

Tabelle 5-48 Emissionsentwicklungen für den GHD-Sektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 ... 163

Tabelle 5-49 Entwicklung der elektrische Reichweiten von Elektrofahrzeugen 165

Tabelle 5-50 Effizienzentwicklung von Pkw-Neuzulassungen (Größenklasse mittel) 166

Tabelle 5-51 Neuzulassungsstruktur von Pkw (Größenklasse mittel) 167

Tabelle 5-52 Effizienzentwicklung von leichten Nutzfahrzeugen (Energieverbrauch bei Leerfahrten) 168

Tabelle 5-53 Effizienzentwicklung von Sattelzügen (Energieverbrauch bei Leerfahrten) 169

Tabelle 5-54 Neuzulassungsstruktur von leichten Nutzfahrzeugen 169

Tabelle 5-55 Neuzulassungsstruktur kleiner Lkw (<12 t) 170

Tabelle 5-56 Neuzulassungsstruktur großer Lkw und Sattelzüge 170

Tabelle 5-57 Effizienzentwicklung relevanter übriger Verkehrsträger (Personenverkehr) 171

Tabelle 5-58 Effizienzentwicklung relevanter übriger Verkehrsträger (Güterverkehr) 171

Tabelle 5-59 Personenverkehrsnachfrage im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050 174

Tabelle 5-60 Güterverkehrsnachfrage im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050 175

Tabelle 5-61 Fahrzeugbestand (Pkw und Lkw) im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050 176

Tabelle 5-62 Endenergiebedarf des Verkehrssektors nach Kraftstoffen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050 178

Tabelle 5-63 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050 180

Tabelle 5-64 Personenverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050 181

Tabelle 5-65 Güterverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050 183

Tabelle 5-66 Fahrzeugbestand (Pkw und Lkw) im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050 183

Tabelle 5-67 Endenergiebedarf des Verkehrssektors nach Kraftstoffen im Klimaschutzszenario 80, 2010 – 2050 185

Tabelle 5-68 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050 187

Tabelle 5-69 Personenverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 90 188

Tabelle 5-70 Szenarienvergleich: Modal Split im Personenverkehr (Wege) 189

Tabelle 5-71 Güterverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050 190

Tabelle 5-72 Fahrzeugbestand (Pkw und Lkw) im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050 191

Tabelle 5-73 Endenergiebedarf des Verkehrssektors nach Kraftstoffen im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050 193

Tabelle 5-74 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050 195

Tabelle 5-75 Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Vergleich der Szenarien, 1990 - 2050 197

Tabelle 5-76 Emissionsentwicklungen für den Verkehrssektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 198

Tabelle 5-77 Technische Lebensdauer der Bestandskraftwerke 199

Tabelle 5-78 Ausgewählte Daten von Neubaukraftwerken 200

Tabelle 5-79 Ausgewählte Daten von Neubaukraftwerken (KWK-Anlagen) 200

Tabelle 5-80 Installierte Nettoleistung erneuerbarer Energien im Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 202

Tabelle 5-81 Kumulierte elektrische Nettoleistung von Kraftwerken, die sich in Planung bzw. Bau befinden 202

Tabelle 5-82 Installierte Nettoleistung erneuerbarer Energien im Klimaschutzszenario 90 205

Tabelle 5-83 Nettostromerzeugung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) 208

Tabelle 5-84 Strompreisentwicklung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) 208

Tabelle 5-85 Entwicklung der Nettostromerzeugung im Klimaschutzszenario 80 210

Tabelle 5-86 Strompreisentwicklung im Klimaschutzszenario 80 210

Tabelle 5-87 Entwicklung der Nettostromerzeugung im Klimaschutzszenario 90 212

Tabelle 5-88 Strompreisentwicklung im Klimaschutzszenario 90 213

Tabelle 5-89 Stromerzeugung im Vergleich der Szenarien, 2010 und 2050 214

Tabelle 5-90 Komponenten der Stromerzeugung im Vergleich der Szenarien, 2010 und 2050 214

Tabelle 5-91 Emissionsentwicklungen für den Stromerzeugungssektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 215

Tabelle 5-92 Entwicklung der Energieverbräuche der anderen Umwandlungssektoren im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010–2050 217

Tabelle 5-93 Entwicklung der Energieverbräuche der anderen Umwandlungssektoren im Klimaschutzszenario 80, 2010–2050 218

Tabelle 5-94 Entwicklung der Energieverbräuche der anderen Umwandlungssektoren im Klimaschutzszenario 90, 2010–2050 219

Tabelle 5-95 Emissionsentwicklungen für die übrigen Umwandlungssektoren im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 221

Tabelle 5-96 Entwicklung der flüchtigen Emissionen des Energiesektors im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2005–2050 223

Tabelle 5-97 Entwicklung der flüchtigen Emissionen des Energiesektors im Klimaschutzszenario 80, 2005–2050 224

Tabelle 5-98 Entwicklung der flüchtigen Emissionen des Energiesektors im Klimaschutzszenario 90, 2005–2050 225

Tabelle 5-99 Emissionsentwicklungen für die flüchtigen Emissionen im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 226

Tabelle 5-100 Entwicklung des gesamten Primärenergieverbrauchs im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) 2008–2050 228

Tabelle 5-101 Entwicklung des gesamten Primärenergieverbrauchs im Klimaschutzszenario 80 2008–2050 230

Tabelle 5-102 Entwicklung des gesamten Primärenergieverbrauchs im Klimaschutzszenario 90 2010–2050 231

Tabelle 5-103 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2008–2050 234

Tabelle 5-104 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Sektoren im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2008–2050 236

Tabelle 5-105 Entwicklung der Stromverbräuche im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2008–2050 237

Tabelle 5-106 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 80, 2008–2050 239

Tabelle 5-107 Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs nach Sektoren im Klimaschutzszenario 80, 2008–2050 240

Tabelle 5-108 Entwicklung der Stromverbräuche im Klimaschutzszenario 80, 2008–2050 242

Tabelle 5-109 Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 90, 2008–2050 244

Tabelle 5-110 Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs nach Sektoren im Klimaschutzszenario 90, 2008–2050 245

Tabelle 5-111 Entwicklung der Stromverbräuche Klimaschutzszenario 90, 2008–2050 ... 247

Tabelle 5-112 Entwicklung des erneuerbaren Anteils am Bruttoendenergieverbrauch (2010–2050) ... 251

Tabelle 5-113 Emissionsentwicklungen der gesamten energiebedingten Treibhausgase im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 ... 252

Tabelle 6-1 Entwicklung der prozessbedingten CO_2-Emissionen für ausgewählte Produktionsprozesse im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2005-2050 ... 254

Tabelle 6-2 Im Klimaschutzszenario 80 abgeschiedene prozessbedingte und energiebedingte CO_2-Mengen durch CCS in 2030-2050 ... 255

Tabelle 6-3 Entwicklung der prozessbedingten CO_2-Emissionen für ausgewählte Produktionsprozesse im Klimaschutzszenario 80, 2005-2050 ... 255

Tabelle 6-4 Mit CCS im Klimaschutzszenario 90 abgeschiedene prozessbedingte und energiebedingte CO_2-Mengen in 2030-2050 ... 256

Tabelle 6-5 Entwicklung der prozessbedingten CO_2-Emissionen für ausgewählte Produktionsprozesse im Klimaschutzszenario 90, 2005-2050 ... 256

Tabelle 6-6 Entwicklung der CH_4- und N_2O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2005-2050 ... 257

Tabelle 6-7 Entwicklung der CH_4- und N_2O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Klimaschutzszenario 80 und 90, 2005-2050 ... 258

Tabelle 6-8 Emissionsentwicklungen im Bereich der Industrieprozesse (CO_2, CH_4, N_2O)) im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 ... 259

Tabelle 6-9 Entwicklung der Emissionen an fluorierten Treibhausgasen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 264

Tabelle 6-10 Entwicklung der Emissionen an fluorierten Treibhausgasen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Klimaschutzszenario 80 ... 266

Tabelle 6-11 Entwicklung der Emissionen an fluorierten Treibhausgasen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Klimaschutzszenario 90 ... 268

Tabelle 6-12 Emissionsentwicklungen für industrielle Prozesse (F-Gase) im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 ... 270

Tabelle 6-13 Trendentwicklung des Abfallaufkommens für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 271

Tabelle 6-14 Trendentwicklung des Abfallaufkommens für das Klimaschutzszenario 80 ... 273

Tabelle 6-15 Trendentwicklung des Abfallaufkommens für das Klimaschutzszenario 90 ... 275

Tabelle 6-16 Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen aus der Abfallwirtschaft im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 1990-2050 ... 276

Tabelle 6-17 Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen aus der Abfallwirtschaft im Klimaschutzszenario 80, 1990-2050 ... 277

Tabelle 6-18 Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen aus der Abfallwirtschaft im Klimaschutzszenario 90, 1990-2050 ... 278

Tabelle 6-19 Emissionsentwicklungen für den Abfallsektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 ... 279

Tabelle 6-20 Entwicklung der Tierbestände im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 280

Tabelle 6-21 Entwicklung der einzelnen Subkategorien für landwirtschaftliche Böden im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 281

Tabelle 6-22 Entwicklung der Tierbestände im Klimaschutzszenario 80 ... 281

Tabelle 6-23 Entwicklung der einzelnen Subkategorien für landwirtschaftliche Böden im Klimaschutzszenario 80 ... 282

Tabelle 6-24 Entwicklung der Tierbestände im Klimaschutzszenario 90 ... 283

Tabelle 6-25 Entwicklung der einzelnen Subkategorien für landwirtschaftliche Böden im Klimaschutzszenario 90 ... 285

Tabelle 6-26 Entwicklung der Methan-Emissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 285

Tabelle 6-27 Entwicklung der Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 286

Tabelle 6-28 Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft in kt CO_2 Äquivalenten , 1990-2050 im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ... 286

Tabelle 6-29 Entwicklung der Methan-Emissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Klimaschutzszenario 80 ... 287

Tabelle 6-30 Entwicklung der Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Klimaschutzszenario 80 ... 288

Tabelle 6-31 Entwicklung der Methan und Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft in kt CO_2 Äquivalenten , 1990-2050 im Klimaschutzszenario 80 ... 288

Tabelle 6-32 Entwicklung der Methan-Emissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Klimaschutzszenario 90 ... 289

Tabelle 6-33 Entwicklung der Lachgasemissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Klimaschutzszenario 90 ... 289

Tabelle 6-34 Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft in kt CO_2 Äquivalenten , 1990-2050 im Klimaschutzszenario 90 ... 290

Tabelle 6-35 Emissionsentwicklungen für den Landwirtschaftssektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050 ... 291

Tabelle 6-36 Fläche und THG-Emissionen der LULUCF-Flächentypen ... 294

Tabelle 6-37 Fläche, Flächenanteil in Deutschland und THG-Emissionen der Flächenkategorien mit hohen THG-Reduktionspotenzialen (2010) ... 295

Tabelle 6-38 THG-Reduktionspotenzialen bei der Umwandlung von Ackerland auf organischen Böden hin zu Wald, Feuchtgebieten oder Gehölzen und bei der Produktion von Bioenergie. ... 297

Tabelle 6-39 Maßnahme und Restriktionen der drei Szenarien (Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90) ... 300

Tabelle 6-40 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) von 2010 bis 2050 ... 306

Tabelle 6-41 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Klimaschutzszenario 80 von 2010 bis 2050 (alle Maßnahmen, 30% Umsetzung) ... 308

Tabelle 6-42 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Klimaschutzszenario 90 von 2010 bis 2050 (alle Maßnahmen, 95% Umsetzung) ... 310

Tabelle 6-43 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Klimaschutzszenario 90 von 2010 bis 2050 (alle Maßnahmen, 95% Umsetzung) ... 311

Tabelle 7-1 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nach Gasen, 2005–2050 ... 312

Tabelle 7-2 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nach Quellbereichen, 2005–2050 ... 313

Tabelle 7-3 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80, 2005–2050 ... 315

Tabelle 7-4 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80 nach Quellbereichen, 2005-2050 ... 316

Tabelle 7-5 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 90, 2005–2050 318

Tabelle 7-6 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 90 nach Quellbereichen, 2005-2050 319

Tabelle 7-7 Vergleich der Emissionsminderungen der drei Sektoren im Jahr 2050 gegenüber 1990 und Vergleich der Erreichung der Ziele von 80 % (KS 80) bzw. 90 % (KS 90) Emissionsminderungen..... 322

Tabelle 7-8 Vergleich der Dynamik der Emissionsminderungen..... 325

Tabelle 8-1 Übersicht der gesamtwirtschaftlichen Effekte 327

Tabelle 9-1 Vergleich der Szenarienergebnisse mit den Zielen des Energie- und Klimaschutzkonzepts der Bundesregierung 330

Tabelle 9-2 Gesamte und erneuerbare Stromimporte in den Jahren 2020–2050 332

Tabelle 9-3 Abschätzung zusätzlicher Emissionsminderungen im Stromsektor für das Jahr 2020 des KS 80 gegenüber dem Energiekonzept 333

1 Einleitung

Die Bekämpfung des globalen Klimawandels ist eine der zentralen Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Sie erfordert eine massive Minderung der Treibhausgasemissionen und damit deutliche Veränderungen des Energiesystems, aber auch eine deutliche Umgestaltung vieler Wirtschaftsbereiche. Den Industriestaaten kommt in der notwendigen Wende eine besondere Rolle zu. Sie sind angesichts ihrer langen Industrialisierungsgeschichte wesentlich verantwortlich für den bereits eingetretenen, wie auch den absehbaren Klimawandel, gleichzeitig verfügen insbesondere sie über die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Kapazitäten und das Innovationspotenzial, um die Voraussetzungen für die notwendigen globalen Veränderungen zu schaffen.

Vor diesem Hintergrund hat sich Deutschland mit dem Energiekonzept 2010/2011 einen Satz von energie- und klimapolitischen Zielen gegeben, die den Weg zur Dekarbonisierung der Volkswirtschaft bzw. zur Umstellung auf ein energieeffizientes und im Wesentlichen auf erneuerbaren Energien beruhendes Energiesystem markieren. Für die Erreichung der umfassenden Klimaschutzziele wird es jedoch auch notwendig sein, auch andere Sektoren in die entsprechenden Anstrengungen einzubeziehen.

Viele für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen entscheidende Sektoren sind durch sehr langlebige Kapitalstöcke geprägt. Dies bedeutet, dass die energie- und klimapolitischen Langfristziele für wichtige Bereiche innerhalb nur eines Modernisierungszyklus umgesetzt werden müssen (oder andernfalls mit erheblichen Kosten verbunden sein können). Weiterhin sind umfangreiche Maßnahmen notwendig, die an erhebliche Vorlaufzeiten gebunden sind. Dazu gehören Infrastrukturentwicklung, aber auch Innovationsprozesse für viele Bereiche. Damit benötigt Energie- und Klimapolitik im Kontext massiver Treibhausgasminderungen immer auch umfassende quantitative Analysen, um Handlungsnotwendigkeiten und -fenster identifizieren, politische Instrumente und Strategien spezifizieren sowie Kosten optimieren zu können. Instrumentenorientierte Szenarienanalysen und die instrumentenorientierte Auswertung quantitativer Analysen können hier eine wesentliche Rolle spielen.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat in diesem Kontext das Konsortium aus Öko-Institut und Fraunhofer-ISI mit einem Projekt beauftragt, in dem Szenarien mit verschiedenen klimapolitischen Ambitionsniveaus für den Zeithorizont bis 2050 erstellt und analysiert werden sollen. Zentrale Fragestellungen sind dabei, welches Zielniveau bei Fortschreibung der aktuellen Energie- und Klimapolitik erreicht werden könnte, welche Maßnahmen und Strategien notwendig sein werden, um die Klimaziele zu erreichen, welche Kosten/Nutzen-Relationen sich für Verbraucher und die Volkswirtschaft ergeben werden und welche Verteilungseffekte entstehen können. Angesichts des gerade derzeit sehr dynamischen energiewirtschaftlichen und politischen Umfeldes sollen diese Szenarien über einen Zeitraum von 3 Jahren jeweils jährlich aktualisiert werden.

In diesem ersten Endbericht werden die Ergebnisse der ersten Modellierungsrunde präsentiert.

In Kapitel 3 erfolgt eine ausführliche Beschreibung der methodischen Ansätze der einzelnen Sektoren und der gesamtwirtschaftlichen Abschätzung.

In Kapitel 4 werden die Rahmendaten und Potenzialrestriktionen beschrieben, die für die Szenarienentwicklung relevant sind.

In Kapitel 5 werden die Projektionen zum Energieverbrauch und zur Energieerzeugung der im Rahmen dieses Projekts integriert modellierten Sektoren beschrieben, die schließlich in den Kapiteln 5.9 und 5.10 hinsichtlich des Primär- und Endenergiebedarfs und in Kapitel 5.11 hinsichtlich der energiebedingten Treibhausgasemissionen zusammengefasst werden.

In Kapitel 6 folgt die Projektion der nicht-energiebedingten Treibhausgasemissionen nach einzelnen Sektoren untergliedert (Industrieprozesse, Abfallwirtschaft und Landwirtschaft), wonach schließlich in Kapitel 7 der Verlauf der gesamten Treibhausgasemissionen dargestellt wird. In Kapitel 9 wird ein Vergleich der Szenarienergebnisse mit den Zielen des Energie- und Klimaschutzkonzepts der Bundesregierung vorgenommen und Kapitel 10 beinhaltet die verwendete Literatur.

Eine gesamtwirtschaftliche Modellierung der Szenarien wurde zwar vorgenommen, ist aber nicht Bestandteil dieses Berichts.

2 Beschreibung Szenarien

In dieser Studie werden jeweils drei (Klimaschutz-)- Szenarien mit dem Zeithorizont 2050 erstellt. Kern und Grundlage der Szenarienentwicklung sowie der entsprechenden Analysen bildet dabei das System von Zielvorgaben für Deutschland, das mit dem Energiekonzept 2010/2011 auf die energie- und klimapolitische Agenda gesetzt worden ist. Mit dem Energiekonzept und der Ergänzung dieses Konzepts um den beschleunigten Ausstieg aus der Kernenergie ist für Deutschland ein Satz von energie- und klimapolitischen Zielen etabliert worden, der einerseits sowohl die kurz-, mittel- und langfristige Perspektive adressiert als auch umfassen angelegt ist (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1 Zieldatensatz des Energiekonzepts 2010/2011 und Rahmenvorgaben für die Klimaschutzszenarien

	Treibhaus-gas-Emissionen	Erneuerbare Energien		Minderung Energiebedarf			
		Brutto-Endenergie	Strom-erzeugung	Primär-energie	Gebäude-Wärme	Endenergie Verkehr	Strom-verbrauch
2020	**-40%**	**18%**	**35%**	**-20%**	**-20%**	**-10%**	**-10%**
2030	-55%	30%	50%				
2040	-70%	45%	65%				
2050	**-80 [bis -95%]**	**60%**	**80%**	**-50%**	**-80%**	**-40%**	**-25%**
Basis	1990			2008	2008	2005	2008

Quelle: BMU (2011)

Jeweils drei verschiedene Szenarienausprägungen wurden in diesem Projekt analysiert:

- Das Aktuelle-Maßnahmen-Szenerio (2012) (AMS (2012)): In diesem Szenario werden alle Maßnahmen berücksichtigt, die bis Oktober 2012 ergriffen worden sind, und bis 2050 fortgeschrieben. Dieses Szenario bildet den Ist-Stand der energie- und klimapolitischen Rahmensetzungen ab.
- Das „Klimaschutzszenario 80“ (KS 80): In diesem Szenario sollten die im Energiekonzept der Bundesregierung festgelegten Ziele für Treibhausgasemissionen, erneuerbare Energien und Energieeffizienz möglichst erreicht werden, wobei für das Treibhausgasziel der weniger ambitionierte Wert in Ansatz gebracht werden sollte.
- Das „Klimaschutzszenario 90“ (KS 90): In diesem Szenario sollte bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 90% gegenüber 1990 erreicht werden.

3 Methodik

3.1 Methodischer Ansatz für die Projektionen der drei Szenarien

Die Erstellung der Projektionen in den Szenarien erfolgt auf der Basis von Annahmen für

- Bevölkerungsentwicklung
- Wirtschafts- und Wirtschaftsstrukturentwicklung
- Energiepreisentwicklungen
- Politiken und Maßnahmen.

Die Ermittlung der entsprechenden Treibhausgasemissionen nach Quellbereichen sowie der notwendigen Hintergrundinformationen und -indikatoren für den Bericht folgt für die verschiedenen Sektoren unterschiedlichen methodischen Ansätzen bzw. basiert auf unterschiedlichen Modellinstrumentarien, die für die verschiedenen Bereiche auf Basis der verfügbaren Daten und Informationen eine adäquate Analyse erlauben. Die Treibhausgasbilanzierung folgt dabei der Logik des Nationalen Inventarberichts 2012 (UBA 2012a).

Für die energiebedingten Treibhausgasemissionen aus Verbrennungsprozessen basieren die Analysen auf einem komplexen System verschiedener Modelle (Abbildung 3-1):

- Für den Gebäudesektor (Wärmebedarf der Wohn- und Nichtwohngebäude) wird das Modell INVERT/EE-Lab des Fraunhofer ISI genutzt (siehe Abschnitt 3.2.1).
- Die Analysen für den Strom- und Brennstoffbedarf der Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) erfolgt mit der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI, die auf einzelnen Sektormodellen beruht (siehe Abschnitte 3.2.2 und 3.2.3).
- Analysen für den verbleibenden Brennstoff- und Strombedarf (Haushaltsgeräte, Beleuchtung, Klimatisierung) in privaten Haushalten werden ebenfalls mit der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI durchgeführt (siehe Abschnitt 3.2.4).
- Für die Analyse des Verkehrssektors findet eine übergreifende Modellierung mit Modellen des Öko-Instituts TEMPS[1] sowie des Fraunhofer ISI ASTRA-D[2] statt (siehe Abschnitt 3.2.5).
- Die Stromerzeugung auf Basis fossiler Energieträger sowie die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien werden mit den Modellen des Öko-Instituts (ELIAS/PowerFlex) und des Fraunhofer ISI (PowerACE) analysiert (siehe Abschnitt 3.2.6).

---

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

[2] **As**sessment of **Tra**nsport Strategies-**D**eutschland

- Die Integration des Mengengerüsts für den Energieverbrauch, die Ermittlung des Primärenergieverbrauchs sowie des Energieeinsatzes in den anderen Umwandlungssektoren wird mit dem Integrationsmodell des Öko-Instituts durchgeführt.

Für die Modellierung des Energiesektors wird eine Reihe von Iterationsläufen notwendig:

- zur Ermittlung des Stromverbrauchs aus den Endverbrauchs- und Umwandlungsbereichen als Eingangsgröße für die Strommarktmodellierung;
- zum Abgleich der Wärmeerzeugung aus KWK-Anlagen in der öffentlichen, industriellen und Objektversorgung und dem Wärmebedarf in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und private Haushalte.

Abbildung 3-1 Modellübersicht zur Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen

Quelle: Öko-Institut

Die Emissionsermittlung für die Treibhausgasemissionen aus Verbrennungsprozessen erfolgt mit dem Emissionsmodell des Öko-Instituts, dass die Energiebedarfsprojektionen für die verschiedenen Endverbrauchs- und Umwandlungssektoren in der Systematik der Nationalen Treibhausgasemissionen emissionsseitig bewertet.

Für die flüchtigen Emissionen des Energiesektors erfolgt im Emissionsmodell des Öko-Instituts eine quellgruppenspezifische Modellierung auf Basis des Mengengerüstes für die Energienachfrage und -bereitstellung sowie den für das Nationale Treibhausgasinventar genutzten Methoden.

Für die Emissionen aus Industrieprozessen werden drei verschiedene Ansätze verfolgt:

- Für die prozessbedingten Emissionen mit Bezug zum Energiesektor werden die Emissionen auf Basis des Mengengerüstes für die Energienachfrage- und -bereitstellung im Emissionsmodell des Öko-Instituts mit den für das Nationale Treibhausgasinventar verwendeten Methoden ermittelt.
- Für die prozessbedingten Emissionen ohne Bezug zum Energiesektor werden die Emissionen auf der Basis von Produktionsschätzungen im Emissionsmodell des Öko-Instituts mit den für das Nationale Treibhausgasinventar verwendeten Methoden ermittelt. Für die N_2O-Emissionen aus der Adipin- und Salpetersäureproduktion erfolgte eine gesonderte Modellabschätzung (Abschnitt 6.1.1).
- Für die HFKW-, FKW- und SF_6-Emissionen werden vorliegende Projektionen aktualisiert und angepasst (Abschnitt 3.2.8).

Für die Treibhausgasemissionen aus der Abfallwirtschaft wird das für die Erstellung der Nationalen Treibhausgasinventare verwendete Multi-Phasen-Abfallmodell des Öko-Instituts für die Projektion erweitert (Abschnitt 3.2.9).

Die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft werden auf Basis der vom Johann Heinrich von Thünen-Institut (Offermann et. al, 2012) erstellten Projektionen abgeleitet (Abschnitt 3.2.10).

Die Treibhausgas-Emissionen im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) werden mit Hilfe eines vom Öko-Institut entwickelten Modells abgeleitet (Abschnitt 3.2.11).

Zur Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen wurde zusätzlich ein Verfahren der Komponentenzerlegung in Ansatz gebracht, mit dem über eine Dekompositionsanalyse die Emissionsentwicklung durch die Entwicklung von Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, die gesamtwirtschaftliche Energieproduktivität, den Anteil der fossilen Energien am gesamten Primärenergieaufkommen sowie die Treibhausgasintensität der genutzten fossilen Energieträger beschrieben werden kann.

3.2 Modellierungsansätze der Sektoren

3.2.1 Wärmebedarf im Gebäudebereich

Das Bottom-up-Gebäudemodell ERNSTL/EE-Lab/INVERT stellt die Entwicklung des Gebäudebestandes und der eingesetzten Technologien für Heizung, Kühlung und Warmwasserbereitstellung stark disaggregiert dar und simuliert dynamisch die Entscheidungen der Investoren über die Zeit. Das Model bildet die Veränderungen des betrachteten Endenergiebedarfs aufgrund der Änderungen des Gebäudebestandes (Abriss, Neubau, Sanierungen) sowie der eingesetzten Gebäudetechnik (Austausch). Anschließend folgen die Berechnung der Energiekosten anhand des Energiebedarfes und die Berechnung der Investitionen auf Basis der Investitionsentscheidungen.

Basisdaten

Bei der Abbildung des Gebäudebestandes wird entsprechend der Deutschen Gebäudetypologie des IWU (Diefenbach 2007) in verschiedene Gebäudekategorien (z.B. Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser in unterschiedlichen Größen, Hotels, öffentliche Gebäude etc.) unterschieden. Jede dieser Gebäudekategorien ist nach der Typologie weiter nach Bauperioden bzw. dem thermischen Standard unterteilt. Dabei werden auch in der Vergangenheit bereits stattgefundene Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt, die ebenfalls vom IWU erhoben wurden (Diefenbach 2010). Jeder der sich daraus ergebenden Gebäudeklasse wird anschließend ein Set an Heiz- und Warmwassersystemen bzw. Klimatisierungstechnologien zugeordnet, denen wiederum ein bestimmter Energieträger gegenübersteht.

Investitionsentscheidungen

Zu jedem Zeitschritt wird zwischen den verschiedenen Investitionsalternativen entschieden. Diese Entscheidung basiert im Detail auf einem stochastischen, nicht rekursiven, myopischen, betriebswirtschaftlichen Optimierungsalgorithmus mit der Zielfunktion der Kostenminimierung. Nebenbedingungen bilden dabei hauptsächlich die Ressourcenverfügbarkeit, die Marktdurchdringungsrate und deren Änderung, die Austausch- und Renovierungsrate ausgedrückt als technische Lebensdauern. Die Zielsetzung wird aus Sicht des Investors unter Annahme unvollständiger Information, d.h. unter Unsicherheit, optimiert. Auf diese Weise erfolgt die Einbindung und Charakterisierung der Akteure als Entscheidungsträger für gebäudebezogene Investitionen.

Der integrierte Einsatz eines multinomialen Logit-Ansatzes führt zusätzlich dazu, dass günstigere Technologien höhere Marktanteile erhalten während teurere Alternativen sich im Sinne von Nischenanwendungen positionieren können.

Die beschriebene Methode wird sowohl für die Auswahl des neuen Heizsystems als auch für die Selektion der Sanierungsvariante verwendet. Als Sanierungsvarianten wird die Vollsanierung in vier verschiedenen Alternativen mit energetisch ansteigender Qualität zur Auswahl gestellt. Die Investitionen werden entsprechend der Entscheidung für Sanierungsvariante und Heizsystem bewertet.

Abbildung 3-2 Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab

Quelle: Kranzl (2012)

Berechnung des Heizwärmebedarfs

Die Berechnung des Heizwärmebedarfes erfolgt entsprechend der für den Energieausweis relevanten Norm DIN EN 832:2003-06 in Verbindung mit DIN V 41086:2003-06[3] und DIN V 4701-10:2003-08. Die Methode entspricht somit der Berechnung der Kenngrößen des Energieausweises.

Der Endenergiebedarf basiert auf dem Heizwärmebedarf und bezieht zusätzlich Verluste wie z.B. durch Verteilung, Umwandlung (Effizienz des Heizsystems) mit ein. Diese Verluste werden durch Faktoren repräsentiert, die technisch durch die Systeme bestimmt sind. Ein weiterer Faktor bildet von der Norm abweichendes Nutzerverhalten ab. Bei Normbeheizung und -lüftung des Gebäudes wird in der Regel nicht der real gemessene Endenergieverbrauch dargestellt. Um die Energiebilanzen, die den tatsächlichen Energieeinsatz wiedergeben, abbilden zu können wird das Modell mit Hilfe dieses Parameters entsprechend kalibriert. Methodisch basiert der Faktor für das Nutzerverhalten auf Loga et al. (2003), Born et al. (2003) sowie Biermayr (1999), definiert die gebäude- und wärmebereitstellungsabhängige Differenz zwischen Norm- und Realbeheizung.

3.2.2 Industrie

Für die Erstellung von Szenarien zur Entwicklung von THG-Emissionen und Energiebedarf in den Sektoren Industrie, GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) sowie Haushaltsgeräte wird das Energienachfragemodell FORECAST eingesetzt.

Methodisch basiert das Modell FORECAST auf einem technologiespezifischen Bottom-up-Ansatz, welcher erlaubt die zukünftige Entwicklung von Energieverbrauch und THG-Emissionen an die technologische Entwicklung in den Sektoren zu knüpfen. Dieser Ansatz ermöglicht zum einen technologische Trends und ihre Auswirkungen auf die Dynamik des Energieverbrauchs zu berücksichtigen. Zum anderen erlaubt er Rückschlüsse auf die Realitätsnähe der Energieszenarien, indem jedem Szenario eine spezifische technologische Entwicklung zugrunde liegt.

Das Modell FORECAST ist entsprechend der Energiebilanzen auf der Ebene der Endenergie in die Sektoren Industrie, GHD, Haushalte und Übrige (Primärsektor, Transport und Rest) aufgeteilt. Wenngleich die generelle Methodik der Modellierung in den jeweiligen Sektormodulen vergleichbar ist (bottom-up, Simulation, keine übergeordnete Optimierung), so unterscheidet sich der Aufbau der Sektormodule teils deutlich, abhängig von Datenverfügbarkeit und technologischer Struktur. Die einzelnen Module berücksichtigen somit die strukturellen Charakteristika der Sektoren.

Die Struktur der Sektormodule basiert für alle Sektoren auf einem vergleichbaren Vorgehen, welches in zwei generelle Schritte unterteilt werden kann.

[3] geändert durch Berichtigung 4108-6:2004-3

1. Zunächst werden für jedes Szenario die wesentlichen Bestimmungsfaktoren (Aktivitätsgrößen bzw. „Treiber“) bestimmt, deren Entwicklung eine möglichst direkte Korrelation mit dem Energieverbrauch aufweist (Anzahl Haushalte, industrielle Produktion, Anzahl Beschäftigte). Prognosen dieser Aktivitätsgrößen ermöglichen eine Projektion des Energieverbrauchs, die zunächst technologischen Wandel zu gesteigerter Energieeffizienz unberücksichtigt lässt (Frozen-Efficiency).
2. In einem zweiten Schritt wird die Entwicklung der Technologiestruktur modelliert, welche sich auf die Energieintensität auswirkt. Jedes der drei Modelle berücksichtigt die Charakteristika von Technologiestruktur und Energieverbrauch des jeweiligen Sektors. Während für die Haushalte der Bestand an Geräten über Verschiebungen zwischen den Effizienzklassen explizit modelliert wird, wird der technische Wandel in der Industrie über die Diffusion von neuen und effizienteren Techniken oder Verfahren modelliert. Die Diffusionsgeschwindigkeit hängt direkt mit der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zusammen. Um jedoch auch die Tatsache zu berücksichtigen, dass selbst wirtschaftliche Maßnahmen mit sehr kurzer Amortisationszeit aufgrund verschiedenster Hemmnisse nur langsam Verbreitung finden, wird das Kriterium für die Wirtschaftlichkeit deutlich ambitionierter als für andere Investitionen angenommen (Z.B. interner Zinsfuß für die Barwertberechnung von 70%).

Die wichtigsten Eingangsdaten (Aktivitätsgrößen, ökonomische Rahmendaten sowie Technologiedaten) je Modul sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1 Eingangsparameter der Sektormodule des Modells FORECAST

Eingangsparameter	***FORECAST-Industry*** *(Industrie)*	***FORECAST-Tertiary*** *(Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD))*	***FORECAST-Residential*** *(Haushalte)*
Aktivitätsgrößen	- Tonnenproduktion - Wertschöpfung	- Fläche je Beschäftigtem - Anzahl Beschäftigte	- Anzahl der Haushalte - Gebäudefläche
Preise	- Energieträgerpreise (Industrie) - EUA Preise	- Energieträgerpreise (Gewerbe)	- Energieträgerpreise (Haushalte)
Energiebilanzen und Emissionsfaktoren	- AGEB Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger	- AGEB Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger	- AGEB Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger
Technologiedaten	**Prozesse:** - Spez. Energieverbrauch **Einsparoptionen:** - Einsparpotenzial - Kosten - Lebensdauer - Diffusion	**Energiedienstleistungen:** - Technologietreiber - Installierte Leistung - Jährliche Volllaststunden **Einsparoptionen:** - Einsparpotenzial - Kosten - Lebensdauer - Diffusion	**Geräte (je Effizienzklasse)** - Marktanteil - Spez. Energieverbrauch - Lebensdauer - Standby Leistung - Standby Dauer **Gebäude** - Dämmniveau - Nutzungsgrad Heizsystem - Marktanteile Wärme- und Beleuchtungstechn.

Quelle: FORCAST (Fraunhofer ISI)

Im Folgenden wird das Sektormodul FORECAST-Industry beschrieben, während das Modul FORECAST-Tertiary in Kapitel 3.2.3 und FORECAST-Residential im Kapitel 3.2.4 beschrieben ist.

FORECAST-Industry

Das Modul FORECAST-Industry ist aus einer Entwicklungslinie hervorgegangen, die auf das in den 90er Jahren entwickelte IKARUS Modell zurück blickt. Die Modellstruktur ist stark von der hohen Heterogenität des Industriesektors geprägt. Somit werden die energieintensiven Prozesse möglichst detailliert abgebildet, und die hohe Anzahl sehr heterogener Prozesse in einer stärker aggregierten Form.

Das Modul FORECAST-Industry ist hierarchisch aufgebaut und unterteilt die Industrie anhand der Energiebilanzen auf einzelne Wirtschaftszweige bzw. Branchen. Den Branchen sind Prozesse zugeordnet, welche durch einen spezifischen Energieverbrauch und eine Aktivitätsgröße beschrieben werden. Letztere ist in den meisten Fällen die Produktion in Tonnen. Die Definition eines Prozesses ist dabei generell sehr offen gehalten. Er kann eine gesamte Kette an Verarbeitungsschritten bis zu Herstellung des fertigen Produkts enthalten, er kann auf der anderen Seite aber auch einen einzelnen Verarbeitungsschritt darstellen, der besonders energieintensiv ist. Die Abgrenzung

richtet sich hier je nach Prozess nach der Datenverfügbarkeit und der Energieintensität. Auf der untersten Ebene sind den einzelnen Prozessen schließlich Einsparoptionen zugeordnet. Einsparoptionen enthalten Daten zum Einsparpotenzial, zur möglichen Diffusion im Anlagenbestand und zu den Kosten sowie der Lebensdauer. Durch die Diffusion tragen die Einsparoptionen dazu bei, dass sich der spezifische Energiebedarf des Prozesses reduziert und dadurch auch der Energiebedarf des Sektors, dem Prozess zugeordnet ist, bzw. der Industrie als Ganzes. Einsparpotenziale ergeben sich somit auf Ebene der einzelnen Einsparoptionen, als auch höher aggregiert auf Ebene der Prozesse und Branchen, indem alternative Szenarien bezüglich der Diffusion der Einsparoptionen verglichen werden.

Neben den Prozessen sind jeder Branche auch Querschnittstechnologien zugeordnet. Diese werden in ähnlicher Form branchenübergreifend eingesetzt und erlauben so eine relativ breite Abbildung der Technologiestruktur auch in Bereichen mit sehr heterogenen Produktionsprozessen und einer hohen Vielzahl an Produkten.

Abbildung 3-3 Schematische Darstellung der Modellhierarchie am Beispiel des Papiergewerbes

Quelle: Eigene Darstellung

Die **Branchenstruktur** des Industriemodells (Tabelle 3-2) orientiert sich an der Einteilung der Energiebilanzen. Nach Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2003) umfasst sie die beiden Sektoren „Verarbeitendes Gewerbe“ (WZ 2003 Nr. “C“) und Teile des Sektors „Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden“ (WZ 2003 „B“), die nicht der Energiegewinnung dienen.

Tabelle 3-2 Branchenstruktur von FORECAST-Industry

Bezeichnung	WZ 2003 Nummer
Gewinnung von Steinen und Erden	10.30, 12, 13, 14
Ernährung und Tabak	15, 16
Papiergewerbe	21
Grundstoffchemie	24.1
Sonstige chemische Industrie	24 ohne 24.1
Gummi- u. Kunststoffwaren	25
Glas u. Keramik	26.1, 26.2, 26.3
Verarbeitung v. Steine u. Erden	26 ohne 26.1, 26.2 und 26.3
Metallerzeugung	27.1
NE-Metalle, -gießereien	27.4, 27.5
Metallbearbeitung	27 ohne 27.1, 27.4 u. 27.5 einschl. 28
Maschinenbau	29
Fahrzeugbau	34, 35
Sonstige Wirtschaftszweige	Restl. Nummern von C

Quelle: FORCAST (Fraunhofer ISI)

Für die Wirtschaftszweige Gewinnung von Steinen und Erden, sonst. Bergbau, Maschinenbau, Metallverarbeitung, Fahrzeugbau und das sonstige Verarbeitende Gewerbe wird keine Tonnenproduktion berücksichtigt, da die Struktur dieser Sektoren mit einer Vielzahl verschiedener Produkte sehr heterogen ist. Somit basieren die Projektionen in diesen Sektoren ausschließlich auf den Prognosen für die Entwicklung der Wertschöpfung.

Auf Ebene der **Prozesse** wird über die Tonnenproduktion je Prozess und dessen spezifischen Energieverbrauch der absolute Energiebedarf je Prozess berechnet. Die Tonnenproduktion ist direkter an den Energieverbrauch gekoppelt als die Wertschöpfung, da z. B. eine Erhöhung der Wertschöpfung nicht zwangsläufig eine für den Energieverbrauch relevante Produktionssteigerung widerspiegeln muss. Im Gegensatz zur Wertschöpfung ist die physische Produktion direkt mit dem Energieverbrauch gekoppelt. Im Modul FORECAST-Industry werden ca. 70 der energieintensivsten Produkte bzw. Prozesse separat anhand ihrer Tonnenproduktion abgebildet (siehe Tabelle 3-3). Diese energieintensiven Produkte machen mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs der Industrie aus. Der verbleibende Energieverbrauch je Branche, der auf eine sehr viel größere Anzahl von Prozessen und Anlagen zurückzuführen ist, wird anhand der Wertschöpfung fortgeschrieben. Branchen, in denen aufgrund der sehr heterogenen Struktur keine einzelnen Prozesse berücksichtigt werden, werden ausschließlich anhand der Wertschöpfung und der Verbreitung von Querschnittstechnologien modelliert.

Tabelle 3-3 Prozessstruktur des Moduls FORECAST-Industry

Steine-Erden Klinker Brennen (trocken) Klinker Brennen (halbtrocken) Klinker Brennen (feucht) Aufbereitung von Kalkstein Gips Zementmahlen Kalkmahlen Ziegel Kalkbrennen	**Nicht-Eisen Metalle** Aluminium primär Aluminium sekundär Aluminium Strangpressen Aluminium Gießereien Aluminium Walzen Kupfer primär Kupfer sekundär Kupferbearbeitung Primärzink Sekundärzink	**Grundstoffchemie** Adipinsäure Ammoniak Calciumcarbid Industrieruß Chlor, Diaphragma Chlor, Membran Chlor, Amalgan Ethylen Methanol Salpetersäure Sauerstoff Polycarbonat Polyethylen Polypropylen Polysulfone Soda TDI Titandioxid
Ernährungsgewerbe Zucker Molkerei Bierbrauen Fleischverarbeitung Backwaren Stärke	**Metallerzeugung** Sintern Oxygenstahl - Hochofen Elektrostahl - EAF Walzstahl Koksofen Schmelzreduktion Direkte Reduktion	**Papiergewerbe** Papier Zellstoff - Verfahren Holzstoff - Verfahren Altpapierstoff
Glas Behälterglas Flachglas Glasfasern Übriges Glas	**Keramik** Haushalts- und Sanitärkeramik Technische Keramik Fliesen, Platten, Feuerfestkeramik	**Kunstoffverarbeitung** Extrusion Spritzgießen Blaßformen

Quelle: FORCAST (Fraunhofer ISI)

Bezüglich der Technologiestruktur können prozessspezifische Technologien und **Querschnittstechnologien** unterschieden werden. Prozessspezifische Technologien können einzelnen Prozessen des Industriesektors eindeutig zugewiesen werden – als Beispiel kann der Hochofenprozess bei der Stahlherstellung genannt werden. Querschnittstechnologien finden in sämtlichen Branchen und verschiedenen Prozessen Anwendung: Elektromotoren werden zum Beispiel sowohl in der Papierherstellung als auch in der Stahlherstellung eingesetzt.

Querschnittstechnologien sind unterteilt in Anwendungen, die Strom verbrauchen und solche, die Wärme bereitstellen:

- Stromseitig: Vorwiegend Elektromotoren und Arbeitsmaschinen wie Kompressor, Ventilator oder Pumpe samt der dazugehörigen Systeme zur Bereitstellung von mechanischer Energie oder Kälte. Weiterhin Beleuchtungsanlagen.
- Wärmeseitig: Industrielle Verbrennungsanlagen im Temperaturbereich unterhalb 500°C (Heizkessel, industrielle Dampferzeuger). Anlagen im höheren Temperaturbereich sind häufig sehr prozessspezifisch und werden somit in den einzelnen Prozessen berücksichtigt. Weiterhin in diesem Modul berücksichtigt ist der Raumwärmebedarf und die Möglichkeit Abwärme in Niedertemperaturprozessen einzusetzen.

Jedem Prozess als auch jeder Querschnittstechnologie sind **Einsparoptionen** zugeordnet, z.B. in Form neuer Technologien oder organisatorischer Maßnahmen. Einsparoptionen sind die folgenden Charakteristika hinterlegt:

- Einsparpotenzial Strom
- Einsparpotenzial Brennstoffe
- Verbreitung Basisjahr
- Diffusionspfad „Wirtschaftliche Diffusion“
- Diffusionspfad „Technische Diffusion“
- Einmalige Differenzkosten der Investition
- Laufende Differenzkosten der Investition
- Lebensdauer

Einsparoptionen reduzieren den spezifischen Strom- oder Brennstoffbedarf einzelner Prozesse, indem sie durch den Anlagenbestand diffundieren. Die Diffusionsgeschwindigkeit bestimmt also die Effizienzverbesserung des zugeordneten Prozesses und damit die Entwicklung des absoluten Energieverbrauchs. Das Modell unterscheidet vier Definitionen von „Diffusionsgeschwindigkeiten“, die in Einsparpotenziale übertragbar sind.

Abbildung 3-4 Zusammenhang von Diffusionsgeschwindigkeit und Einsparpotenzialen

Quelle: Eigene Darstellung

Die Marktdiffusion resultiert aus einer Fortschreibung des historischen Trends der Technologiediffusion und setzt damit voraus, dass die bestehenden Hemmnisse weiterhin erhalten bleiben. Somit entspricht die Marktdiffusion einer „Business-as-usual" Entwicklung auf Ebene der Einsparoptionen.

Die wirtschaftliche Diffusion setzt voraus, dass alle wirtschaftlichen Einsparoptionen von Firmen umgesetzt werden und lässt Hemmnisse außer Acht. Die Wirtschaftlichkeit der Einsparoptionen kann dabei über unterschiedliche Kriterien ermittelt werden, wie einer klassischen Investitionsrechnung, die Auszahlungen und Einzahlungen diskontiert und einen Barwert bzw. Annuitäten berechnet. Hierbei stellen die Investitionen und die Wartungskosten die Auszahlungen dar, während die eingesparten Energiekosten die Einzahlungen sind. Weiterhin wird trotz der für industrielle Anlagen teilweise sehr langen Lebensdauer von über 20 oder 30 Jahren für die Investitionsrechnung eine kürzere Lebensdauer von 5 bis 10 Jahren unterstellt. Der Planungshorizont, der für die Investitionsrechnung kürzer gehalten wird, stellt für das wirtschaftliche Potenzial eher eine Unternehmensperspektive dar[4]. Für die Diskontierung wird häufig ein Zinssatz zwischen 10 und 20 % unterstellt. Für jeden Prozess wird im Modell einzeln berücksichtigt, ob er im Emissionshandel enthalten ist oder nicht und so entsprechend die

[4] Diese 5-10 Jahre als Grundlage für die Investitionsrechnung sind nicht zu verwechseln mit der Amortisationszeit, die in vielen Unternehmen für Effizienztechnologien maximal 2-3 Jahre betragen darf. Die Amortisationszeit ist jedoch nur ein Maß für das Risiko der Investition und wird deshalb nicht für die Wirtschaftlichkeitsbewertung genutzt.

Preise für Emissionszertifikate in die Berechnungen einbezogen. Alternativ ermöglicht das Modell auch, die Amortisationszeit als Entscheidungskriterium zu wählen. Diese wird häufig von Unternehmen angewendet um Effizienzmaßnahmen zu bewerten und liegt damit näher am realen Verhalten der Unternehmen, die häufig Amortisationszeiten von wenigen Jahren als Kriterium unterlegen.

Für die Wirtschaftlichkeit der Investition ist darüber hinaus entscheidend, ob Vollkosten oder Differenzkosten der Effizienztechnologien zugrunde gelegt werden. Das Vollkostenprinzip würde der Einsparoption die vollen Investitionskosten für eine neue Technologie oder ein neues Verfahren zuordnen. Das Prinzip der Differenzkosten basiert auf der Annahme, dass Effizienztechnologien nur eingesetzt werden, wenn die herkömmliche Technologie ohnehin ersetzt worden wäre. Somit muss für die Kostenbewertung nur die Differenz zu den Kosten der herkömmlichen Technologie betrachtet werden. Das Differenzkostenprinzip hat auch Implikationen auf die Diffusion der Technologien, welche durch das Verbot des vorzeitigen Anlagenaustausches an die natürliche Umwälzung des Anlagenbestandes gebunden ist. Diese kann für einzelne industrielle Anlagen durchaus im Bereich mehrerer Jahrzehnte liegen. Entsprechend dauert die Diffusion der Einsparoptionen durch den gesamten Anlagenbestand in diesen Industrien relativ lange. Falls Einsparoptionen als „End-of-pipe“-Technologien realisiert werden können, so entfällt diese Restriktion der Technikdiffusion.

Die technische Diffusion berücksichtigt keine Wirtschaftlichkeitsüberlegungen. Sie basiert jedoch auf realistischen Annahmen bezüglich der Verbreitung der jeweiligen Technologien. Ein sofortiger vorzeitiger Anlagenaustausch wird ausgeschlossen und auch hier wird davon ausgegangen, dass die typische Lebensdauer der Anlagen nicht beeinträchtigt wird. Das technische Potenzial darf nicht als maximale technisch mögliche Einsparung interpretiert werden. Davon ist es weit entfernt, da bei dem gewählten technologieorientierten Ansatz immer weitere Technologien oder Möglichkeiten zum Verbessern der Energieeffizienz vorhanden sind, die nicht in der Modellierung berücksichtigt werden können. Hingegen gibt das technische Potenzial nur an, was mit den betrachteten Einsparoptionen technisch möglich wäre, ohne deren Wirtschaftlichkeit in Betracht zu ziehen.

Bei der Frozen-Efficiency Diffusion wird unterstellt, dass kein weiterer Energieeffizienzfortschritt stattfindet und die Diffusion der Einsparoptionen auf dem Niveau des Jahres 2007 stagniert. Folglich ist das Frozen-Efficiency-Szenario eine eher theoretische Vergleichsgröße, die angibt wie sich der Energieverbrauch alleine aufgrund der Produktionsentwicklung verändern würde. Sie dient häufig als Referenzwert für die Berechnung von Einsparpotenzialen.

3.2.3 Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) – außer gebäudebezogener Energiebedarf

Für die Modellierung der nicht-gebäudebezogenen Wärme- und Stromnachfrage wird das Modul FORECAST-Tertiary eingesetzt. Das Modul ist vom Aufbau vergleichbar mit

dem Industriemodul, allerdings an Datenverfügbarkeit und Technologiestruktur im Sektor GHD angepasst. D.h. im Modell wird über ein Mengengerüst der Energieverbrauch einzelner Branchen und Energiedienstleistungen in Abhängigkeit von Rahmenbedingungen (u.a. Wirtschaftsentwicklung, Effizienzpolitik, Energiepreise) berechnet.

Zentrale Aktivitätsgrößen sind die Anzahl der Beschäftigten und die Nutzfläche je Branche des Sektors GHD. Der Energieverbrauch der einzelnen Branchen setzt sich wiederum als Summe einzelner Energiedienstleistungen zusammen. Die Verbreitung von Effizienzmaßnahmen senkt den spezifischen Energieverbrauch einzelner Energiedienstleistungen und spiegelt so eine unterschiedliche Überwindung von Hemmnissen durch politische Instrumente zur Förderung der Energieeffizienz wieder bzw. variierende Energiepreise. Modelliert wird die Diffusion von Effizienzmaßnahmen als eine Summe von Investitionsentscheidungen der Unternehmen. Im Folgenden wird auf die einzelnen Ebenen Aktivitätsgrößen, Energiedienstleistungen und Technologiestruktur sowie die Modelllogik detaillierter eingegangen.

Die Aktivitätsgrößen Anzahl der Beschäftigten und Nutzfläche je Branche bilden die zentralen Größen im Mengengerüst für die Hochrechnung des Energieverbrauchs. Beide Größen sind direkter an den Energieverbrauch gekoppelt als die Wertschöpfung des Sektors. Dabei sind die Beschäftigten eher für Energiedienstleistungen wie EDV-Ausstattung relevant, während die Nutzfläche für die gebäudebezogenen Energiedienstleistungen die zentrale Größe ist. Die Sektorale Einteilung der Aktivitätsgrößen orientiert sich dabei an der Klassifizierung der Wirtschaftszweige 2003 (WZ 2003) und unterscheidet acht Branchen. Entsprechend erlaubt sie über das hinterlegte Mengengerüst eine „bottom-up“ Berechnung des Energieverbrauchs für jede der Branchen, was deutlich über die Detaillierung der Energiebilanzen nach AGEB hinaus geht, welche den Energieverbrauch nur für den Sektor GHD als Ganzes ausweisen.

Tabelle 3-4 Klassifizierung der Branchen des Sektors GHD im Modell FORECAST

Bezeichnung	**WZ 2003**
Beherbergungs- und Gaststätten	H
Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen	N
Erziehung und Unterricht	M
Groß- und Einzelhandel	G
Verkehr und Nachrichtenübermittlung	I
Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung	L
Kreditinstitute und Versicherungen	J
Sonstige Dienstleistungen (Abfall, Sport, Soziale Dienstleistungen) + Grundstücks- und Wohnungswesen	O+K

Quelle: Eigene Darstellung

Der Energiebedarf je Branche wird als Summe des Energiebedarfs von bis zu 13 einzelnen Energiedienstleistungen (EDL) berechnet, die zusammen für den Großteil des Stromverbrauchs im Sektor GHD verantwortlich sind. Beispiele für EDL sind Beleuchtung, Kühlung oder IKT-Anwendungen. Bei den meisten EDL ergibt sich die absolute Nachfrage aus der globalen Aktivitätsgröße (entweder Fläche oder Beschäftigte) und der EDL-bezogenen Aktivitätsgröße (z.B. Anteil beleuchtete Fläche). Einige EDL sind nicht an die globalen Aktivitätsgrößen geknüpft, wie z.B. die Straßenbeleuchtung.

Tabelle 3-5 Energiedienstleistungen (EDL), die für die Berechnung des Energiebedarfs je Branche summiert werden

Typ	Energie-dienstleistung	Beschreibung	Aktivitätsgröße EDL (D)	Aktivitäts-größe global (G)
El	Beleuchtung	Raumbeleuchtung	Anteil beleuchtete Gebäudefläche	Gebäude-fläche
El/Th	Klimatisierung und Lüftung	Klimatisierung und Lüftung von Räumen und Gebäuden durch raumlufttechnische Anlagen	Anteil klimatisierte und gelüftete Gebäudefläche	Gebäude-fläche
El	Umwälzpumpen	Verteilung von Fluiden in Heizungssystemen	-	Gebäude-fläche
El	IKT im Büro	PC, Monitor, Kopierer/Drucker, etc.	IKT-Ausstattung eines durchschnittlichen Arbeitsplatzes	Anzahl Beschäftigte
El	IKT Server	Server sowohl in Datencentern als auch dezentral	Anzahl der Server	-
Th	Heißwasser	Heißwasser und Prozesswärme (z.B. Reinigung)	-	Gebäude-fläche
Th	Raumwärme	Wärmepumpen und Elektrodirektheizungen	Anteil Gebäudefläche mit Elektroheizung	Gebäude-fläche
Th/El	Wäscherei	Wäscherei vorwiegend in Hotels und Gesundheitssektor	Anzahl der Betten/Gäste	-
Th/El	Kochen	Kochen in Restaurants und Gesundheitssektor	Anzahl der Gerichte, Gäste, Betten	-
El	Kühlung	Kühlung von Produkten, vorwiegend Kühlregale in Supermärkten, aber auch Restaurants und Hotels)	-	Anzahl Beschäftigte
El	Verschiedene gebäudebezogene EDL	Restgröße	Gebäudefläche	Gebäude-fläche
El	Straßenbeleuchtung	Beleuchtung von Straßen und öffentlichen Plätzen	Anzahl Lichtpunkte	-
El	Aufzüge	Zur Bereitstellung von vertikalem Transport in Gebäuden	Anzahl Aufzüge	-
El: Strombasiert (kaum substituierbar) Th: zur Wärmebereitstellung (Substituierbar durch andere Energieträger)				

Quelle: Eigene Darstellung

Das Mengengerüst zur Berechnung von Stromverbrauch und Einsparpotenzialen der Energiedienstleistungen ist dabei wie in Abbildung 3-5 dargestellt aufgebaut. Ausgehend von den globalen Aktivitätsgrößen Beschäftigte oder Nutzfläche des Subsektors wir mit Hilfe einer weiteren, der EDL zugeordneten spezifischen Aktivitätsgröße (z.B. Lichtpunkte pro Fläche oder Computer je Beschäftigtem), das absolute Nachfrageniveau nach einer Energiedienstleistung berechnet. Multipliziert mit den jährlichen Volllaststunden und der mittleren installierten Leistung ergibt sich der absolute Energiebedarf der Energiedienstleistung. Die Wirkung von Effizienzmaßnahmen setzt bei der spezifischen installierten Leistung oder den jährlichen Volllaststunden an, die abhängig von der Diffusion der Effizienzmaßnahmen gesenkt werden.

Abbildung 3-5 Vereinfachte Darstellung des "bottom-up" Mengengerüsts für den Sektor GHD im Modell FORECAST

Quelle: Eigene Darstellung

Formal ergibt sich für die Bottom-up-Berechnung des Energiebedarfs im Basisjahr folgender Zusammenhang.

$$T_t = \sum_{S=1}^{l} \sum_{E=1}^{k} G_{S,t} \times D_{S,E,t} \times P_{S,E} \times U_{S,E} \times \prod_{SO=1}^{x} (1 - DR_{S,E,SO,t} \times D_{S,E,SO})$$

mit

T	=	Stromverbrauch GHD gesamt
G_S	=	globale Aktivitätsgröße
$D_{S,E}$	=	EDL-bezogene Aktivitätsgröße
$U_{S,E}$	=	Nutzungsdauer (jährliche Volllaststunden) [h/a]
$P_{S,E}$	=	Installierte Leistung je "Einheit" EDL [W]
$D_{S,E,SO}$	=	Relatives Einsparpotenzial der Effizienzmaßnahme [%]
$DR_{S,E,SO,t}$	=	Diffusionsrate im Jahr t [Anteil der EDL]

Indizes:

S	=	Branche, l = 8
E	=	Energiedienstleistung, k = 13
SO	=	Effizienzmaßnahme, x=1 bis 5

Für die Diffusionsrate werden dabei im Modell exogen zunächst eine „technisch maximale“ Entwicklung und eine Art „autonome / business as usual“ Entwicklung hinterlegt. Diese stellen den Rahmen für die tatsächliche Entwicklung dar. Abhängig von den Energiepreisen ergibt sich eine Diffusionsgeschwindigkeit, welche zugrunde legt, dass wirtschaftliche Investitionen in Effizienzmaßnahmen durchgeführt werden. Entsprechend können mit einer höheren Wirtschhaftlichkeitsanforderung Hemmnisse simuliert werden, z.B. über eine Diskontierungsrate, die deutlich über den typischen Anforderungen von Unternehmen liegt.

3.2.4 Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung

Die Berechnungen des zukünftigen Endenergiebedarfs der Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimageräte in den privaten Haushalten erfolgt wie in den Sektoren Industrie und GHD (Kapitel 3.2.2 und 3.2.3) mit der Energienachfrageplattform FORECAST. Das Sektor-Model für den Haushaltssektor, FORECAST-Residential, setzt sich neben einem Modul für die Haushaltsgeräte auch aus Modulen für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung sowie einem Modul für die Berechnung der Stromnachfrage durch Elektromobilität zusammen, wobei im Rahmen dieser Studie ausschließlich das Geräte-Modul zum Einsatz kommt. Die anderen Teilbereiche der Endenergienachfrage des Haushaltssektors werden bereits über andere Modelle (siehe die Haushaltsgebäude in Kapitel 3.2.1und den Verkehr der privaten Haushalte in Kapitel 3.2.5) abgedeckt.

Das Geräte-Modul von FORECAST-Residential setzt sich aus folgenden Gerätekategorien zusammen, die im Modell des Weiteren nach Technologien und/oder Effizienzklassen differenziert werden:

- Große elektrische Haushaltsgeräte (darunter: Kühl- und Gefriergeräte, Spülmaschinen, Waschmaschinen, Trockner, Herde)
- Endgeräte der Informations- und Kommunikationstechnologien IKT (darunter: Desktop-Computer, PC-Bildschirme, Laptops, Fernseher, Set-Top-Boxen, Modem/Router)
- Beleuchtung
- Klimageräte
- Elektrische Kleingeräte (darunter: Kaffeemaschinen, Staubsauger, Dunstabzugshauben, Haartrockner, Bügeleisen, Mikrowelle)
- Sonstige elektrische Anwendungen: diese Kategorie stellt ein Restaggregat dar, das alle in den übrigen Bereichen noch nicht berücksichtigten elektrischen Anwendungen in den privaten Haushalten umfasst. Diese Kategorie beinhaltet sowohl eine Vielzahl an weiteren elektrischen Kleingeräten (u.a. Dunstabzugshauben, Mikrowellenherde, Bügeleisen, Fön, Toaster, Rasierer) als auch die Stromnachfrage von potentiell neuen Geräten, die bis 2050 neu in den Markt diffundieren.

Die aufgeführten Gerätekategorien beinhalten bis auf die Herde ausschließlich strombasierte Anwendungen.

Aufgrund der hohen Datenverfügbarkeit über die Anzahl und den durchschnittlichen spezifischen Energieeinsatz von Haushaltsgeräten wird deren Endenergienachfrage über ein Bestandsmodell berechnet. Da für die Berechnung der Bestandsumwälzung auch vergangenheitsbezogene Daten zu erheben sind, werden in einem vorgelagerten Schritt empirische Zeitreihen für die jahresspezifische Geräteanzahl und den spezifischen Verbrauch der Geräte (differenziert nach Betrieb und Standby) geschätzt. Die Projektion des Gerätebestandes erfolgt mittels einer logistischen Funktion, die sich aus einer kleinsten-Quadrate-Abweichung, basierend auf der empirischen Bestandsentwicklung und einer geschätzten Sättigungsgrenze, berechnet. Eine zentrale Limitation der Modellierung des Gerätebestandes anhand logistischer Funktionen ist, dass die Ausstattungsraten kontinuierlich über den Projektionshorizont ansteigen. Dies ist in der Realität jedoch nicht immer gegeben, speziell dann wenn die Energieanwendungen in Konkurrenz zu einander stehen, sofern sie dieselbe oder eine ähnliche Energiedienstleistung anbieten (z.B. Desktop-Computer und Laptops). Um diesen Effekt abzubilden wird die Berechnung von Ausstattungsraten, die sich gegenseitig beeinflussen gekoppelt um einen langfristigen Rückgang von ausgewählten Energieanwendungen abzubilden.

Die Bestandsumwälzung bzw. die Marktdiffusion neuer Geräte erfolgt anhand einer gerätespezifischen Nutzungsdauer mit normalverteilter Ausfallwahrscheinlichkeit, durch die der Zeitpunkt des Nutzungsdauer-Endes eines alten Gerätes und des Nutzungsdauer-Anfangs eines neuen Gerätes determiniert wird. Die Wahl der Technologien bzw. Effizienzklassen der ersetzten Altgeräte und des Bestandszuwachses, die als Neugeräte in den Bestand diffundieren, orientiert sich an der Ausgestaltung eines Szenarios. Die jährliche Endenergienachfrage aller Geräte errechnet sich demzufolge aus dem spezifischen Verbrauch (basiert entweder auf den Betriebsstunden bspw. bei Fernsehern oder auf der Anzahl an Zyklen pro Jahr bspw. bei Spülmaschine), der durchschnittlichen Ausstattungsrate (bei der Beleuchtung entspricht dies dem Anteil der Beleuchtungspunkte pro Wohneinheit) und der Anzahl der privaten Haushalte.

Dieser Aufbau gilt grundsätzlich für alle berücksichtigten Gerätekategorien mit Ausnahme des Restaggregats der sonstigen elektrischen Anwendungen. Bei dieser Kategorie lässt sich dieser Ansatz aufgrund der großen Heterogenität nicht durchführen. Die Stromnachfrage im Basisjahr wird für die sonstigen elektrischen Anwendungen daher als Differenz zur Stromnachfrage laut der Energiebilanz (ohne den Verbrauch für Raumwärme und Warmwasser) ermittelt und für die Zukunft anhand einer abgeschätzten Ausstattungsrate fortgeschrieben.

Um auch die Kosten für unterschiedliche Diffusionspfade in den Szenarien bestimmen zu können, wird für alle berücksichtigten Anwendungen eine Wirtschaftlichkeitsbewertung mittels der Kapitelwertmethode durchgeführt, die folgende Kostenkategorien berücksichtigt:

- Spezifische Investitionen der Geräte unter Berücksichtigung von Kostenlernfaktoren;
- Stromkosten der Geräte;

- Wartung- und Instandhaltungskosten der Geräte unter Berücksichtigung von Kostenlernfaktoren.

Eine Übersicht über die Struktur des Geräte-Modells ist in Abbildung 3-6 dargestellt.

Abbildung 3-6 Übersicht über das Geräte-Modul von FORECAST-Residential

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.5 Verkehr

Für die Analyse des Verkehrssektors findet eine übergreifende Modellierung mit Modellen des Öko-Instituts (TEMPS[5]) sowie des Fraunhofer ISI (ASTRA-D[6]) statt. Das Vorgehen für die Betrachtung des Verkehrssektors ist dabei in Abbildung 3-7 graphisch skizziert. Zunächst werden von Seite des Öko-Instituts relevante Parameter (z.B. Effizienzentwicklung der Fahrzeuge, Kraftstoffkosten) im Rahmen der Szenariodefinition festgelegt und für die Verwendung in den beiden verwendeten Modellen aufbereitet.

---

5 **T**ransport **Em**issions and **P**olicy **S**cenarios

6 **As**sessment of **Tra**nsport Strategies-**D**eutschland

Abbildung 3-7 Schematische Darstellung der Modellierung des Verkehrssektors

Quelle: Eigene Darstellung

Für die darauf folgende Abbildung des Verkehrssektors wird die inländische land- und wassergebundene Verkehrsnachfrage mit Hilfe des Modells ASTRA-D bestimmt und im Folgenden als Eingangsgröße in das Modell TEMPS integriert. Die Verkehrsnachfrage des Luftverkehrs und der Seeschifffahrt werden separat im Modell TEMPS abgeleitet. Die Grundlage für die Bestimmung der Effizienz- und Bestandsentwicklung der Fahrzeuge bildet die im Modell TEMPS hinterlegte und in mehreren Forschungsvorhaben aufgebaute Technologiedatenbank. Da die Effizienzentwicklung des Fahrzeugbestands einen relevanten Kostenfaktor für die Mobilitätskosten und somit für die Verkehrsnachfrage darstellt, wird ein iteratives Vorgehen für die Modellierung der Verkehrsleistung und der Effizienzentwicklung eingesetzt, indem die Effizienzentwicklung des Bestandes (Outputgröße aus TEMPS) als Inputgröße in die Modellierung der Verkehrsnachfrage mit ASTRA-D einfließt.

Abschließend wird der Endenergiebedarf des Verkehrssektors mit dem Modell TEMPS bestimmt und für die weitere Bearbeitung im Projekt aufbereitet. Im Folgenden wird in Kürze auf die einzelnen Modellierungsschritte eingegangen.

3.2.5.1 Szenarioentwicklung

In der Szenarioentwicklung werden relevante Parameter, die für den Einsatz der beiden verwendeten Modelle benötigt werden, mit Annahmen zu ihrer Ausprägung versehen. Die wichtigsten Input-Parameter stellen dabei die Kraftstoff- bzw. die Transportkosten, die Effizienzentwicklung der neu in den Bestand kommenden Fahrzeuge und die Struktur der Neuzulassungen der Fahrzeuge dar. Für die Ausprägung dieser Para-

meter wird an dieser Stelle auf Abschnitt 5.5.1 verwiesen, in dem die Annahmen für die einzelnen Szenarien aufgeführt sind.

3.2.5.2 Technologiedatenbasis

Die Technologiedatenbasis bildet die Grundlage für die Simulation der zukünftigen Entwicklung an Fahrzeugtechnologien. Sie dokumentiert mögliche technische Entwicklungen des jeweiligen Verkehrsträgers bis zum Jahr 2050 differenziert nach Größenklasse und Antriebsart und ist zumindest im Straßenverkehr mit Kostenannahmen versehen. Die verfügbare Technologiedatenbasis des Öko-Instituts wurde im Rahmen verschiedener Forschungsvorhabens an Hand von Literaturrecherchen entwickelt und für den Straßenverkehr in Expertenworkshops zur Diskussion gestellt.

3.2.5.3 Verkehrsnachfrage

Die Nachfrageentwicklung inländischer land- und wassergebundener Verkehre wird mit Hilfe von ASTRA-D abgeleitet und wird im Folgenden als erstes methodisch erläutert. Im zweiten Schritt wird in Kürze auf die Methodik zur Ableitung der Verkehrsnachfrage des Luft- und Seeverkehrs eingegangen.

Land- und wassergebundene Personenverkehrsnachfrage (ASTRA-D)

Sowohl die Personenverkehrs- als auch die Güterverkehrsnachfrage ist nach dem klassischen Vier-Stufen-Modell der Verkehrsnachfragebestimmung modelliert. Es wurde allerdings auf den letzten Schritt, die Netzwerkzuordnung, verzichtet, um das Modell für die Analysen operabel zu halten. Die Modellierung geschieht dabei auf Ebene von NUTS2-Zonen; darüber hinaus wurde der intrazonale Verkehr in unterschiedliche Distanzbänder unterteilt. Abbildung 3-8 zeigt schematisch, in welcher Form und mit welchen Einflussfaktoren das Vierstufenmodell in ASTRA-D implementiert ist.

Abbildung 3-8 Klassisches Vier-Stufen-Modell in der Implementierungsdichte von ASTRA-D

Quelle: Eigene Darstellung

In der ersten Stufe – der Erzeugung von Wegen – wird eine Produktionsfunktion verwendet, welche sich auf diverse sozioökonomische Faktoren stützt. Diese Faktoren sind dabei im Zeitverlauf variabel und kommen aus dem ökonomischen Teil der Modellierung von ASTRA. Die Bevölkerungsentwicklung beispielsweise wirkt sich somit direkt jahresscharf auf die Erzeugung von Wegen aus.

Zur ersten Stufe gehört ebenfalls die Zielerzeugung. Diese ist stärker von ökonomischen Faktoren abhängig. So gewinnen wirtschaftlich wachsende Regionen an Attraktivität und sind folglich z.B. vermehrt Ziel von Dienst- und Pendelfahrten.

Die zweite Stufe legt die Verteilung der Wege gemäß dem Gravitationsansatz fest. Dieser Ansatz beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Weg von einer Zone in eine andere Zone beschritten wird und besagt, dass längere Distanzen exponentiell abnehmend anzutreffen sind.

In einem ersten Schritt wird dabei die Verteilung zwischen den verschiedenen NUTS2-Zonen gesteuert; allerdings findet ein Großteil des Personenverkehrs intrazonal statt. Der zweite Schritt der Verkehrsverteilung legt dann die Zuordnung zu den intrazonalen Distanzbändern fest. Auch dies geschieht über den Gravitationsansatz.

In der Verkehrsverteilung wird als entscheidender Parameter die generalisierte Zeit verwendet, welche als Exponent in die Exponentialfunktion Eingang findet. Die Einflussgrößen sind dabei dieselben, die auch für den nächsten Schritt – die Modalwahl – eine Rolle spielen. Für die Modalwahl werden die Größen allerdings auf generalisierte Kosten vereinheitlicht. Wichtig ist diese Unterscheidung, wenn man die wirtschaftliche Entwicklung berücksichtigt: Eine Erhöhung des Wohlstandes über eine Erhöhung des BIP führt zu einer Veränderung der persönlichen Zeitkostenwerte. Um zu verhindern, dass eine Präferenzverschiebung hin zu kürzeren Zielen allein aufgrund gestiegener Einkommensverhältnisse stattfindet, muss in der Wegeverteilung auf generalisierte Zeiten und nicht auf generalisierte Kosten zurückgegriffen werden.

Die dritte Stufe innerhalb des Vier-Stufen-Modells ist die Verkehrsmittelwahl. Diese wird in ASTRA-D mittels eines Logit-Ansatzes modelliert. Hier wird die Wahrscheinlichkeit der Modalwahl mittels gekoppelter Exponentialfunktionen berechnet, wobei die Exponenten dieses Mal von den generalisierten Kosten abhängen, so dass ein höherer Kostenaufwand zu negativer Präferenz führt. Unter den berücksichtigten Verkehrsträgern befinden sich nicht motorisierte Träger (Fuß und Fahrrad), womit Verteilungswirkungen besonders gut sichtbar werden, da sich das Gesamtverkehrsaufkommen in den Szenarien – bezogen auf die Wegeanzahl – nicht verändert. Darüber hinaus können in diesem Ansatz auch weitere Einflussfaktoren auf die Modalwahl wie Komfort durch Motorisierung oder allgemeine Bewusstseinsänderungen in der Gesellschaft hin zu ökologischeren Verkehrsträgern berücksichtigt werden.

Land- und wassergebundene Güterverkehrsnachfrage (ASTRA-D)

Die Güterverkehrsnachfrage wird in ähnlicher Weise modelliert wie die Personenverkehrsnachfrage. Auch hier gibt Abbildung 3-8 einen guten Überblick über den gewählten methodischen Ansatz. Als Ausgangsbasis für die Verkehrserzeugung spielt hierbei jedoch vor allem die sektorale Wertschöpfungsentwicklung eine Rolle. Da ASTRA-D über ein detailliertes Input-Output-Modul verfügt, werden diese Werte ebenfalls unmittelbar an das Güterverkehrserzeugungsmodul übergeben.

Der Güterverkehr ist – anders als der Personenverkehr – viel stärker wirtschaftlichen Schwankungen ausgesetzt. Deswegen ist an der Stelle der Verkehrsnachfrage die Kopplung mit einer makroökonomischen Projektionsmethode von entscheidendem Vorteil und kann so direkter als stand-alone Modelle die veränderten Rahmenbedingungen der Szenarien berücksichtigen. Auch ist die weltweite wirtschaftliche Entwicklung im Güterverkehr von nicht zu vernachlässigender Bedeutung, da sie durch eine Verstärkung internationaler Handelsströme z.B. den Transitverkehr erhöht.

In der Modellierung findet die Tatsache Berücksichtigung, dass eine schrittweise Verschiebung hin zu höherwertigen Gütern stattfindet. In ASTRA werden dabei drei Güterkategorien unterschieden: Stückgüter, Mengengüter und allgemeine Frachtgüter. Die Umwälzung von der Wertschöpfung zur Verkehrsgenerierung erfolgt dabei mittels dynamisierter Wert-Mengenverhältnisse, welche die monetären Werte in Frachtvolumina übertragen.

Die Modalwahl in der Güterverkehrsnachfrage beinhaltet 3 Lkw-Klassen sowie den Bahn- und Binnenschiffverkehr. Es werden sämtliche innerdeutschen Handelsströme dieser Verkehrsmittel abgebildet.

Verkehrsnachfrage des See- und Luftverkehrs (TEMPS)

Der Flug- und der Seeverkehr werden in der Bestimmung der Verkehrsleistung separat von den übrigen Verkehrsträgern betrachtet, da eine Integration in das Nachfragemodell ASTRA-D nicht vorgesehen ist und sich diese beiden Bereiche in der Abgrenzung des Bilanzraums von den übrigen Verkehrsträgern unterscheiden.

Für den Flugverkehr werden in dieser Studie die Verkehrsleistung und die Emissionen der in Deutschland abgehenden Flüge bis zu ihrem ersten Zwischenstopp auf Basis des Flight-Stage-Prinzips dargestellt. Zur Entwicklung von Nachfrageszenarien wird die historische Entwicklung der Verkehrsleistung in Abhängigkeit zur Einwohnerzahl (Personenverkehr) bzw. zum BIP (Güterverkehr) über Annahmen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenerio (2012) fortgeschrieben. Über Preissensitivitäten wird die Verkehrsleistung auf Basis des Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)s für die weiteren Szenarien abgeleitet.

Die Grundlage für die Fortschreibung der Verkehrsleistung bilden dabei vor allem Daten aus TREMOD 5.25 (ifeu 2011). Zudem wird in der Herleitung der Verkehrsnachfrage zwischen rein nationalem und grenzüberschreitendem (erste Landung außerhalb Deutschlands) Flugverkehr sowie verschiedenen Entfernungsklassen unterschieden, um die unterschiedlichen Energieverbräuche dieser Distanzklassen berücksichtigen zu können.

Der Verkehrsleistung des Seeverkehrs in Deutschland liegt in der Modellierung eine globale Prognose der Entwicklung des Seeverkehrs zu Grunde. Als Startpunkt für die Ableitung des in Deutschland abgehenden Seeverkehrs wird dabei auf das heutige Verhältnis von in Deutschland abgehendem Seeverkehr zum globalen Seeverkehr zurückgegriffen. Zudem wird aus den im Projekt durchgeführten ökonomischen Rechnungen der in Deutschland anfallende Anteil der weltweiten Wirtschaftsleistung bestimmt, um somit die über Deutschland durchgeführte Seeverkehrsnachfrage abbilden zu können.

3.2.5.4 Fahrzeugbestand

Die Simulation der Fahrzeugbestandsentwicklung bis zum Jahr 2050 erfolgt mit dem Bestandsmodul des TEMPS-Modells. Den Ausgangspunkt der Modellierung stellen die ermittelte Verkehrsnachfrage sowie die zur Verfügung stehenden Technologieoptionen (siehe Technologiedatenbasis in Abschnitt 3.2.5.2) dar.

Für den Straßenverkehr erfolgt die Darstellung im Modell TEMPS detailliert auf Fahrzeugebene. Für die übrigen Verkehrsträger wird die Entwicklung in TEMPS auf einer aggregierten Systemebene modelliert. Auf diese beiden Berechnungspfade wird im Folgenden kurz eingegangen.

Die künftige Effizienzentwicklung im Straßenverkehr wird explizit über ein Neuzulassungs- und Bestandsmodell berechnet. Dadurch kann die Wirkung von beispielsweise CO_2-Emissionsstandards oder von Maßnahmen zur Förderung alternativer Technologien auf die Bestandszusammensetzung im Modell abgebildet werden.

Im Neuzulassungsmodul wird in Abhängigkeit von Inputgrößen wie der Verkehrsnachfrage und der Marktdurchdringung verschiedener Antriebstechnologien in Jahresschritten die Zusammensetzung der Neuzulassungen ermittelt. Das Bestandsmodul berechnet mittels spezifischer Überlebensraten der Fahrzeuge und durchschnittlichen Fahrleistungen den Bestand – differenziert nach Größenklasse und Antriebsart. Daten zu Überlebenskurven der Fahrzeuge und durchschnittlichen Fahrleistungen basieren dabei auf TREMOD 5.25. Die realisierbaren Effizienzentwicklungen der einzelnen Fahrzeugklassen im Straßenverkehr sind differenziert nach Größenklassen in der Technologiedatenbank zusammen mit Kostenannahmen hinterlegt. Die tatsächlich realisierte Effizienzentwicklung wird im Neuzulassungsmodul unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen bestimmt.

Im Gegensatz zum Straßenverkehr setzen z.B. beim Schienenverkehr Effizienzmaßnahmen nicht nur beim einzelnen Fahrzeug, sondern auch auf Systemebene an. Daher wird für die übrigen Verkehrsträger kein Bestand berechnet, sondern die Entwicklung der Verbräuche auf Systemebene ermittelt – d.h. es werden direkt Annahmen zur Technologieentwicklung je Verkehrsträger hinterlegt. Dieser einfachere Ansatz wird auch dann verwendet, wenn die für eine Bestandsmodellierung benötigten Daten nicht vorhanden sind bzw. der hohe Detailgrad der Modellierung nicht angemessen ist.

3.2.5.5 Endenergiebedarf

Die Entwicklung des Endenergiebedarfs des Verkehrs bis zum Jahr 2050 steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Modellierung von Verkehrsnachfrage und Fahrzeugbestand.

Der spezifische Energieverbrauch aller Fahrzeuge im Bestand ist differenziert nach Neuzulassungsjahr, Antriebsart und Größenklasse in der Technologiedatenbasis dokumentiert. In Verbindung mit der Fahrleistung, die durch das jeweilige Fahrzeug erbracht wird, lässt sich schließlich für alle Fahrzeuge im Bestand der Endenergiebedarf differenziert nach dem jeweils eingesetzten Endenergieträger ausweisen und für den gesamten Zeitverlauf darstellen. Eine Besonderheit ergibt sich für den Einsatz von Plug-In-Hybridfahrzeugen, deren elektrischer Fahranteil mit Hilfe des Strommarktmodells PowerFlex ermittelt und nachträglich in TEMPS integriert wird.

Bilanzraum für die Modellierung der Verkehrsnachfrage ist das inländische Verkehrsaufkommen. Der Endenergiebedarf soll allerdings nach der Konvention des Nationalen Treibhausgasinventars gemäß den Daten der AG Energiebilanzen angegeben werden. Somit wird der mit TEMPS ermittelte Endenergiebedarf des Jahres 2010 in Anlehnung an TREMOD 5.2 an die nationale Berichterstattung mit Hilfe von Korrekturfaktoren angepasst. Diese Korrekturfaktoren werden für das Jahr 2010 bestimmt und werden im Verlauf der Modellierung bis 2050 konstant gehalten.

3.2.6 Strom- und Fernwärmeversorgung

3.2.6.1 Interaktion der Kraftwerksmodelle

Für die Modellierung des Stromsektors kommen die Kraftwerksmodelle PowerACE (Fraunhofer ISI), ELIAS und PowerFlex (Öko-Institut) gemeinsam zum Einsatz. Dabei optimiert das PowerACE-Modell die Kraftwerksinvestitionen sowie den Kraftwerkseinsatz für die gesamte EUMENA-Region (Europa, Mittlerer Osten, Nordafrika). Das Investitionsmodell ELIAS ermittelt die Entwicklung des Kraftwerksparks für Deutschland. Der in ELIAS generierte zukünftige Kraftwerkspark wird im Strommarktmodell PowerFlex eingelastet. Die in PowerFlex ermittelten Benutzungsstunden werden an ELIAS zurückgegeben, wo die Investitionsrechnung auf Basis der aktualisierten Benutzungsstunden erneut durchgeführt wird. Diese Iteration zwischen ELIAS und PowerFlex wird so lange durchgeführt, bis ein konvergiertes Ergebnis für die Kraftwerksparkstruktur und den Kraftwerksdispatch[7] vorliegt.

Im ersten Schritt wurden die Inputdaten der drei Modelle harmonisiert. Dazu zählen beispielsweise die (stündlich aufgelöste) Nachfrage, Annahmen über Investitionskosten, Brennstoffpreise, technische Parameter verschiedener Kraftwerkstypen, etc.

Dann wurde ein Rechenlauf mit dem PowerACE-Modell durchgeführt. PowerACE bildet Deutschland als Teil der EUMENA-Region ab und berechnet stundenscharfe Stromflüsse aus oder nach Deutschland. Diese wurden dann exogen dem Modellverbund ELIAS/PowerFlex vorgegeben. Als Ergebnis ergeben sich die Kraftwerksparkstruktur und der Brennstoffmix in Deutschland unter Berücksichtigung des Imports aus der EUMENA-Region nach Deutschland.

Durch diesen Ansatz können die Stärken der drei Modelle (detaillierte nationale Abbildung sowie ökonomische Optimierung im europäischen Raum) zusammengeführt werden.

Für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (AMS (2012)) wird von einer überwiegend inländischen Bedarfsdeckung ausgegangen. Für das Klimaschutzszenario 80 (KS 80) und das Klimaschutzszenario 90 (KS 90) wird davon ausgegangen, dass 2030 bis zu 5%, 2040 bis zu 10% und 2050 bis zu 15% des deutschen Strombedarfs aus Importen (konventionell, EE) bestehen darf (Modellergebnis).

Abbildung 3-9 zeigt die Interaktion der Modelle im Überblick.

[7] Kraftwerkszubau und -einlastung ändern sich nur noch geringfügig zwischen den Iterationen.

Abbildung 3-9 Interaktion der Modelle PowerACE (ISI) und ELIAS / PowerFlex (Öko-Institut) zur Abbildung des Stromsektors

Quelle: Eigene Darstellung

Eine wesentliche Veröffentlichung für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) stellt die Leitstudie des BMU (Nitsch, Pregger, & Naegler, 2012) dar. Im Rahmen dieses Berichts werden die dort verwendeten Annahmen für das Kalkül bei Investitionen in erneuerbare Energien übernommen. Für die Modellierung für das KS 80 und das KS 90 werden die EE-Gerüste, wo nötig, entsprechend angepasst, um die vorgegebenen Ziele (EE-Ziele, THG-Minderungsziele) zu erreichen.

3.2.6.2 Modellverbund ELIAS/PowerFlex (Öko-Institut)

Die Modellierung der zu erwartenden Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks wird mit Hilfe des Modells ELIAS (Electricity Investment Analysis) sowie dem Kraftwerkseinsatzmodell PowerFlex des Öko-Instituts vorgenommen. Der Import von Strom wird in stündlicher Auflösung aus dem Modell PowerACE (Fraunhofer ISI) übernommen.

ELIAS

Ausgangsjahr der Modellierung ist das Jahr 2010. Im Modell wird der Investitionsbedarf im Stromsektor ermittelt, der sich aus dem Ausscheiden alter Kraftwerke aus dem Kraftwerkspark sowie der Entwicklung der Stromnachfrage ergibt. Im nächsten Schritt wird auf Grundlage einer Investitionsrechnung modelliert, wie der Investitionsbedarf durch den Zubau neuer Kraftwerke gedeckt wird.

Der zukünftige Investitionsbedarf hängt wesentlich von der Altersstruktur des bestehenden Kraftwerksparks ab. Dem Modell ELIAS liegt die Platts-Kraftwerksdatenbank (2012) zugrunde, in der für jedes Kraftwerk unter anderem das Inbetriebnahmejahr hinterlegt ist. Auf Grundlage dieser Datenbank wird die derzeitige Altersstruktur des

Kraftwerksparks in Deutschland ermittelt. Bei Erreichen der technischen Lebensdauer eines Kraftwerks werden die entsprechenden Stromerzeugungskapazitäten außer Betrieb genommen. Kraftwerke, die überwiegend strommarktbetrieben erzeugen (fossile Kondensationskraftwerke) orientieren sich an der Wirtschaftlichkeit des Kraftwerksbetriebs. Decken die Deckungsbeiträge, die sich aus den Stromerlösen und den Grenzkosten[8] ergeben, die jährlichen Fixkosten (v.a. Personal, Wartung und Instandhaltung), so kann das Kraftwerk Ertüchtigungsmaßnahmen (Retrofit) durchführen und so über die technische Lebensdauer hinaus Strom erzeugen. Sofern der Kraftwerksbetrieb unwirtschaftlich ist, so kann das Kraftwerk vor Erreichen der technischen Lebensdauer in Kaltreserve gehen (und wird am Ende der technischen Lebensdauer stillgelegt). Der resultierende Investitionsbedarf wird anhand der durchschnittlichen Stromerzeugung der außer Betrieb gegangenen Bestandskraftwerke und der prognostizierten Stromerzeugung ermittelt. Liegen für einzelne Technologien detaillierte Informationen über den Zeitpunkt der Schließung von Kraftwerken vor, wie beispielsweise bei Kernkraftwerken in Deutschland (Atomausstieg), kann die Stilllegungskurve der Erzeugungskapazitäten außerhalb des Modells ermittelt und in ELIAS eingelesen werden.

Dem modellierten Zubau liegt die Annahme zu Grunde, dass die Wirtschaftssubjekte in die Technologien mit den niedrigsten finanzmathematischen Durchschnittskosten investieren. Die finanzmathematischen Durchschnittskosten setzen sich aus Investitionskosten sowie fixen und variablen Betriebskosten zusammen. Durch eine Analyse der Zahlungsflüsse und -zeitpunkte der Kosten über die Abschreibungsdauer werden die finanzmathematischen Durchschnittskosten bezogen auf die Stromerzeugung (€/MWh) ermittelt. Ebenso können die Kosten bzw. Erträge, die aus politischen Rahmenbedingungen wie dem Emissionshandel, dem Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz oder einer Brennstoffsteuer resultieren, abgebildet und in die Kostenrechnung aufgenommen werden. Da KWK-Anlagen nicht nur Strom, sondern gleichzeitig auch Wärme produzieren, würde eine allein stromseitige Betrachtung der Stromgestehungskosten zu einer Überschätzung der Kosten führen. Um die Wärmeproduktion im Modell zu berücksichtigen, erhalten KWK-Anlagen eine Gutschrift für die erzeugte Wärme. Darüber hinaus können für dezentrale Erzeugungsanlagen Erlöse für vermiedene Netznutzung berücksichtigt werden. Zentral für die Berechnung der finanzmathematischen Durchschnittskosten ist neben den genannten Kosten- und Erlöspositionen die Anzahl der Betriebsstunden des jeweiligen Kraftwerks pro Jahr. Die Betriebsstunden werden im Kraftwerkseinsatzmodell PowerFlex berechnet und an die Investitionsrechnung zurückgespeist. Damit geht der zu erwartende Kraftwerkseinsatz direkt in die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Investition ein und berücksichtigt damit die unterschiedlichen Lastbereiche, die durch einzelne Kraftwerke abgedeckt werden.[9]

---

[8] Die Grenzkosten setzen sich aus den Brennstoffkosten, den variablen Betriebskosten sowie den Kosten für CO_2-Zertifikate zusammen.

[9] Beispielsweise sind die Grenzkosten von Gasturbinen, die typischerweise Spitzenlastkraftwerke sind, sehr hoch, weshalb sich nur sehr geringe jährliche Benutzungsstunden ergeben.

Da unter Realbedingungen nicht davon ausgegangen werden kann, dass Investitionsentscheidungen allein aus eng gefassten Wirtschaftlichkeitsüberlegungen getroffen und von Akteuren getragen werden, die über vollständige Information verfügen, sowie um der Unsicherheit der Kostenprojektionen und -erwartungen Rechnung zu tragen, erfolgen die Investitionsentscheidungen in ELIAS auf der Grundlage einer Unschärfefunktion. In Abhängigkeit von den in der Investitionsplanungsrechnung ermittelten Kostendaten werden auch Kraftwerke errichtet, die nicht die wirtschaftlich attraktivste Variante darstellen. Der Anteil an Investitionen in „suboptimale“ Kraftwerke hängt von der Kostendifferenz des jeweiligen Kraftwerktyps zu der nach der Investitionsrechnung wirtschaftlich attraktivsten Option ab, d.h. je kleiner der Unterschied ist, desto mehr Kraftwerke dieses Typs werden zugebaut.

Bestimmte Kraftwerkstechnologien können nicht unbegrenzt zugebaut werden, da ihr Potential durch gegebene Rahmenbedingungen begrenzt ist. Dies ist zum Beispiel beim Ausbau der Wasserkraft oder der Braunkohleverstromung der Fall. Für solche Technologien können im Modell obere Begrenzungen eingegeben werden. Ebenso kann ein Mindestzubau von Technologien festgelegt werden. Dies kann beispielsweise für die Erneuerbaren Energien vorgesehen werden, wenn deren Zubau nicht kostengetrieben erfolgt, sondern durch staatliche Ausbauziele bestimmt wird.

Bei der Modellierung des Zubaus werden zunächst diejenigen Kraftwerke zugebaut, für die ein Mindestzubau vorgegeben ist. Die verbleibende Zubaulücke wird durch diejenigen Kraftwerke gedeckt, die von ELIAS über die Berechnung der finanzmathematischen Durchschnittskosten als attraktive Neuinvestitionen eingestuft werden. Ein vorgegebener Zubau von erneuerbaren Energien oder eine verstärkte Stromeinsparung führt damit zu einem verminderten Zubau fossiler Kraftwerke. Sofern in einem Jahr bei voller Auslastung der Kraftwerkskapazitäten ein Überangebot an Strom produziert wird, können Bestandskraftwerke nicht mehr in vollem Umfang betrieben werden; es kommt zu einer Verringerung der Benutzungsstunden von Altkraftwerken und damit zu einer geringeren Stromerzeugung in diesen Anlagen.

Das Modell ELIAS hat zum Ziel, anhand eines Kostenvergleichs verschiedener Stromerzeugungstechnologien zum einen den zukünftigen Technologiemix des Kraftwerksparks abzubilden. Zum anderen ermöglicht es eine Bewertung politischer Instrumente, die auf den Technologiemix Einfluss nehmen. Damit kann ein Vergleich sowie eine Evaluierung verschiedener detaillierter Ausgestaltungen, beispielsweise des Emissionshandels, vorgenommen werden. Möglich ist sowohl eine Bewertung der Entwicklung der Erzeugungskapazitäten als auch der Stromerzeugung nach Technologien. Darüber hinaus können Aussagen über die Entwicklung der CO_2-Emissionen des Kraftwerksparks gemacht werden.

Es ist anzumerken, dass ELIAS kein Marktmodell ist, das einzelne Marktakteure oder strategisches Investitionsverhalten abbildet; eine preisgetriebene Verdrängung bestehender Kraftwerke findet nicht statt.

Neben den oben genannten Parametern ist die jährliche Benutzungsdauer ein zentrales Entscheidungskriterium bei der Investition in neue Kraftwerke. Die Anzahl der Stunden, die ein Kraftwerk im Jahr betrieben wird, hängt davon ab, wie hoch die Leistungsnachfrage der Verbraucher ist sowie davon, an welcher Stelle der Einsatzreihenfolge (*Merit Order*) sich das Kraftwerk befindet. Die Einsatzreihenfolge von Kraftwerken orientiert sich an den so genannten kurzfristigen Grenzkosten, die sich aus Brennstoffkosten, variablen Betriebskosten sowie den Kosten für den Erwerb von CO_2-Zertifikaten zusammensetzen. Je geringer die Grenzkosten eines Kraftwerks sind, desto häufiger wird es im Jahr eingesetzt. Bei geringen CO_2-Preisen sind hier vor allem die Brennstoffkosten ausschlaggebend. Bei steigenden CO_2-Preisen verbessern sich Kraftwerke mit geringen CO_2-Emissionen (Gaskraftwerke) in der Einsatzreihenfolge gegenüber Kraftwerken mit hohen CO_2-Emissionen (Kohlekraftwerke). Neben den Grenzkosten eines Kraftwerks ist für den Kraftwerksbetrieb relevant, wie sich die Residuallast im Szenarioverlauf verändert. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sich Vorrangkraftwerke im System befinden (beispielsweise KWK-Anlagen) oder Kraftwerke mit sehr geringen Grenzkosten hinzukommen (beispielsweise erneuerbare Energien). Dementsprechend sinkt die Residuallast, die mit den verbleibenden konventionellen Kraftwerken bedient werden muss. Als Folge dessen sinken die jährlichen Benutzungsstunden der Kraftwerke, womit sich wiederum deren Wirtschaftlichkeit verändert. ELIAS berücksichtigt diese Effekte, indem es den modellierten Zubau an neuen Kraftwerken in das Kraftwerkseinsatzmodell PowerFlex speist. In diesem Modell wird ermittelt, wie viele Betriebsstunden sich für das jeweilige Kraftwerk ergeben. In einer Iteration werden diese Benutzungsstunden in das Investitionsmodell ELIAS zurückgespeist, womit erneut die Wirtschaftlichkeit von Anlagen und damit der entsprechende Zubau im Szenarienhorizont ermittelt wird (Abbildung 3-10).

Abbildung 3-10 Iteration zwischen Kraftwerksstilllegung und -investition (ELIAS) und Kraftwerkseinsatz (PowerFlex)

Quelle: Öko-Institut

Die erneuerbare Stromerzeugung im Rahmen der Modellierung mit ELIAS wird als feste Entwicklung in Bezug auf die installierte Leistung vorgegeben. Die tatsächliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ergibt sich aus dem Dargebot (z.B. solare Strahlung) und der Nachfrage in der jeweiligen Stunde. Sofern das Dargebot größer ist als die Nachfrage und keine weiteren Flexibilitätsoptionen im System zur Verfügung stehen, wird die erneuerbare Stromerzeugung abgeregelt. Insofern wird mit der Kraftwerkspark-Modellierung die Systemintegration von erneuerbaren Energien abgebildet. Auswirkungen auf die fossile Stromerzeugung werden insofern berücksichtigt, als dass die Einspeisung erneuerbarer Energien die Zubaulücke im fossilen Kraftwerkspark und damit künftige CO_2-Emissionen bestimmt und außerdem die jährlichen Benutzungsstunden von Kraftwerken (und damit deren Wirtschaftlichkeit) beeinflusst. Gleichermaßen beeinflusst eine sich ändernde Stromnachfrage den Bedarf an neuen Kraftwerken.

PowerFlex

Das am Öko-Institut entwickelte Strommarktmodell PowerFlex ist ein Fundamentalmodell, welches thermische Kraftwerke, die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerke und flexible Stromverbraucher kostenminimal einsetzt, um die Stromnachfrage und den Bedarf an Regelleistung zu decken.

Die einzelnen Kraftwerke werden im Modell detailliert mit Hilfe technischer und ökonomischer Parameter abgebildet. Thermische Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung größer 100 MW werden blockscharf und mit einem individuellen Wirkungsgrad erfasst.

Kleinere thermische Stromerzeugungsanlagen werden in technologie- und baujahrspezifischen Gruppen zusammengefasst und mit Hilfe von typspezifischen Parametern charakterisiert. Diese Anlagen können ihre Leistung entlang eines festen Lastgradienten über den gesamten Leistungsbereich ändern. Gleiches gilt für Pumpspeicherkraftwerke, die in Gruppen mit einem vergleichbaren Verhältnis von Speicherkapazität zu installierter elektrischer Leistung zugeordnet werden. Insgesamt setzt sich der im Modell PowerFlex abgebildete deutsche Kraftwerkspark 2010 aus rund 250 Einzelblöcken und 150 Technologieaggregaten zusammen.

Biomassekraftwerke, die Biogas, Holz oder Pflanzenöl einsetzen, werden als Technologieaggregate als Teil des thermischen Kraftwerksparks im Modell abgebildet, da ihr Einsatz insbesondere in zukünftigen Szenarienjahren als flexibel angenommen wird. Für die dargebotsabhängigen erneuerbaren Energiequellen Laufwasser, Offshore Wind, Onshore Wind und Photovoltaik wird das maximal zur Verfügung stehende Stromangebot aus skalierten generischen oder historischen stündlich aufgelösten Einspeiseprofile vorgegeben. Die tatsächlich eingespeiste Menge an Wasser-, Wind- und Photovoltaikstrom wird modellendogen bestimmt, d.h. dargebotsabhängiger erneuerbarer Strom kann auch als überschüssig identifiziert werden, z. B. bei negativer Residuallast und unzureichender Speicherkapazität.

Das Erzeugungsprofil für Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung setzt sich aus einem typischen Fernwärmeprofil und einer angenommenen Gleichverteilung für industrielle KWK-Anlagen zusammen. Für jeden Hauptenergieträger ergibt sich somit ein individuelles KWK-Profil. Für must-run-Kraftwerke, wie z. B. Gichtgas oder Müllverbrennungsanlagen, wird eine gleichverteilte Stromeinspeisung unterstellt.

Die Stromnachfrage wird analog zur fluktuierenden Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien in stündlicher Auflösung exogen vorgegeben. Das Nachfrageprofil setzt sich aus der Netzlast des betrachteten Jahres und einer angenommenen Gleichverteilung des Industriestromanteils zusammen.

Ein zentraler Bestandteil des Modells ist die Abbildung von Flexibilität auf der Nachfrageseite durch Speicher bzw. Lastmanagement. Diese werden im Modell mit Hilfe der installierten elektrischen Leistung, der Speicherkapazität und der zu deckenden Lastkurve beschrieben. Als flexible Verbraucher werden beispielsweise Prozesse mit einem thermischen Speicher, wie z. B. Geräte zur elektrischen Kälte- und Wärmebereitstellung, oder mit einem zeitvariablen Einsatz, wie z. B. smart charging von Elektrofahrzeugen, betrachtet.

Um die fluktuierende Erzeugung durch erneuerbare Energien (insbesondere Windenergie und Photovoltaik) auszugleichen und zu jedem Zeitpunkt die Netzlast bedienen

zu können, werden außerdem Backup-Kapazitäten berücksichtigt, die zusätzliche Leistung in einzelnen Stunden zur Verfügung stellen können[10].

Auf Basis einer vollständigen Voraussicht wird dann im Rahmen einer linearen oder gemischt-ganzzahligen Optimierung der kostenminimale Einsatz von thermischen Kraftwerken, Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien und Pumpspeicherkraftwerken unter Berücksichtigung technischer und energiewirtschaftlicher Nebenbedingungen bestimmt.

Das Optimierungsproblem ist in GAMS implementiert und wird mit Hilfe des Simplex Algorithmus gelöst.

Die wesentlichen Inputdaten sind: Stromnachfrageprofil (stündlich aufgelöst), EE-Einspeiseprofile (stündlich aufgelöst), techno-ökonomische Parameter des thermischen Kraftwerksparks (z. B. Wirkungsgrad, Brennstoffpreise, CO_2-Preise, CO_2-Emissionsfaktor, variable Kosten), techno-ökonomische Parameter von Speicherkraftwerken (z. B. Speicherkapazität, Wirkungsgrad, variable Kosten), techno-ökonomische Parameter von flexiblen Verbrauchern und Elektromobilität (z. B. Speicherkapazität, Wirkungsgrad, variable Kosten).

PowerFlex liefert die folgenden relevanten Ergebnisse (in stündlicher Auflösung): Einsatzprofile von Kraftwerken (inkl. Benutzungsstunden und Erlösen am Strommarkt) sowie Speichern und flexiblen Verbrauchern, Strompreise, Brennstoffmix und CO_2-Emissionen.

3.2.6.3 PowerACE (Fraunhofer ISI)

Das Modell PowerACE Europe simuliert und optimiert den Stromsektor für die Region EU27+2; bei Bedarf kann das Modell auch um einige Länder in der MENA-Region ergänzt werden. Es handelt sich um ein Bottom-up-Modell, das bei der stundenscharfen Deckung von Angebot und Nachfrage auch Reservemärkte berücksichtigen kann. Dabei können ebenfalls Stromflüsse zwischen den einzelnen Ländern abgebildet werden. Als zentrale Ergebnisse stehen unter anderem die Auslastung der konventionellen Kraftwerksblöcke, die CO_2-Emissionen, die Auslastung der Kuppelstellen, der Speichereinsatz und ggf. die abgeregelte Einspeisung aus EE-Anlagen zur Verfügung. Neben dem eigentlichen Kraftwerkseinsatz kann das Modell über einen Optimierungsalgorithmus auch den optimalen Ausbau von Kraftwerkskapazitäten und Kuppelstellen bestimmen. Dabei werden kommerzielle Solver eingesetzt. Das Modell ist an umfangreiche Datenbanken zum europäischen Kraftwerkspark, zur Stromnachfrage und zur installierten Leistung erneuerbarer Energien angebunden. Über verbundene Modelle kann auf Basis meteorologischer Daten ein stundenscharfes Einspeiseprofil der fluktuierenden erneuerbaren Energien (Wind, PV) errechnet werden.

[10] Es handelt sich hierbei modelltechnisch um ein generisches Backup-Kraftwerk, das eine Vielzahl möglicher Optionen wie z.B. Gasturbinen oder Vereinbarungen zur Lastreduktion in einzelnen Stunden umfasst.

Abbildung 3-11 Schematische Darstellung des Modells PowerACE

Quelle: Fraunhofer ISI

Im Rahmen dieses Projekts werden die in PowerACE berechneten Importflüsse nach Deutschland an den Modellverbund ELIAS/PowerFlex übergeben.

3.2.7 Industrieprozesse (CO_2-, CH_4- und N_2O-Emissionen)

Für die Erstellung der Projektionen für die prozessbedingten CO_2-Emissionen wird ein dreistufiger Ansatz verfolgt:

1. Für einige (sehr relevante) Quellbereiche ist die Fortschreibung der Entwicklung der Szenarien über Annahmen zur Entwicklung der Produktionsniveaus (siehe Kapitel 5.3.1.1) für eindeutig identifizierbare Produkte möglich.
2. Für einige (teilweise ebenfalls relevante) Quellbereiche können aus den energiewirtschaftlichen Entwicklungen (z.B. hinsichtlich des Mineralölbedarfs) die CO_2-Emissionstrends abgeleitet werden.
3. Für einige (weniger relevante) Quellbereiche werden die Determinanten der Emissionen nicht weiter analysiert und die Emissionen in den Szenarien auf dem Niveau eines Jahres (z.B. 2010) konstant gehalten.

Die prozessbedingten CO_2-Emissionen ergeben sich damit stets aus den zu Grunde gelegten Produktionsmengen, die entweder exogen vorgegeben sind, oder konstant gehalten werden bzw. über die modellendogen ermittelten (Energie-) Produktionsniveaus ermittelt werden.

3.2.8 Industrieprozesse und Produktverwendung (Verwendung von FKW, HFKW und SF_6)

Die Emissionsprojektionen für fluorierte Treibhausgase (F-Gase)[11] wurden auf der Basis einer aktuellen Studie von Öko-Recherche für das Umweltbundesamt (Öko-Recherche 2011) ermittelt.

In der Öko-Recherche-Studie werden mehrere Szenarien entwickelt:

- Das Szenario „Mit Maßnahmen“ (MM) berücksichtigt die Auswirkungen der europäischen F-Gas-Gesetzgebung. Eine Umsetzung bzw. Ergänzung in nationale Gesetzgebung in Deutschland erfolgte durch die Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV) und die Straßenverkehrszulassungsordnung.
- Das Szenario „Mit weiteren Maßnahmen“ (MWM) thematisiert Maßnahmen zur weiteren Reduktion der Emissionen fluorierter Treibhausgase, die noch nicht politisch umgesetzt sind, aber technisch möglich wären und insofern politisch relevant werden könnten.

Für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) im vorliegenden Bericht wurde das MM-Szenario der Öko-Recherche-Studie übernommen. Für das Klimaschutzszenario 80 wurde eine Teilmenge der Minderungsmaßnahmen angenommen, die im MWM-Szenario der Öko-Recherche-Studie enthalten sind. Diese Teilmenge ist identisch mit derjenigen Gruppe an Maßnahmen die auch in das Energiewendeszenario (EWS) der Studie Politikszenarien VI (Öko-Institut et al. 2013) eingeflossen ist. Für das Klimaschutzszenario 90 wurden weitere auf Schwefelhexafluorid (SF_6) bezogene Maßnahmen des MWM-Szenarios der Öko-Recherche-Studie übernommen. Die jeweiligen Annahmen und Modellierungsergebnisse sind in Kapitel 6.2 dokumentiert.

3.2.9 Abfallwirtschaft

Basierend auf dem vom Öko-Institut entwickelten Multi-Phasen Abfallmodell (Emissionen der Deponierung) werden die statistischen Daten der Emissionsberichterstattung 2012 als Rahmendaten eingesetzt (UBA, 2012a). Das Multi-Phasen Abfallmodell berücksichtigt die einzelnen Abfallfraktionen, so dass über deren unterschiedlichen Halb-

[11] Bei den im Kyoto-Protokoll erfassten F-Gasen handelt es sich um teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) sowie Schwefelhexafluorid (SF_6).

wertszeiten die Emissionen berechnet und anschließend summiert werden[12]. Rekalkulationen mussten für die Ausgangsmengen der Jahre 2009 und 2010 für den Bereich der Abfalldeponierung vorgenommen werden, da sich Fehler im Inventar bei der Summenbildung ergeben haben. Die Rekalkulation erfolgte in Rücksprache mit den Fachverantwortlichen des Umweltbundesamtes (FG III 2.4).

Für die Unterquellgruppe kommunale Abwasserbehandlung werden die Treibhausgasemissionen anhand eines einfachen Ansatzes[13] berechnet. Für Methan erfolgte die Berechnung über den Anteil der Bevölkerung mit abflusslosen Gruben und der organischen Fracht in deren Abwässern und über sog. Default-Faktoren nach IPCC (1996). Die Berechnung der Lachgas-Emissionen erfolgte auf Grundlage von Daten der FAO und der im NIR (UBA, 2012a) dokumentierten Methode.

Für die Emissionen aus den Anlagen zur Kompostierung und mechanisch-biologischen Abfallbehandlung werden die eingesetzten Mengen (Destatis 2001-2010) in einfacher Berechnung mit den jeweiligen Emissionsfaktoren (IFEU, 2003) verknüpft. Für diesen Bereich wird in beiden Szenarien keine Reduktionsmaßnahme angewendet. Statistische Informationen des Jahrs 2010 werden linear fortgeschrieben und bei der Berechnung der Projektionen verwendet.

3.2.10 Landwirtschaft

Im Rahmen der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) zur Minderung von Treibhausgasen werden von Deutschland jährlich zeitlich aufgelöste Emissionsinventare berichtet. Diese Inventare werden zur Darstellung des Status Quo herangezogen und zur Untersuchung der Frage, inwieweit emissionsmindernde Maßnahmen oder Emissionsbegrenzungen retrospektiv wirksam waren oder aktuell Einfluss auf die Emissionsmengen nehmen. Die Berechnung der Emissionsminderungspfade bis 2050 im Bereich Landwirtschaft erfolgt auf Grundlage der von Deutschland an die UNFCCC offiziell gemeldeten Daten (z.B. Tierbestände, landwirtschaftliche Böden, Wirtschafts- und Mineraldüngereinsatz und Emissionen aus der Landwirtschaft; s. Rösemann et al., 2012) mit Hilfe des Landwirtschaftsmodells des Öko-Instituts.

Die folgenden Teil-Quellgruppen sind für die Berechnung der Treibhausgase in der Landwirtschaft relevant:

- Fermentation: verdauungsbedingte CH_4-Emissionen,
- Düngerwirtschaft: CH_4- und N_2O-Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung,

[12] Das kinetische Modell zur Emissionsberechnung aus der Abfalldeponierung bildet die Ausgasung der deponierten organischen Materialen über die Zeit ab und berücksichtigt auch die Erfassung und Nutzung von Deponiegas.

[13] Einfacher Ansatz: Aktivitätsdaten (AD, statistische Daten) multipliziert mit dem jeweiligen Emissionsfaktor (EF); EM = AD * EF

- Landwirtschaftliche Böden: N_2O-Emissionen aus der Düngung, aus der Umsetzung von Ernterückständen, aus gasförmigen N-Verlusten sowie N-Austrägen ins Grund- und Oberflächenwasser. Hinzu kommen N_2O-Emissionen aus der Mineralisierung von Moorböden.

Die folgende Tabelle zeigt im Überblick, welche Aktivitätsdaten und Einflussgrößen im Modell berücksichtigt wurden.

Tabelle 3-6 Aktivitätsdaten und Einflussgrößen für die Berechnung der Emissionen aus der Landwirtschaft

Quell- und Senkenkategorien	Aktivitätsdaten	Einflussgrößen	Einflussgrößen zur Emissionsreduktion
Fermentation: verdauungsbedingte CH_4-Emissionen	Tierbesatzdichte (Population in Tausend) Milchkühe, Rinder, andere Wiederkäuer	Methanausstoß bei Verdauung (Gg CH4 pro Stück)	Reduktion der Tierbesatzdichte Verbesserte Fütterung mit weniger Methanausstoß
Düngerwirtschaft: CH_4- und N_2O-Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung	Tierbesatzdichte (Population in Tausend) Milchkühe, Rinder, andere Wiederkäuer, Schweine, Geflügel, Pferde etc.	Lagerung der Gülle Lagerung des Festmists	Reduktion der Tierbesatzdichte Gasdichte Lagerung des Wirtschaftsdüngers
Landwirtschaftliche Böden: N_2O-Emissionen aus der Düngung, Ernterückständen, aus gasförmigen N-Verlusten sowie N-Austrägen ins Grund- und Oberflächenwasser, organischen Böden	Landwirtschaftliche Nutzfläche Organischer Düngereinsatz pro Hektar Mineralischer Düngeeinsatz pro Hektar		Rückgang landwirtschaftlicher Nutzfläche, v.a. auf organischen Böden Reduktion der Tierbesatzdichte Reduktion der Düngemittelgaben pro Hektar

Quelle: Eigene Darstellung

Die gesamten Methan- und Lachgasemissionen der Landwirtschaft entstehen zu etwa einem Drittel aus Verdauungsprozessen von Nutztieren (enterische Fermentation), zu etwa 15% aus dem Wirtschaftsdüngermanagement sowie über die Hälfte der Lachgasemissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden (im Wesentlichen verursacht durch den Einsatz von Stickstoffdünger). Die Daten wurden durch das Heinrich von Thünen Institut (vTI) im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) ermittelt und liegen in aggregierter Form vor. Darüber hinaus entwickelte das vTI Prognosen für den Zeitraum 2011-2021. Das sog. Baselinezenario des vTI beschreibt die zu erwartenden Entwicklungen bei Beibehaltung der aktuellen Agrarpolitik (Common Agriculture Policy (GAP) bis 2013, Abschaffung der Milchquote; s.a. Offermann et al. (2012)). Die Daten hieraus werden für alle drei Szenarien des vorliegenden Projekts bis 2021 übernommen. Für die Projektionen nach 2021 wird wie folgt vorgegangen:

Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012): Für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) werden die Daten nach einem konservativen Ansatz von 2020 ab konstant fortgeschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass ab 2020 die Maßnahmen auslaufen. Für die Bewirtschaftung organischer Böden werden die Flächenangaben aus dem LULUCF Modell übernommen.

Klimaschutzszenario 80: Für das Klimaschutzszenario 80 wird für die Entwicklung der Tierbesatzdichte der einzelnen Tiergruppen die Trendentwicklung der letzten 20 Jahre bis 2030 linear fortgeschrieben. Die Aktivitätsdaten für die landwirtschaftlichen Böden basieren auf der Trendentwicklung der letzten 30 Jahre (2000 – 2030) bis 2040, danach werden die Daten konstant fortgeschrieben. Für die Bewirtschaftung organischer Böden werden die Flächenangaben aus dem LULUCF Modell übernommen.

Klimaschutzszenario 90: Im Gegensatz zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) und Klimaschutzszenario 80 werden hier die Hauptemittenten durch weitere Maßnahmen ergänzt. Dazu zählen der Rückgang der Tierzahlen, der Rückgang der Düngeeinsätze sowie der Rückgang der Bewirtschaftung organischer Böden.

3.2.11 LULUCF

3.2.11.1 Methodisches Vorgehen

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des methodischen Vorgehens zur Ermittlung der THG-Projektionen aus dem LULUCF-Sektor in fünf Schritten dargestellt:

Schritt 1 – Entwicklung eines LULUCF-Models: Es wurde ein LULUCF-Model entwickelt, das von einem Jahr zum nächsten über Flächenänderungskoeffizienten Übergänge von einer Flächenkategorie zur anderen bestimmt (Stock-Exchange-Model). Zudem werden flächenspezifische THG-Emissionen über Emissionskoeffizienten abgebildet. Für die Jahre 1990 bis 2010 liegen sowohl die Flächendaten als auch die Flächenänderungs- und Emissionskoeffizienten vor (CRF-Tabellen und interne Daten des von Thünen Instituts (vTI)). Dabei werden folgende Flächenkategorien berücksichtigt:

- Wald
- Ackerland
- Grünland (Wiesen, Weiden)
- Gehölze (Hecken, Feldgehölze und Strauchbestände)
- Feuchtgebiete (terrestrisch)Gewässer
- Siedlung
- Sonstiges Land (vegetationslose Flächen wie Felspartien und Eisflächen)

Für diese acht Flächenkategorien (inklusive Subkategorien) wird in UBA (2012a) zwischen verbliebene Flächen (synonym: alte Flächen) und neue Flächen unterschieden. Wird eine Fläche einer Flächenkategorie in eine andere Flächenkategorie umgewandelt (z.B. verbliebenes Grünland zu neuem Ackerland), so verbleibt sie für 20 Jahre in

dem Status neue Fläche.[14] Für 20 Jahre bleibt eine umgewandelte Fläche in der Kategorie „neu“ und kann in dieser Zeit nicht in eine andere Flächenkategorie überführt werden. Nach Ablauf von 20 Jahren wird die Fläche automatisch zur Kategorie „verbliebene“ und kann wieder in andere Flächenkategorien umgewandelt werden.

Im Stock-Exchange-Model werden für die Flächenänderungskoeffizienten und die Emissionskoeffizienten die Mittelwerte aus den Jahren 2006 bis 2010 für die Jahre 2011 bis 2050 fortgeschrieben. In einer Prüfung des umfangreichen Datensatzes und nach Rücksprache mit Experten stellt sich diese Fortschreibung als am sinnvollsten heraus.

Schritt 2 – Analyse der Flächenkategorien im Hinblick auf THG-Reduktionspotentiale: Ausgehend von den CRF-Tabellen für 1990-2010 und dem Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar (UBA 2012a) werden die Flächenkategorien im Hinblick auf ihr THG-Reduktionspotential analysiert. Die Analyse setzt sich zusammen aus der vorhandenen Fläche der Flächenkategorien, den Emissionsfaktoren für die jeweilige Flächenkategorie und den Emissionsfaktoren der Flächenkategorie, in die eine Fläche umgewandelt werden könnte (Beispiel: Umwandlung von Ackerflächen auf organischen Böden mit einem hohen Emissionsfaktor in Waldflächen auf organischem Boden mit einem niedrigen Emissionsfaktor). Ziel ist es abzuleiten, wie hoch die maximalen THG-Reduktionen je Flächentyp sein können.

Schritt 3 – Emissionsfaktoren für Flächenkategorien: Die THG-Emission einer Flächenkategorie wird durch Emissionsfaktoren bestimmt. Für die Jahre 1990 bis 2010 sind diese Emissionsfaktoren in den in 2012 veröffentlichten CRF-Tabellen verfügbar. Es werden besonders relevante Flächenkategorien (hoher Emissionskoeffizient oder großer Flächenanteil) identifiziert. Es wird angestrebt, in der nächsten Berichtsphase den Emissionskoeffizienten ausgewählter Flächen zu modellieren, bzw. es wird diese Option geprüft (insbesondere für Waldflächen).

Schritt 4 – Szenarienentwicklung: Für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) werden aus den Daten von 1990 bis 2010 aus den CRF-Tabellen Flächenänderungskoeffizienten für die Jahre 2011 bis 2050 abgeleitet, wobei eine Trendfortschreibung der Flächenänderungs- und Emissionskoeffizienten vorgenommen wird, die die Flächenverfügbarkeit in Flächenkategorien sowie bestehende politische Zielsetzungen berücksichtigt. Dies spielt insbesondere für die Inanspruchnahme neuer Siedlungsflächen und den noch praktizierten Torfabbau eine Rolle. Für das Klimaschutzszenario 80 sowie das Klimaschutzszenario 90 werden für die Flächen, die besonders hohe THG-Einsparungspotenziale aufweisen, die Flächenänderungs- und ggf. auch Emissionsko-

[14] Dies ist damit begründet, dass sich in den ersten Jahren/Jahrzenten nach einer Flächenumwandlung THG-Emissionen häufig anders darstellen als zu einem späteren Zeitpunkt. So zeigt ein frühes Sukzessionsstadium eines Waldes eine stärkere CO_2-Fixierung als ein alter Waldbestand und in frisch zu Acker umgebrochenem Grünland wird mehr organisches Bodenmaterial oxidiert als in alten Ackerflächen.

effizienten über politische Maßnahmen so geändert, dass hohe THG-Einsparungen erreicht werden.

Schritt 5 – Verknüpfung mit anderen Teilmodellen: Ergebnisse aus der LULUCF-Modellierung beeinflussen direkt die Annahmen und Ergebnisse im Teilmodel zum Agrar-Bereich (verfügbare landwirtschaftliche Flächen). Zudem hat die Modellierung der Flächenänderungen einen Einfluss auf weitere Bereiche (z.B. verfügbare Waldfläche und Holzerträge zur Substitution fossiler C-Quellen in andern Sektoren). Während der Modellierungsarbeit werden entsprechende Verknüpfungen berücksichtigt und Ergebnisse ausgetauscht, um eine Konsistenz zwischen Teilbereichen sicherzustellen.

3.3 Ökonomische Modellierung

Zur Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte der Klimaschutzszenarien wurde das Model ASTRA-D eingesetzt. Der Fokus der ersten Runde war hierbei die Entwicklung der Schnittstelle zwischen ASTRA-D und den verwendeten Bottom-up Modellen. Das vorliegende Kapitel beschreibt den Modellieransatz und die Schnittstelle zwischen den Modellen.

3.3.1 Modellieransatz ASTRA-D

ASTRA-D ist eine Weiterentwicklung des europäischen ASTRA-Modells, welches Ende der 1990er Jahre im Rahmen eines EU-Projektes zur Beurteilung von Transportstrategien entwickelt wurde und seitdem sukzessive verbessert und auch im Bereich der Energie-, Klima- und Erneuerbaren Politik eingesetzt wurde. Die deutsche Version der ökonomischen Modelle von ASTRA-D wurde im Projekt Renewbility-II und durch Eigenforschung des Fraunhofer ISI aufgebaut und ergänzt durch Erweiterungen um die Verkehrsmodelle im Projekt Nichttechnische Maßnahmen, beide im Auftrag von BMU/UBA. Für die deutsche Version wurde der Analysegrad wesentlich verfeinert; es findet nun eine Aufteilung der Sektoren anhand der Wirtschaftszweigklassifikation von 2003 des statistischen Bundesamtes Anwendung (Destatis 2003). Der Kalibrierzeitraum umfasst dabei die Jahre 1995 bis 2012. Schwerpunkte der Modellierung mit ASTRA waren insbesondere die vollständige Abbildung von Maßnahmen mit ihren Investitions-, Kosten- und Handelsimpulsen, sowie die Berücksichtigung von indirekten Effekten (Zweitrundeneffekte).

Mittels der Verwendung von Input-Output-Tabellen ist die Integration von Bottom-up-Impulsen zur sektorfeinen Bewertung von Politikmaßnahmen möglich. Zweitrundeneffekte können durch die Implementierung des Wirtschaftskreislaufes mit einem zentralen Feedback BIP – Einkommen – Konsum – Investition – BIP erfasst werden. ASTRA orientiert sich dabei nicht streng an einem makroökonomischen Theorieteil, sondern verbindet Elemente wie die neoklassische Produktionsfunktion zur endogenen Modellierung wirtschaftlichen Wachstums über den Feedback Investition – Faktorproduktivität – BIP – Konsum – Investition mit keynesianischen Nachfrageimpulsen. Ein wesentli-

ches Charakteristikum ist dabei die Möglichkeit, Ungleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage entstehen zu lassen. Damit ist ASTRA kein Optimierungsmodell.

Abbildung 3-12 Makroökonomische Modellierlogik in ASTRA-D

Quelle: Hartwig et al. (2012)

Die geschlossene Kreislaufmodellierung von ASTRA-D dient zweierlei: zum Einen wird damit die Konsistenz der Zahlungsströme innerhalb der Volkswirtschaft sichergestellt und zum Anderen wird versucht, durch die Integration aller größeren ökonomischen Flussgrößen Zweitrundeneffekte abzubilden.

Abbildung 3-12 verdeutlicht auf vereinfachte Weise, wie die wesentlichen makroökonomischen Zusammenhänge modelliert sind. Je nach Maßnahme sind dabei verschiedene Anknüpfungspunkte der durch Maßnahmen ausgelösten Impulse an das ASTRA-D Modell vorhanden; hier kommt es vor allem auf die Einschätzung der spezifischen Modelle der Politikteile an, wie die Ankopplung der Impulse erfolgt. In diesem Projekt werden die Impulse durch die sektoralen Bottom-up Modelle bereitgestellt.

3.3.2 Implementierung der Maßnahmen aus den Bottom-up Modellen

In der ersten Runde der Klimaschutzszenarien wurde die Schnittstelle zwischen den Bottom-up Modellen und ASTRA-D entwickelt. Die Auswirkungen der energiepoliti-

schen Maßnahmen in den verschiedenen Szenarien (AMS (2012), KS 80 und KS 90) aus den Bottom-up-Modellen werden dabei in ökonomische Impulse übersetzt.

Grundsätzlich erfolgt die Maßnahmenimplementierung in drei Bereichen:

1. auf der Nachfrageseite durch eine Veränderung der Konsumstruktur,
2. auf der Angebotsseite durch eine Anpassung der Investitionen
3. auf die Vorleistungsstruktur der Input-Output-Beziehungen durch Veränderung der Ausgaben für Energie, Wärme und Verkehr, die sich in Abhängigkeit von Energiekosten und Technologieeffizienz entwickeln und in den Szenarien variieren.

In ASTRA-D ist eine zeitliche Staffelung der Politikmaßnahmen durch die jahresfeinen Berechnungsschritte möglich. Damit ist auch eine flexible Gestaltung von Politiken hinsichtlich ihrer Intensität im Zeitverlauf möglich und etwaige Unterschiede der Wachstums- und Beschäftigungswirkungen bedingt beispielsweise durch unterschiedliche Investitionstrajektorien können sichtbar gemacht werden.

Hierbei sind insbesondere die Investitionen wichtig. Es kann zwischen zusätzlichen und vermiedenen Investitionen unterschieden werden. Zusätzliche Investitionen entstehen durch die Politikmaßnahmen (z.B. durch den Bau zusätzlicher Windenergieanlagen), vermiedene Investitionen sind Investitionen, welche im Referenzfall (AMS) getätigt wären, im Rahmen von Klimaschutzmaßnahmen allerdings wegfallen (z.B. kein Bau geplanter Kohlekraftwerke). Die Differenz wird dann anhand des spezifischen Technologievektors auf die einzelnen Sektoren gemäß der Wirtschaftszweigklassifikation 2003 aufgesplittet. Alternativ kann die Aufteilung auch gemäß der Vorleistungsstruktur aus den Input-Output-Tabellen erfolgen.

Zur vollständigen Abbildung einer Maßnahme existieren mehrere Optionen der Implementierung in ASTRA-D. Grundsätzlich könnten die zusätzlichen Investitionen durch staatliche Zuschüsse finanziert werden und werden dann im Staatshaushalt budgetiert. In der Energiepolitik wurden die zusätzlichen Investitionen häufig kostenseitig an die Empfänger von Waren oder Dienstleistungen weitergegeben, d.h. sie sind in den Energiekosten eingepreist, wie z.B. bei Einspeisevergütungen. In ASTRA-D kann die Energiekostenveränderung berücksichtigt werden, indem sich die Vorleistungsstruktur verändert und so die Input-Output-Tabelle dynamisiert wird. Abbildung 3-12 zeigt diesen Ansatz auf: in grün sind die Politikmaßnahmen dargestellt; der Einpreisungsmechanismus ist mit „Bottom-Up-Impulsen“ gekennzeichnet und wirkt auf die Vorleistungsmatrix ein. Parallel dazu können Maßnahmen, die auf Veränderungen bei den privaten Haushalten abzielen, bei den Konsumausgaben der Haushalte integriert werden und so zu einer Verschiebung der Ausgabenstruktur der Haushalte führen. Daneben können für eine vollständige Maßnahmenimplementierung in ASTRA-D noch Importimpulse (z.B. verringerte Energieimporte) sowie Lead-Markt-Effekte (z.B. zusätzliche Exporte durch Technologieführerschaft) implementiert werden. Die Modellierung der Impulse außerhalb des Verkehrssektors erfordern entweder eine Kopplung mit Bottom-up Modellen oder ein Abschätzung durch andere ökonomische Modelle oder Experten.

In Abbildung 3-13 ist dargestellt, wie die Überleitung der Bottom-up-Impulse technikspezifisch auf die ökonomischen Parameter herunter gebrochen und als intermediäre Verwendung bzw. Preiseffekt in den Modellen eingesteuert wird. Damit wird eine sektorfeine Maßnahmenwirkung ermöglicht.

Abbildung 3-13 Überblick über den Ablauf der Modellierung der gesamtwirtschaftlichen Effekte

Quelle: Eigene Darstellung

4 Rahmendaten und -annahmen für die Szenarien

4.1 Demographische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten

4.1.1 Bevölkerung

Die Bevölkerungsentwicklung und -fortschreibung ist in ASTRA-D endogen modelliert (siehe dazu auch Bundesregierung 2013). Als Vergleichsbasis dienen die Annahmen der 12. koordinierten Bevölkerungsfortschreibung des statistischen Bundesamtes (Destatis, 2012a). Die Annahmen, welche auch im Projekt Renewbility II (UBA 2013b) getroffen wurden, sind über das Jahr 2030 hinaus fortgeschrieben worden.

Abbildung 4-1 Bevölkerungsentwicklung nach Altersklassen

Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Tabelle 4-1 Bevölkerungsentwicklung nach Altersklassen

	2010	2020	2030	2040	2050
	Anzahl				
Bevölkerung nach Altersklassen					
AK 0-19	13.101.949	11.197.824	10.677.736	10.176.465	9.565.529
AK 20-39	20.365.372	19.035.722	17.088.872	15.163.180	14.316.597
AK 40-64	30.187.876	30.310.686	27.983.676	25.727.570	23.596.234
AK 65-79	12.811.280	13.381.306	15.608.810	15.886.357	14.165.460
AK 80 plus	4.961.571	6.699.054	7.686.539	9.051.390	10.131.300
Gesamtbevölkerung	81.428.048	80.624.592	79.045.633	76.004.962	71.775.120
ggü. 2010		-0,99%	-2,93%	-6,66%	-11,85%

Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

In Abbildung 4-1 sowie Tabelle 4-1 sind die Ergebnisse der Bevölkerungsfortschreibung aufgeführt. Als Orientierung diente die Variante 3 – W1 der 12. koordinierten Bevölkerungsfortschreibung (Destatis, 2012a) mit leichten Verschiebungen innerhalb der Annahmen: die Geburtenhäufigkeit fällt etwas geringer, das Wanderungssaldo hingegen etwas stärker bzw. positiver für die Entwicklung des Bevölkerungsaufbaus aus. Es wurde angenommen, dass sich die Geburtenhäufigkeit bei etwa 1,4 Kindern je Frau einpendelt und somit eine Trendfortsetzung stattfindet (Pötzsch, 2010). Diese Annahme ist auch den mittleren Varianten der 12. koordinierten Bevölkerungsfortschreibung des stat. Bundesamtes zugrunde gelegt.

In diesen Rahmendaten werden zwar die Ergebnisse des Migrationsbericht 2011 des Bundesamtes für Migration und Flüchtlinge (BMI 2013) und des Zensus von 2011 (Destatis, 2013a) noch nicht berücksichtigt, da diese zum Zeitpunkt der Rahmendatenerstellung noch nicht vorlagen; allerdings ist die Wanderungsbewegung schon höher angenommen, als dies in Destatis (2012a) der Fall ist.

Eine weitere wichtige Annahme betrifft die zukünftige Entwicklung der Sterberate. Laut Weber (2010) wirkt sich Urbanisierung positiv auf die Mortalität aus. Da hier von einer Trendfortsetzung ausgegangen wird, wird ein Anstieg der Lebenserwartung modelliert, wenngleich auch weniger stark, als dies in den Varianten mit starkem Anstieg der 12. koordinierten Bevölkerungsfortschreibung der Fall ist. Allerdings ist der Faktor Lebenserwartung der am schwersten zu prognostizierende; in den vergangenen Vorausberechnungen des statistischen Bundesamtes gab es dort im Vergleich die größten Korrekturen (Ehrentraut und Heidler, 2007).

Wie schon im Projektionsbericht 2013 angemerkt (Bundesregierung 2013), ist die Bevölkerungsfortschreibung in die Gruppe der „mittlere Bevölkerung“ des statistischen Bundesamtes einzuordnen und ist somit keine Extremvariante, was im Endeffekt robustere Ergebnisse für Sensitivitätsanalysen bedeutet.

Die Migration innerhalb der NUTS-II-Zonen ist nicht explizit modelliert, was Auswirkungen z.B. auf das regionale Mobilitätsverhalten oder die Beschäftigungsstruktur haben kann; allerdings bestehen Anzeichen, dass die Effekte regionaler Mobilität 20 Jahre nach der Wiedervereinigung in Deutschland im Vergleich zur unterschiedlichen Geburtenrate eher gering ausgeprägt ist (vgl. dazu Sachverständigenrat, 2011); diese ist jedoch explizit modelliert.

4.1.2 Wirtschaftsentwicklung

Für die Ableitung der Entwicklung der Trends auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene werden als Grundlage die projizierten Wachstumsraten des *OECD Economic Outlook 2012/1 preliminary Version* (OECD 2012a) verwendet.

Da diese Projektion vor dem Hintergrund des aktuellen Wirtschaftswachstums in 2012 von 0,7 %[15] sehr optimistisch ausfällt, wird sie um 0,3 Prozentpunkte reduziert. [16] Die für Deutschland resultierende Entwicklung des preisbereinigten Bruttoinlandsproduktes (BIP) ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

Abbildung 4-2 Projektion des preisbereinigten BIP in Mrd. €$_{2010,}$ basierend auf (OECD, 2012) *-0,3 Prozentpunkte(blau) und (OECD, 2012) (rot, gestrichelt)*

Quelle: Destatis (2012c), OECD (2012a), Berechnungen des Öko-Instituts

Aufgrund des weltwirtschaftlichen Einbruchs, der Mitte 2008 eingesetzt hat, ist das Bruttoinlandsprodukt 2009 in Deutschland gegenüber dem Vorjahr um etwa 5 % geschrumpft. Ausgehend von dem stark verminderten Niveau der Wirtschaftstätigkeit 2009 zeigte sich ab dem Jahr 2010 in Deutschland eine unerwartet kräftige Erholung. Die künftige Entwicklung verbleibt allerdings unsicher: In 2012 betrug das Wirtschaftswachstum 0,7% (Destatis 2013).

Für die Projektion des preisbereinigten Bruttoinlandsproduktes ergibt sich vor diesem Hintergrund von 2012 bis 2017 im Durchschnitt ein Wachstum von ca. 1,3 % pro Jahr.

[15] In 2012 betrug das Wirtschaftswachstum gegenüber dem Vorjahr 0,7 %, in 2011 3,0 % und in 2010 4,2 % (vgl. Destatis 2013b, S. 6)

[16] In Anhang 2 wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht, welche Auswirkungen eine Variation der Annahmen zum wirtschaftlichen Wachstum auf die Entwicklung der energiebedingten Emissionen hat.

Von 2018-2030 wird von einer durchschnittlichen Wachstumsrate von knapp 0,8 % pro Jahr ausgegangen. Für den Zeitraum von 2031-2050 wird von einem etwas geringeren Wachstum von ca. 0,7 % pro Jahr ausgegangen, da ab ca. 2030 der Bevölkerungsrückgang spürbar werden wird. Zugleich setzt sich der wirtschaftliche Strukturwandel weiter fort.

Die sektorale Gliederung der Wertschöpfung umfasst die folgenden Sektoren:

- Landwirtschaft
- Industrie (produzierendes Gewerbe)
- Dienstleistungen

Für die Schätzung sektoral differenzierter Bruttowertschöpfung wird das FARM EU Modell auf die oben dargestellte Wirtschaftsentwicklung kalibriert. Die entsprechenden sektoralen Bruttowertschöpfungen werden aus den Modellergebnissen abgeleitet. Tabelle 4-2 fasst die Bruttowertschöpfung nach Sektoren bis 2050 zusammen.

Tabelle 4-2 Preisbereinigte Bruttowertschöpfung nach Sektoren und Bruttoinlandsprodukt (Preisbasis 2010), 2008 – 2050[17]

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	Mrd. € 2010					
Bruttowertschöpfung des produzierenden Gewerbes	680	644	780	806	825	845
Bruttowertschöpfung aus Dienstleistungen	1.650	1.650	1.752	1.944	2.128	2.321
Bruttowertschöpfung der Landwirtschaft	21	19	23	23	22	21
Bruttowertschöpfung gesamt	2.351	2.313	2.589	2.805	3.007	3.221
Bruttoinlandsprodukt	**2.518**	**2.477**	**2.772**	**3.003**	**3.220**	**3.449**

Quelle: Destatis (2012c) , Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Die aggregierten Daten zur Wirtschaftsentwicklung sind in aus FARM EU für einzelne Industriebranchen noch detaillierter aufgeschlüsselt und in Tabelle 4-3 gemäß Gliederung der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung des statistischen Bundesamts (Destatis 2012c) zusammengestellt.

[17] In dieser Tabelle ist die Bruttowertschöpfung für Strom und die Kategorie andere Sektoren, die im Modell separat ausgewiesen werden, nicht gelistet. Daher addieren sich die Bruttowertschöpfungsposten nicht zur Bruttowertschöpfung gesamt.

Tabelle 4-3 Anteile Bruttowertschöpfung der Industrie (Mrd. Euro 2010), 2008 – 2050

Wirtschaftsbereiche Industrie	WZ 2003	2008	2010	2020	2030	2040	2050
		Mrd. € 2010					
Gew. v. Steinen und Erden, sonst. Bergbau	*13, 14 (o. 10.30, 12)*	3	3	3	3	4	4
Ernährung und Tabak	*15,16*	32	32	32	32	30	29
Papiergewerbe	*21*	11	12	13	13	13	14
Grundstofchemie	*24.1*	29	30	32	34	36	38
Sonstige chemische Industrie	*24 o. 24.1*	30	31	34	37	38	40
Gummi- u. Kunststoffwaren	*25*	28	29	32	34	36	38
Glas u. Keramik	*26.1 bis 26.3*	6	7	7	8	8	8
Verarbeitung v. Steine u. Erden	*26 o. 26.1 bis 26.3*	11	11	12	13	14	14
Metallerzeugung	*27.1*	6	7	7	8	8	8
NE-Metalle, -gießereien	*27.4, 27.5*	8	8	9	10	10	10
Metallbearbeitung	*DJ o. 27.1, 27.4, 27.5*	51	53	59	64	66	67
Maschinenbau	*29*	80	83	89	93	96	98
Fahrzeugbau	*34,35*	83	87	93	97	100	103
Sonstiges Verarbeitendes Gewerbe	*17, 18, 19, 20, 30, 31, 32, 33, 36, 37*	168	176	188	196	202	207
Industrie gesamt		**547**	**570**	**612**	**641**	**660**	**678**

Quelle: Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 4-4 Durchschnittliche Wachstumsraten der Bruttowertschöpfung ausgewählter Bereiche der Wirtschaft 2008-2030

Durchschnittliches Wachstum per annum (%)		
	2008-2030	2008-2050
Produzierenden Gewerbes	0,8%	0,5%
Industrie	*0,7%*	*0,5%*
Dienstleistungen	0,7%	0,8%
Landwirtschaft	0,3%	0,0%
Bruttoinlandsprodukt	**0,8%**	**0,7%**

Quelle: Eigene Berechnungen

4.1.3 Beschäftigungsentwicklung

Die Kalkulation der Beschäftigung orientiert sich stark an der Wertschöpfungsentwicklung, welche mit der Arbeitsproduktivität multipliziert wird. Die Beschäftigung in ASTRA-D ergibt sich aus dem Zusammenspiel zwischen Produktivität, Arbeitskräftepotential sowie Entwicklung der Bruttowertschöpfung der Sektoren (siehe dazu auch Bundesregierung 2013). Durch die demographischen Veränderungen, welche eine Verschiebung der Altersstruktur bedingt, ergibt sich eine unvermeidliche Anhebung des durchschnittlichen Alters der Erwerbstätigen. Es wird nicht erwartet, dass dies ein wesentlicher Faktor für die Beeinflussung der Arbeitsproduktivität darstellt (Sachverständigenrat, 2011).

Die Entwicklung der Beschäftigung auf sektoraler Ebene ist in Abbildung 4-3 sowie Tabelle 4-5 aufgeführt. Man sieht hier deutlich, wie die Gesamtzahl der Beschäftigten, bedingt durch den demographischen Wandel, im Zeitverlauf abnimmt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Erwerbsquote schrittweise an das europäische Niveau anpasst (vgl. dazu auch Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2009).

Die Beschäftigung bezieht sich dabei auf Vollzeitäquivalenzstellen. Selbständige sind in diesen Zahlen mit inbegriffen. Die Arbeitsproduktivität ist extern und kalibriert anhand der Input-Outtabellen des statistischen Bundesamtes nach der WZ 2003; sie wird zusätzlich davon beeinflusst, wie nahe anr der Vollbeschäftigung operiert wird (wenn die Arbeitslosenquote unter 5% fällt). Im Vergleich zu den aggregierten Werten nach der WZ 2008 können somit Unterschiede in der Beschäftigtenzahl nach den Sektoren zustande kommen (Bundesagentur für Arbeit, 2010).

Die zukünftige Entwicklung der Arbeitsproduktivitäten ist abgeleitet am Forecast des Economic Outlooks 2012 der OECD (2012); die reziproken Koeffizienten der Faktorproduktivitäten gehen in die Berechnung der Wertschöpfung pro Arbeitnehmer ein. Diese sind allerdings auf die unterschiedliche Annahme zur Wirtschaftsentwicklung herunterskaliert worden. Der Anteil an Teilzeitbeschäftigten pro Sektor wird dabei ab 2015 konstant gehalten.

Die Anteile der sektoralen Beschäftigung ändern sich stärker als die Wertschöpfung. Diese Entwicklung ist vor allem den angenommenen unterschiedlichen Produktivitätsfortschritten in den einzelnen Sektoren geschuldet: dieser ist insbesondere im verarbeitenden Gewerbe überproportional stark. In der Versorgungsindustrie ist, im Einklang mit der stärkeren Dezentralisierung der Stromerzeugung, mit einer Abnahme der Arbeitsproduktivität zu rechnen; dieser Sektor wird eher ein Plus an Beschäftigung zukünftig erzielen (Ragwitz et al., 2009). Die Produktivitätsfortschritte in der Landwirtschaft, im Bausektor sowie in den nicht marktbestimmten Dienstleistungen werden als eher gering eingestuft.

Die Gesamtzahl der Arbeitsstunden ist ein Bestandteil der Cobb-Douglas-Produktionsfunktion zur Berechnung des Produktionspotentials. Die Arbeitsstunden sind dabei abhängig von der durchschnittlichen jährlichen Arbeitszeit. Hierbei kommt es allerdings zu Rückkopplungseffekten, und zwar dann, wenn sich die Endnachfrage dem Produktionspotential stark annähert, bzw. es übersteigt. Der Ausgleich erfolgt durch Überstunden.

Abbildung 4-3 Beschäftigungsentwicklung nach Sektoren

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 4-5 Beschäftigungsentwicklung nach Sektoren

Sektor	WZ 2003	2008	2009	2010	2020	2030	2040	2050
		in Mio.						
Land- und Forstwirtschaft; Fischerei	A, B	860	859					
Bergbau u. gew. v. Steinen u. Erden	C	81	76					
Verarbeitendes Gewerbe	D	7,664	7,44					
Energie- und Wasserversorgung	E	281	280					
Baugewerbe	F	2,193	2,204					
Handel; Reparatur v. Kfz u. Gebrauchsgütern	G	5,979	5,951	7,151	8,312	8,378	9,23	9,666
Gastgewerbe	H	1,842	1,905	1,266	1,446	1,363	1,445	1,439
Verkehr und Nachrichtenübermittlung	I	2,224	2,209	1,37	1,494	1,711	1,881	2,032
Kredit- und Versicherungsgewerbe	J	1,179	1,176	1,438	1,691	1,614	1,718	1,742
Grundstueckswes., Verm., Dienstl. f. Untern.	K	5,831	5,778	7,399	7,451	7,196	7,695	7,89
Öff. Verw. Verteidigung, Sozialversicherung	L	2,639	2,654	2,518	2,247	2,017	1,84	1,684
Erziehung und Unterricht	M	2,397	2,454	1,877	1,693	1,542	1,438	1,336
Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen	N	4,223	4,355	3,175	2,954	2,769	2,673	2,537
Sonstige öff. u. priv. Dienstleister, häusl. Dienste	O, P	2,883	2,93	1,377	1,345	1,248	1,284	1,261
Alle Dienstleistungsbereiche		29,197	29,412	27,572	28,632	27,838	29,205	29,588

Quelle: Eigene Berechnungen

Die sektorale Beschäftigung wird mit den durchschnittlichen Arbeitsstunden pro Jahr multipliziert und bildet neben der Kapitalbildung und dem endogenen technischen Fortschritt eine Ausgangsbasis für die Produktionsfunktion zur Berechnung des langfristigen jährlichen Wachstums. Angemerkt werden muss, dass in ASTRA-D keine Unterscheidung nach Qualifikationsniveau getroffen wird.

4.2 Entwicklung der Primärenergiepreise

4.2.1 Vorbemerkungen

Die zukünftige Entwicklung der Brennstoffpreise bildet eine entscheidende Determinante für die Erarbeitung von Projektionen für die zukünftige Energie- bzw. Emissionsentwicklung. Die Annahmen zu den zukünftigen Energieträgerpreisen beeinflussen dabei ganz wesentlich sowohl die Konfiguration des Energiesystems als auch dessen gesamte Systemkosten und die Energiepreise für die verschiedenen Verbrauchergruppen. Für die Entwicklung von Projektion für Energieträgerpreise ergeben sich vor allem zwei zentrale Fragen:

- Was sind die Leitgrößen der Energiepreisentwicklung und deren Bestimmungsparameter?
- Welchen Einfluss haben diese Leitgrößen auf die Entwicklung der Energiepreise für die verschiedenen Einsatzbereiche?

In der hier vorgelegten Analyse wird diesen Fragen für diejenigen Brennstoffpreise nachgegangen, für die erstens eine starke Abhängigkeit von den Entwicklungen auf den internationalen Brennstoffmärkten für Öl, Erdgas und Kohle zu konstatieren ist und die zweitens für den Bereich der Stromerzeugung relevant sind (eine weitere Analyse wird sich mit der Entwicklung der Brennstoffpreise für weitere Sektoren beschäftigen).

Die Untersuchung folgt für die unterschiedlichen Aspekte einem dreistufigen Analyseansatz:

- In einem ersten Schritt werden die historische Entwicklung der Grenzübergangspreise für Rohöl, Erdgas und Steinkohle und der Einfluss von Wechselkursen und Preisbereinigungen dokumentiert (Abschnitt 4.2.2).
- In einem zweiten Schritt werden eine Reihe aktueller Mainstream-Projektionen für die globalen Rohölpreise dargestellt und eine Empfehlung für die den Projektionen zu Grunde zu legende Projektion und die entsprechenden Wechselkursgrößen erarbeitet (Abschnitt 4.2.3).
- In einem dritten Schritt werden basierend auf der Entwicklung des Rohölpreises die Entwicklungen der Grenzübergangspreise Rohöl, Erdgas und Steinkohle fortgeschrieben (Abschnitt 4.2.4).

4.2.2 Preisprojektionen für Rohöl auf dem Weltmarkt

Für die Entwicklung der international, bzw. auf dem Weltmarkt gehandelten, Primärenergieträger bildet der Trend auf den Rohölmärkten einen entscheidenden Anker.

Die langfristige Entwicklung der Ölpreise hängt von vielen Faktoren ab: neben der Marktmacht der OPEC insbesondere von dem künftigen weltwirtschaftlichen Wachstum sowie den weltweit verfolgten energie- und umweltpolitischen Strategien. Die künftige Entwicklung dieser Faktoren ist mit Unsicherheit verbunden. Die Unsicherheit über

die Entwicklung der Ölpreise wird noch dadurch verstärkt, dass die Preise für Rohöl zunehmend auch durch Finanzmärkte bestimmt werden. Unter dem Einfluss unsicherer Erwartungen über künftige Entwicklungen hat die Volatilität der Preise in den letzten Jahren deutlich zugenommen.

Abbildung 4-4 Historischer Verlauf und aktuelle Projektionen für die Entwicklung des Rohölpreises auf dem Weltmarkt, 1980 – 2050

Quellen: EIA (2012), IEA (2011), Prognos et al. (2010), EC (2010), EC(2011), Berechnungen des Öko-Instituts.

Die Zusammenstellung ausgewählter Preisprojektionen in Abbildung 4-4 zeigt die große Bandbreite der in aktuellen Analysen unterstellten Ölpreisprojektionen. Alle Preisangaben wurden auf die Preisbasis 2010 umgerechnet, sofern sie nicht bereits in konstanten Preisen von 2010 angegeben waren. Für die Preisbereinigung wurden die BIP-Deflatoren verwendet, die vom Statistischen Bundesamt (Destatis) für den Euro und vom U.S. Bureau of Economic Analysis (BEA) für den US-Dollar veröffentlicht werden.

Im Vergleich der verschiedenen Projektionen ist auf eine Reihe interessanter Aspekte hinzuweisen:

- In den eher prognostisch orientierten Projektionen in der Referenzvariante des Annual Energy Outlook (AEO) der Energy Information Administration (EIA 2012) sowie im Current Policy Scenario (CPS) des World Energy Outlook 2011 der International Energy Agency (IEA 2011) werden für das Jahr 2020 Preisniveaus (in konstanten Preisen von 2010) von knapp 126 bzw. 118 US-Dollar je Fass Öl ($/bbl) erwartet. Bis 2030 wird sich nach diesen Projektionen der Preisanstieg fortsetzen und etwa im Jahr 2035 das Niveau von 145 bzw. 140 $/bbl erreichen.

- Das ebenfalls prognostisch angelegte Primes-Baseline-Szenario 2009 und des Primes-Referenzpreispfades für die im Rahmen der Energy Roadmap 2050 erstellten Analysen der Europäischen Kommission (EC 2010, EC 2011) unterstellt dagegen bis 2020 Ölpreise von 90 $/bbl, die dann bis 2030 Werte von 108 $/bbl erreichen. Im Gutachten für das Energiekonzept der Bundesregierung (Prognos et al. 2010) wurde ein Anstieg der Ölpreise auf knapp 100 $/bbl in 2020 zu Grunde gelegt, bis 2030 ergeben sich hier – bei tendenziell abnehmenden Steigerungsraten – Preisniveaus von 112 $/bbl in 2030, 123 $/bbl in 2040 und 133 $/bbl in 2050.
- In der Projektion der EIA (2012) werden neben der Referenzvariante auch noch Szenarien für hohe und niedrige Rohölpreise untersucht. Der obere Rand des Preisspektrums (ca. 189 $/bbl in 2020 bzw. bis knapp 200 $/bbl nach 2030) wird mit einer steigenden Marktmacht der OPEC begründet, die sich einstellen würde, wenn die unkonventionelle Ölgewinnung außerhalb der OPEC nicht schnell genug gesteigert wird, um bei deutlich steigendem Bedarf eine sinkende konventionelle Ölgewinnung ausgleichen zu können. Durch Maßnahmen wie eine verbesserte Ausbeute konventioneller Ressourcen, eine verstärkte Nutzung alternativer Kraftstoffe und zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen könnte der Anstieg des Rohölpreises jedoch auch deutlich gedämpft werden. Bei (sehr) geringem Wirtschaftswachstum und (sehr) hohen Investitionen im Ölsektor werden am unteren Rand sehr niedrige Preisniveaus (für den Zeithorizont 2020/2030 etwa 60 $/bbl) angesetzt.
- Eine interessante Sensitivitätsanalyse wird im World Energy Outlook (IEA 2011) wiederholt präsentiert. Hier werden der Einfluss von Klimaschutzpolitik und die damit einhergehenden Nachfrageeffekte berücksichtigt. Im New Policy Scenario (NPS), das die Umsetzung der auf der 15. Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonferenz initiierten Minderungszusagen (Copenhagen Accord) berücksichtigt, stellt sich 2020 ein Ölpreisniveau von knapp 100 $/bbl ein. Im Vergleich zum Referenzszenario CPS (s.o.) entspricht dies einem um knapp 20 $/bbl niedrigeren Wert. Im Jahr 2035 wird in diesem Szenario ein Preis von etwas über 113 $/bbl erreicht, dies sind ca. 27 $/bbl weniger als im Referenzszenario. In einem Szenario, dass sich an der Einhaltung des sog. 2°C-Ziels und einer Begrenzung der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre auf 450 ppm (450 Scenario) orientiert, bleiben die Rohölpreise auch längerfristig auf einem Niveau von 97 $/bbl.

Vor dem Hintergrund der vorliegenden Analysen aus dem internationalen Raum wird für die Modellierungen im hier behandelten Projekt der Preispfad des Referenzszenarios im Early Release des Annual Energy Outlook (EIA 2012) zu Grunde gelegt, der um bis zu 10 $ über der Referenzvariante des World Energy Outlooks liegt (IEA 2011). Für den Zeitraum ab 2035 wird die Dynamik der Vorjahre fortgeschrieben. Damit ergeben sich für den für Deutschland relevanten Korb von Rohölsorten die folgenden Preisannahmen (zum Vergleich: 2008 betrug das Preisniveau etwa 100 $/bbl):

- 117 $/bbl für 2015
- 127 $/bbl für 2020
- 138 $/bbl für 2030
- 151 $/bbl für 2040
- 163 $/bbl für 2050.

Dieser Preispfad wird für die Ableitung der Primärenergiepreise für Erdgas und Steinkohle bzw. der jeweiligen Sekundärenergieträger zu Grunde gelegt.

4.2.3 Projektion für die Entwicklung der Wechselkurse

Neben der Entwicklung des Rohölpreises auf Dollarbasis spielt die zukünftige Entwicklung des Wechselkurses eine entscheidende Rolle für die Entwicklung der in Deutschland wirkenden Preissignale aus den Energiemärkten. Als Referenz für die Entwicklung der Wechselkurse zwischen Euro und US-Dollar kann v.a. auf zwei jüngere prognostische Arbeiten zurückgegriffen werden:

- Aus dem Gutachten zum Energiekonzept (Prognos et al. 2010) lässt sich für das Jahr 2020 ein Wechselkurs von 1,25 Dollar je Euro rückrechnen. Diese Wechselkursannahme geht von einem weiter fallenden Trend aus, im Jahr 2030 beträgt der Wechselkurs noch 1,16 und im Jahr 2040 1,07. Für das Jahr 2050 wird ein Wert von nur noch 0,98 angenommen.
- In der Primes-Baseline-Projektion der Europäischen Kommission (EC 2010) verläuft die Wechselkursentwicklung bis 2030 sehr ähnlich, für 2020 wird ein Wert von etwa 1,22 $/€ erwartet, für 2030 werden 1,16 $/€ unterstellt.

Im Lichte der aktuellen Entwicklungen sowie mit Blick auf die Entwicklung der Kaufkraftparitäten zwischen US-Dollar und Euro wird für die Modellierung ein Wechselkurs von 1,22 $/€ und für 2030 von 1,16 $/€ unterstellt. Für den Zeitraum nach 2030 wird der Wechselkurs auf dem Niveau von 1,16 $/€ konstant gehalten.

4.2.4 Preisprojektionen für Erdgas und Steinkohle

Historisch sind die Weltmarktpreise für Steinkohle sowie die Preise auf dem kontinentaleuropäischen Erdgasmarkt, wenn auch mit unterschiedlichen Dynamiken, sehr stark dem Rohölpreis gefolgt. Abbildung 4-5 verdeutlicht diesen Zusammenhang für ein Erklärungsmodell, mit dem die Grenzübergangspreise für Erdgas- und Steinkohle über die Rohölpreise modelliert werden (Öko-Institut 2010). Von sehr wenigen Ausnahmen abgesehen, können damit die Erdgas- und Steinkohlenpreise seit Mitte der 1990er Jahre über den Rohölpreis robust erklärt werden.

Abbildung 4-5 Historischer Verlauf und Modellierung von Rohöl-, Erdgas- und Steinkohlenpreisen, 1970 – 2010

Quellen: Statistisches Bundesamt (Destatis), Berechnungen des Öko-Instituts

Die Frage, ob man diese Preisbildungsmechanismen (für Europa) fortschreiben kann, ist jedoch in jüngster Zeit Gegenstand intensiver Diskussionen gewesen. Ein zentrales Argument dabei ist die massive Zunahme der Gewinnung von unkonventionellem Erdgas, vor allem in den USA und als Folge davon ein niedriger Importbedarf von verflüssigtem Erdgas (Liquified Natural Gas – LNG). Vor dem Hintergrund der in den letzten Jahren massiv ausgebauten Förder- und Transportinfrastrukturen für LNG würden dadurch erhebliche LNG-Mengen vom ursprünglich vorgesehenen Zielmarkt USA auf die Märkte in Europa und Asien umgelenkt, dort zu einem Überangebot führen („Gasschwemme“) und entsprechend die Preisniveaus drücken. Gleichzeitig absorbiert Japan nach dem Abschalten eines Großteils der installierten Kernkraftwerkskapazitäten einen Teil der LNG-Mengen. Obwohl die Verfügbarkeit größerer Erdgasmengen für den europäischen Markt mittelfristig durchaus eine hohe Wahrscheinlichkeit hat, bleibt die Frage, in welchem Umfang sich geänderte Preisbildungsmechanismen durchsetzen (lassen).

Die Bandbreite der aktuellen Projektionen für Erdgas-Grenzübergangspreise für Europa zeigt Abbildung 4-6.

Abbildung 4-6 Historischer Verlauf und aktuelle Projektionen für die Entwicklung des Erdgaspreises auf dem kontinentaleuropäischen Markt, 1980 – 2050

Quellen: Statistisches Bundesamt (Destatis), IEA (2011), Prognos et al. (2010), EC (2010), EC(2011), Berechnungen des Öko-Instituts

Die Unterschiede zwischen den Projektionen der IEA (2011) und der für die Europäische Kommission erstellten Analysen (EC 2010, EC 2011) einerseits und im Gutachten zum Energiekonzept (Prognos et al. 2010) andererseits sind erheblich. Obwohl auch die IEA das Thema „Gasschwemme“ für Europa umfangreich herausstellt, liegen die Annahmen hier für den Zeithorizont 2035 für das Current Policy Scenario um fast 1 Eurocent je Kilowattstunde (ct/kWh), zu Preisen von 2010 und bezogen auf den unteren Heizwert (Hu/NCV), über den Annahmen von Prognos et al. (2010).[18] Nur in den klimapolitisch ambitionierteren Szenarien ergeben sich – vor allem bedingt durch die dort errechneten niedrigeren Ölpreisniveaus – etwas niedrigere Erdgaspreise. Für die Entwicklung der Weltmarkt- bzw. Importpreise von Steinkohle für Nordwesteuropa liegen die Werte nach Prognos et al. (2010) ebenfalls unter den Annahmen in der für eine Referenzentwicklung unter den heutigen Rahmenbedingungen relevanten Szenarienvariante (Current Policies Scenario – CPS) der IEA im aktuellen World Energy Outlook (IEA 2011). Einen im Vergleich aller Projektionen sehr steilen Verlauf nehmen die Prei-

[18] Die von der IEA (2011) in US-Cent ausgewiesenen Erdgaspreise wurden mit den o.g. Annahmen für die Wechselkurse zwischen US-Dollar und Euro in Eurocent umgerechnet. Würden die nach Prognos et al. (2010) ab 2030 weiter zurückgehenden Wechselkurse in Ansatz gebracht, würden die Unterschiede zwischen den Erdgaspreisen des World Energy Outlook (IEA 2010) und Prognos et al. (2010) im Zeitraum 2030 bis 2035 deutlich größer ausfallen.

sprojektionen für Steinkohle in der Primes-Baseline 2009 (EC 2010) und des Referenzpfades der Energy Roadmap 2050 (EC 2011).

Abbildung 4-7 Historischer Verlauf und aktuelle Projektionen für die Entwicklung des Steinkohle-Weltmarktpreises für Lieferungen nach Nordwest-Europa, 1980 – 2050

Quellen: Statistisches Bundesamt (Destatis), IEA (2011), Prognos et al. (2010), EC (2010), Berechnungen des Öko-Instituts

Vor diesem Hintergrund wird im für das hier behandelte Projekt der Ansatz verfolgt, die aus der Vergangenheit ermittelten statistischen Zusammenhänge für die Preisentwicklung von Rohöl auf der einen Seite und Erdgas und Steinkohle (beides für Kontinental- bzw. Nordwesteuropa) auf der anderen Seite (Öko-Institut 2010) durch einen Dämpfungs-Koeffizienten zu ergänzen, der den Projektionen der IEA zugrunde liegt. Abbildung 4-8 zeigt die Effekte der Einführung dieses Dämpfungsfaktors, wie auch den enormen Preis treibenden Effekt der (moderaten) Wechselkursannahme. Die Sensitivität der Erdgas- und Steinkohlenpreise zur Rohölpreisentwicklung wird damit zwar etwas gedämpft, bleibt aber deutlich zu erkennen.

Abbildung 4-8 Historischer Verlauf und Projektion für die Entwicklung des Weltmarktpreises für Rohöl sowie der europäischen Preise für Erdgas und Steinkohle Markt, 2000 – 2050

Quellen: Statistisches Bundesamt (Destatis), Berechnungen des Öko-Instituts

4.2.5 Preisprojektionen für Braunkohle

Nach Prognos (2011) werden für den Zeitraum bis 2050 konstante Brennstoffkosten in Höhe von 4,6 $€_{2009}$/MWh_{th} für Braunkohle angegeben. Diese Angabe wurde anhand aktueller Geschäftsberichte der Vattenfall Europe Mining und der Mibrag überprüft. Eine einfache Division der Erlöse und des Rohbraunkohleabsatzes an die Kraftwerke Lippendorf und Schkopau ergibt Kosten in Höhe von 7,6 €/MWh_{th} im Jahr 2010 (Mibrag 2011). Für Vattenfall Europe Mining (VEM 2011) konnten im Jahr 2010 Rohbraunkohlekosten in Höhe von 6,1 € / MWh_{th} ermittelt werden.[19] Leider konnten für RWE Power keine Braunkohlekosten ermittelt werden, weil die entsprechenden Kennzahlen nicht veröffentlicht werden.

Es zeigt sich deutlich, dass die von Prognos (2011) verwendeten Braunkohlepreise zumindest im Sinne von Vollkosten zu niedrig angesetzt wurden. Für die Energiepreisprojektion im hier behandelten Projekt wird für die Ausgangsbasis der Braunkohlepreis der Vattenfall Europe Mining in Höhe von 6,1 €/MWh_{th} verwendet.

[19] Dabei wurde der Absatz an Veredelungsprodukten (Brikett, Staub, Wirbelschichtbraunkohle) mit 15 €/MWh_{th} bewertet.

Darüber hinaus ist zukünftig auch mit einer sinkenden Kapazitätsauslastung der Braunkohlenkraftwerke und damit auch der die Kraftwerke direkt und ohne Zwischenlagerung beliefernden Braunkohlentagebaue zu rechnen. Da etwa die Hälfte der Kosten für die Braunkohleförderung auf Fixkosten entfällt, ist bei einer niedrigeren Kapazitätsauslastung auch mit höheren Vollkosten der Förderung zu rechnen. Nach Prognos/EWI/GWS (2011) sinken die Volllaststunden der Braunkohlekraftwerke bis zum Jahr 2030 auf etwas über 5000 Stunden. Für das Jahr 2040 errechnet Prognos/EWI/GWS (2010) im Szenario A nur noch etwa 3000 Volllaststunden. Dieser Wert wird bis zum Jahr 2050 konstant gehalten.[20]

Tabelle 4-6 Entwicklung der Brennstoffkosten für Braunkohle in Deutschland, 2008 bis 2050

		2010	2020	2030	2040	2050
Volllaststunden	h	6.814	6.692	5.265	3.000	3.000
Fixkosten	€ /kW	20.783	20.783	20.783	20.783	20.783
Fixkosten	€ /MWh	3,1	3,1	3,9	6,9	6,9
Variable Kosten	€ /MWh	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Summe Kosten	€ /MWh	6,1	6,2	7,0	10,0	10,0
Summe Kosten	€ /GJ	1,7	1,7	1,9	2,8	2,8
Anmerkung: Für das Jahr 2010 wurden die Volllaststunden des Jahres 2008 (Prognos/EWI/GWS 2011) verwendet						

Quellen: VEM (2011), Prognos/EWI/GWS (2010), Prognos/EWI/GWS (2011), Berechnungen des Öko-Instituts

Die orientierenden Berechnungen in Tabelle 4-6 zeigen, dass die Vollkosten der Braunkohlenversorgung vor dem Hintergrund der geringeren Auslastung von aktuell 6,1 $€_{2010}/MWh_{th}$ auf etwa 10 $€_{2010}/MWh_{th}$ für den Zeithorizont 2040 bis 2050 steigen werden.

4.2.6 Zusammenfassung für die Projektion der Primärenergiepreise

Die Ergebnisse der Datenanalysen und Berechnungen zur Entwicklung der Primärenergieträger-Preise (Grenzübergangspreise für Rohöl, Erdgas und Steinkohle bzw. Gestehungskosten für Braunkohle) für den Referenzfall sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst.

Bereits im Jahr 2020 werden die Preise für die fossilen Brennstoffe Rohöl und Erdgas die hohen Preisniveaus des Jahres 2008 deutlich übertreffen. Der Preis von Steinkohle steigt jedoch langsamer und wird erst wieder in der Dekade zwischen 2030 und 2040 über das Niveau von 2008 steigen.

[20] (Nach Prognos/EWI/GWS (2010) beträgt die installierte Leistung der Braunkohlekraftwerke in 2050 weniger als 1 GW. Gleichzeitig steigt die Volllaststundenzahl im Jahr 2050 wieder auf über 5.000 Stunden. Die steigende Volllaststundenzahl ist offensichtlich auf einen Sondereffekt der Berechnung zurückzuführen. Für die Berechnung der Kostenstruktur wurde die Volllaststundenzahl auf 3.000 Stunden im Jahr 2050 korrigiert)

Tabelle 4-7 Ergebnisse der Referenzpreis-Projektionen für Rohöl, Erdgas, Stein- und Braunkohle, 2008-2050

		Historische Werte		Projektion				
		2005	2008	2015	2020	2030	2040	2050
Rohöl	US-$/bbl	58	104	117	127	138	151	163
Rohöl	€/t	329	493	641	724	832	907	978
Erdgas	€/MWh (Ho)	16,5	26,7	28,5	32,7	37,1	39,9	42,9
Steinkohle	€/t SKE	68	114	94	105	111	118	126
Rohöl	€/GJ	7,5	12,0	15,6	17,6	20,3	22,1	23,8
Erdgas	€/GJ	5,1	8,2	8,8	10,1	11,4	12,3	13,2
Steinkohle	€/GJ	2,3	3,9	3,2	3,6	3,8	4,0	4,3
Braunkohle	€/GJ		1,7	1,7	1,7	1,9	2,8	2,8
Anmerkung: Alle Preisangaben als reale Preise (Basis 2010); soweit nicht anders ausgewiesen beziehen sich alle Angaben auf den unteren Heizwert (Hu/NCV)								

Quellen: Berechnungen des Öko-Instituts

4.3 Preise für Treibhausgas-Emissionsberechtigungen

Auch Vorausschätzungen der künftigen Preise für Emissionsberechtigungen sind mit großen Unsicherheiten verbunden. Der Preis liegt gegenwärtig mit rund 3,5 Euro je EU-Emissionsberechtigung (€/EUA) weit unter früheren Erwartungen, was vor allem durch die im Zuge der Wirtschaftskrise (und den massiven Zufluss von Emissionsminderungskrediten aus den flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls) entstehenden Überschuss an Emissionsberechtigungen zu erklären ist (Öko-Institut 2012). Mit der Überwindung der Wirtschaftskrise und dem Abbau der Überschussmengen, dürften die CO_2-Zertifikatspreise jedoch perspektivisch wieder steigen. Die künftige Entwicklung der CO_2-Preise hängt darüber hinaus (abgesehen von Energiepreisen) von den Zielen zur Reduktion von CO_2-Emissionen, von der weiteren Einbeziehung von Emissionsminderungsgurtschriften aus den flexiblen Mechanismen sowie von der Wirkungsmächtigkeit komplementärer Politiken (erneuerbare Energien, Energieeffizienz) ab. Für alle diese Aspekte verbleiben zum gegenwärtigen Stand erhebliche Unsicherheiten.

Für die Entwicklung der CO_2-Preise sind jedoch in jedem Fall zwei verschiedene Preispfade zu unterscheiden: einerseits ein Pfad, der den aktuellen politischen Rahmen abdeckt und andererseits eine Preisentwicklung, die einen ambitionierteren Klimaschutzpfad der Europäischen Union repräsentiert.

Hinsichtlich der Referenzentwicklung ergibt sich die im Folgenden beschriebene Situation. In den Analysen des Gutachtens zum Energiekonzept (Prognos et al. 2010) wurde der CO_2-Preis in der Referenzentwicklung 2020 auf 20 €/EUA sowie 2030 auf 30 €/EUA festgesetzt und wurde dann bis 2040/2050 mit 40 bzw. 50 €/EUA fortgeschrieben (Preisbasis jeweils 2008). In den Analysen der Europäischen Kommission zur Energy Roadmap 2050 wurde in der Referenzentwicklung für 2020 ein CO_2-Preis von 18 €/EUA sowie für 2030 von 40 €/EUA ermittelt, für 2040/2050 ergeben sich Preise von um die 50 €/EUA (Preisbasis jeweils 2008).

Tabelle 4-8 Projektion der EU Energy Roadmap 2050 für die Preise von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen, 2020-2050

	EUA-Preis				Minderungspfad			
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
	€(2008) / EUA				ggü. 2005			
Reference Scenario	18	40	52	50	-23%	-37%	-55%	-62%
Current Policy Initiative Scenario	15	32	49	51	-28%	-38%	-52%	-57%
High Efficiency Scenario	15	25	87	234	-32%	-51%	-74%	-93%
High Renewables Scenario	25	35	92	285	-32%	-56%	-76%	-92%
High Nuclear / Delayed CCS Scenar	25	55	190	270	-32%	-54%	-76%	-92%
High CCS / Low Nuclear Scenario	20	63	100	310	-30%	-51%	-74%	-94%
Diversified Supply Options Scenario	25	52	95	265	-32%	-53%	-74%	-93%
Anmerkung: Die Emissionsminderungsraten beziehen sich auf die vom EU ETS erfassten stationären Anlagen.								

Quellen: EU (2011), Berechnungen des Öko-Instituts

Mit Blick auf die aktuellen Marktentwicklungen (derzeit werden an der ICE ECX bereits Futures für Lieferungen im Jahr 2020 gehandelt) bestätigt sich diese Referenzentwicklung. Abbildung 4-9 zeigt die Entwicklung der Preise für EU-Emissionsberechtigungen mit Liefertermin Dezember 2020, also zur Erfüllung der Compliance-Verpflichtungen für das Jahr 2020. Die Übersicht zeigt, dass hier derzeit Preise um 15 €/EUA (nominal) erzielt werden. Zu etwas höheren Ergebnissen für 2020 kommen andere Modellanalysen zur Frage des 20%- vs. 30%-Ziels für die Europäische Union in 2020. PIK et al. (2011) ermitteln hier, ebenfalls auf Grundlage des PRIMES-Modells, für das Jahr 2020 CO_2-Preise von knapp 20 €/EUA.

Abbildung 4-9 Settlement-Preise für den EUA-Spotmarkt sowie EUA-Futures mit Lieferung im Dezember 2012 und Dezember 2020, 2010 bis 2011

Quelle: EEX, ICE EEX

Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass die o.g. Modellanalysen die derzeitige Überschusssituation im EU ETS nicht berücksichtigen (können) und diese Überschusssituation sich ohne weitere Maßnahmen bis weit in die Dekade von 2010 bis 2020 erstrecken wird, ist jedoch für 2020 eher mit niedrigeren CO_2-Preisen zu rechnen. Für das Stützjahr 2020 werden daher die Werte zugrunde gelegt, die in einer explizit der Angebots- und Nachfragesituation des EU ETS gewidmeten Untersuchung (Öko-Institut 2012) abgeschätzt wurden.

Für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) werden damit die folgenden Preistrajektorien für EU-Emissionsberechtigungen in Ansatz gebracht (jeweils in Preisen von 2010):

- für das Jahr 2020 ein Wert von 14 €/EUA,
- für das Jahr 2030 ein Wert von 30 €/EUA,
- für das Jahr 2040 ein Wert von 40 €/EUA,
- für das Jahr 2050 ein Wert von 50 €/EUA.

Den im Rahmen eines ambitionierteren Klimaschutzpfades der EU erwartbaren CO_2-Preisentwicklungen liegen die folgenden Überlegungen zugrunde.

Für die entsprechenden Varianten in den Ausgangsannahmen von Prognos et al. (2010) wurde ein Preis von 20 €/EUA für 2020, 38 €/EUA für 2030, 57 €/EUA für 2040 sowie 75 €/EUA für 2050 ermittelt. In den Analysen für die EU Energy Roadmap 2050 (EU 2011) ergeben sich – vor allem in Abhängigkeit vom Profil des Technologiemixes sowie dem Ausmaß komplementärer Politiken – die folgenden Bandbreiten (alle Angaben in Preisen von 2008):

- für das Jahr 2020 im Bereich von 15 bis 25 €/EUA,
- für das Jahr 2030 im Bereich von 25 bis 63 €/EUA,
- für das Jahr 2040 im Bereich von 87 bis 190 €/EUA,
- für das Jahr 2050 im Bereich von 234 bis 310 €/EUA.

Den Annahmen für die CO_2-Preise im Klimaschutzszenario 80 liegen hier die folgenden Überlegungen zugrunde:

- die Annahme für das Jahr 2020 wird wiederum aus den Analysen des Öko-Instituts zur Angebots- und Nachfragesituation (Öko-Institut 2012) ein Preisniveau von etwa 30 €/EUA abgeleitet (dies ist konsistent zu einem EU-Minderungsziel von 25% ggü. 1990 im Bereich der einheimischen Erbringung);
- für die Jahre 2030 und 2040 werden die Werte aus den Modellierungsarbeiten zur EU Energy Roadmap 2050 abgeleitet und auf 50 €/EUA (2030) sowie 90 €/EUA (2040) veranschlagt (dies entspricht einer Entwicklung, in der komplementäre Politiken im Bereich der erneuerbaren Energien und für die Erhöhung der Energieeffizienz eine signifikante Rolle spielen);
- für die Perspektive 2050 (also dem Stützjahr für eine sehr weitgehende Dekarbonisierung) wird nicht mehr dem Ansatz der Analysen für die EU Energy Roadmap 2050 gefolgt, sondern eine Umsetzung der letzten Emissionsminderungsstufe durch Maßnahmen mit deutlich geringeren Verteilungseffekten un-

terstellt, über die sich CO_2-Preise in der Größenordnung von etwa 130 €/EUA ergeben würden.

Zur Zielerreichung im Klimaschutzszenario 90 wird in 2020 ein CO_2-Preis von 30 €/EUA im Jahr 2020 angenommen, der bis zum Jahr 2050 linear auf 200 €/EUA ansteigt.[21]

Tabelle 4-9 gibt einen Überblick über die in den einzelnen Szenarien angenommenen Preise der Treibhausgas-Emissionszertifikate.

Tabelle 4-9 Preise für Treibhausgas-Emissionszertifikaten in den Szenarien, 2010-2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	EUR(2010)/EUA				
AMS (2012)	15	14	30	40	50
Klimaschutzszenario 80	15	30	50	90	130
Klimaschutzszenario 90	15	30	87	143	200

Quelle: Prognos et al. (2010), EU (2011), Öko-Institut (2012), Eigene Berechungen

4.4 Rahmendaten in einzelnen Sektoren

4.4.1 Verkehr

An dieser Stelle wird in Kürze auf die zugrunde liegenden Rahmendaten für die Modellierung und die Untersuchungen des Verkehrssektors eingegangen.

4.4.1.1 Datengrundlagen für die Verkehrsleistungsmodellierung mit ASTRA-D

Zur Ableitung der Verkehrsleistung wird in ASTRA-D versucht, aus den vorhandenen Datensätzen ein möglichst konsistentes Gesamtbild des Verkehrssektors zu entwerfen. In der Kalibrierung der Modellierung wird für den Personenverkehr dazu auf folgende zwei Erhebungen zurückgegriffen:

Das *Mobilitätspanel* (MoP 2008, im Folgenden MoP) ist Teil der Untersuchung *Haushaltspanel zum Verkehrsverhalte*n der TNS Infratest Verkehrsforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Der verkehrswissenschaftliche Bereich MoP wird hierbei vom Institut für Verkehrswesen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) begleitet und ausgewertet. Ziel des MoP ist eine Datengrundlage für Vorher-Nachher-Untersuchungen zu schaffen und Veränderungen

[21] Für die Parametrisierung des CO_2-Preises im Klimaschutzszenario 90 wurden Testläufe im PowerFlex-Modell durchgeführt, anhand deren festgestellt werden konnte, ab welchem CO_2-Preis es zu einem signifikanten Brennstoffwechsel von Kohle zu Erdgas kommt und insgesamt die CO_2-Emissionen des Kraftwerkssektors deutlich sinken, sodass die Zielerreichung insgesamt (über alle Szenarien hinweg) sichergestellt werden konnte.

im Verkehrsverhalten aufzuzeigen. Dies geschieht durch eine jährliche Erhebung der Verkehrsdaten von Haushalten. Tabelle 4-10 gibt einen kurzen Überblick über die Charakteristika des MoP.

Tabelle 4-10 Überblick über Eigenschaften des Mobilitätspanels

Auftraggeber/-nehmer	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; Erhebung durch TNS Infratest, Institut für Verkehrswesen des KIT
Jahr/Turnus	seit 1994 jährlich, seit Sommer 1999 zusätzlich neue Bundesländer
Ziel	· regelmäßige Erhebungen zur Produktion zeitnaher Informationen zum Verkehrsgeschehen · Ursachen für Veränderungen im Verkehrsverhalten · „Einordnung von Querschnitt (MiD) in den Längsschnitt“ (MoP) · „Referenzbasis für Vorher-Nachher-Untersuchungen“
Grundgesamtheit und Stichprobe	· Grundgesamtheit o alle deutschsprachigen Haushalte in Deutschland · Stichprobe o 700 private Haushalte (1995) o 2316 private Haushalte (2011) o Haushalte nehmen drei Jahre in Folge teil, jährlich 1/3 neue Teilnehmer o Datenerhebung von maximal fünf Personen im Haushalt
Ablauf (2011)	· 1. Erhebung (Alltagsmobilität) o Haushaltsfragebogen (Wohnlage, Verkehrssituation, Anzahl der Personen im Haushalt, Pkw-Besitz, Geburtsjahr, Berufstätigkeit, Führerscheinbesitz) o Wegetagebuch für eine Woche (Wochentag, Start- und Endzeit, Entfernung, Zweck, Verkehrsmittel) · 2. Erhebung (Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch) o Tankbuch (Tankvorgänge und jeweilige Tachostände über 2 Monate) o allgemeine Daten zum Pkw (Marke, Typ) o Nutzung (privat, geschäftlich)
Besonderheiten	· Unterscheidung zwischen HH mit und ohne Pkw · wenig bzw. nicht mobile Teile der Bevölkerung sind tendenziell etwas unterrepräsentiert (z.B. Pflegebedürftige), im üblichen Rahmen mobile Personenkreise werden entsprechend der Grundgesamtheit repräsentiert · Problem: Wegen des Erhebungsaufwandes kann es vorkommen, dass Haushalte zwischen Erhebungswellen aus dem MOP aussteigen. à Achtung bei Auswertung der Daten als Panel, insbesondere bei Übergängen zwischen Jahren

Quelle: Fraunhofer ISI

Mobilität in Deutschland (MiD 2008) ist eine Studie, die ebenfalls vom BMVBS in Auftrag gegeben und vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und von infas (Institut für angewandte Sozialwissenschaften) durchgeführt wird. Im Gegensatz zum MoP kann man das MiD als umfassende Momentaufnahme der Verkehrssituation in Deutschland bezeichnen, da die Erhebung alle fünf Jahre neu durchgeführt wird. Eine große Stichprobe ermöglicht hierbei eine diversifizierte Datengrundlage für Verkehrsmodellierungen. Tabelle 4-11 zeigt schematisch die Modalitäten auf, nach welchem die Daten der MiD erhoben werden.

Tabelle 4-11 Überblick über Eigenschaften von Mobilität in Deutschland

Auftraggeber	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Erhebung durch infas und DLR – Institut für Verkehrswesen, Berlin
Jahr/Turnus	seit 1976 (als KONTIV), MiD 2002 und 2008 als Fortsetzung der Reihe kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten (KONTIV) in Westdeutschland
Ziel	„Mobilitätsentwicklung anhand einer umfangreichen und thematisch breiten Datengrundlage im Längsschnitt [...] betrachten“[22]
Grundgesamtheit und Stichprobe	· Grundgesamtheit o Wohnbevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Alter ab Null Jahren · Stichprobe (MiD 2008) o 60.713 Personen o 25.922 Haushalte o zufällige Ziehung aus Einwohnermelderegister (zweistufig: 1. Gemeinde bestimmen, 2. Adressziehung) o proportionaler Ansatz zur jeweiligen Bevölkerung im Bundesland o Mindestanzahl pro Bundesland: 750 Haushalte
Ablauf (2008)	· Zweiteilige Erhebung o Stellvertretende Haushaltsbefragung durch ein Haushaltsmitglied (Haushaltsgröße, Angaben zu Haushaltsmitgliedern und vorhandenen Verkehrsmitteln) o Befragung aller Haushaltsmitglieder nach persönlichen Merkmalen und Wegen an einem vorgegebenem Stichtag
Besonderheiten	· modale Teilung nach ÖPV, MIV (Fahrer und Mitfahrer),

[22] MiD 2008 kann in der Fortführung der KONTIV-Erhebungen als *Längsschnitt* bezeichnet werden, jedoch ist es diesbezüglich nicht mit einer kontinuierlich aufgebauten Datenerhebung (siehe MoP) zu vergleichen. Der *Längsschnitt* beschreibt eher eine Vergleichbarkeit umfassender Momentaufnahmen aufgrund des ähnlichen Aufbaus.

	Fahrrad und zu Fuß · personenspezifisches Mobilitätsverhalten, Wegeentfernungen, Verkehrsmittelwahlverhalten, Aktivitätenorte, Besetzungsgrade sowie der Tages-, Wochen- und Jahresgang im Verkehr können abgeleitet werden

Quelle: Fraunhofer ISI

Die Datensätze der beiden Erhebungen sind nicht kongruent. Dies wird deutlich, wenn man sich die zentralen Eckwerte aus Tabelle 4-12 vergegenwärtigt: MiD weist für 2008 16% höhere Werte in der täglichen Wegstrecke in der individuellen motorisierten Mobilität aus als das MoP für dasselbe Jahr. Für das Gesamtjahr 2008 bedeutet dies, dass in der MiD von 965,6 Mrd. pkm[23] ausgegangen wird, während sich aus dem MoP ein Wert von 829,8 Mrd. pkm ergibt. In *Verkehr in Zahlen 2012* (ViZ 2012) wird für das Jahr 2008 ein Wert von 888,5 Mrd. pkm als Verkehrsleistung für den motorisierten Individualverkehr angegeben.

Tabelle 4-12 Zentrale Mobilitätseckwerte aus MoP 2008 und MiD 2008

Modal	**MiD 2008**	**MoP 2008**
	km/Person/Tag	
MIV	32,2	28,1
ÖPV	6,6	9,6
zu Fuß und Fahrrad	2,5	2,4
Gesamt	41,3	40,1

Quelle: Fraunhofer ISI nach MiD (2008) sowie MoP (2008)

Für ASTRA-D werden beide Datensätze verwendet, da in den verschiedenen Daten unterschiedliche, relevante Information für die Modellierung stecken. So sind z.B. die Wegeraten aus der MoP sehr viel zuverlässiger, da nicht nur ein einzelner Stichtag erhoben wird wie in der MiD. Zudem lässt sich aus dem MoP eine weitaus leichtere und konsistentere Aufschlüsselung nach Altersklassen gewinnen als aus der MiD (siehe dazu auch Krail 2009). Auf der anderen Seite liefert die MiD ein besseres Bild, was die Aufteilung auf die Distanzbänder anbelangt. Gleiches gilt für weitere Parameter.

Um in der Verkehrsnachfrage zumindest zu einem mit anderen Studien vergleichbaren Ergebnis zu gelangen, wurde für die Kalibrierung der Gesamtverkehrsleistung für 2010 die Schätzung aus „Verkehr in Zahlen 2012“ verwendet. Als weitere zentrale Basisannahme für den Besetzungsgrad Pkw wurde eine detailliertere Aufschlüsselung nach Wegezweck und Distanzband nach dem MoP verwendet und extrapoliert. Der Gesamtwert für den Besetzungsgrad liegt somit bei etwa 1,2 Personen pro pkm und damit unter dem Pauschalwert von 1,5 von TREMOD 5.2.

[23] pkm: Personenkilometer

Ein weiterer wichtiger Wert, welcher sich dynamisch an die Wirtschaftsentwicklung anpasst, ist der Reisezeitwert. Dieser wird abgeleitet aus Wardman (1998) und in der aktualisierten und auf Deutschland angepassten Version nach Doll et al. (2012) verwendet.

In der Berechnung der Güterverkehrsnachfrage wird zunächst eine Regionalisierung des Produktionswertes pro Sektor auf die NUTS2-Zonen vorgenommen. Dies geschieht auf Basis der Vollzeitäquivalenzerwerbstätigen nach Eurostat. Die Wert-Volumenrelation in der Verkehrsentstehung zur Umrechnung des Bruttoproduktionswertes auf Tonnage erfolgt mit Hilfe der Befragungsergebnisse von „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ (KiD) vom BMVBS. Tabelle 4-13 gibt einen Überblick über diese Befragung. Die Kalibrierung dieser Werte für den Schienengüter- sowie Binnenschiffverkehr erfolgt anhand der Daten des statistischen Bundesamtes (DESTATIS 2012b).

Tabelle 4-13 Überblick über Eigenschaften von Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland

Auftraggeber	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Projektleitung von WVI Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH
Jahr/Turnus	2002, 2010
Ziel	· „KiD 2010 soll die Erkenntnisse über Einsatz und Nutzung der in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge steigern und die Datenbasis für wissenschaftliche Untersuchungen und Infrastrukturplanungen aktualisieren.“ (KiD 2010, Überblicksbericht) · „Beseitigung von Datendefiziten und Datenlücken im Bereich des Wirtschaftsverkehrs mit kleinen Fahrzeugen“(KiD 2002)
Grundgesamtheit und Stichprobe	· Grundgesamtheit: o Kfz-Bestand laut Zentralem Fahrzeugregister je Tag des Jahres mit Schwerpunkt Pkw und Krafträder gewerblicher Halter und Lkw bis einschließlich 3,5 t Nutzlast o Kfz ≤ 3,5t durch 3 Zusatzbefragungen: schriftlich-postalische Stichtagsbefragung · Stichprobe: o Durch Zufallsprinzip Auswahl von insgesamt 113.946 Kfz-Nutzern (2010), etwa 0,9 % der Grundgesamtheit
Ablauf (2010)	· Datenerhebung (Allgemeine Nutzung des Kfz, Informationen zum Fahrzeughalter, Details zu durchgeführten Fahrten am Stichtag, Einsatzgebiet, Standort und Technik des Fahrzeugs) in acht Befragungszeiträumen, jeweils mit Haupt- und Erinnerungsaktion · Jeweils 7 Befragungsstichtage

Besonderheiten	· Schwerpunkt liegt auf Wirtschaftsverkehr · Unterteilung in verschiedene Fahrzeuggruppen (u.a. Pkw, Lkw ≤ 3,5 t Nutzlast, Lkw > 3,5 t Nutzlast, Sattelzugmaschinen, Krafträder) und Halter (privat oder gewerblich)

Quelle: Fraunhofer ISI

Für die Gesamtverkehrsleistung in Deutschland sind die Daten aus *Verkehr in Zahlen* mit den Veröffentlichungen des statistischen Bundesamtes sowie des Kraftfahrtbundesamtes deckungsgleich; diese werden aus der KiD gewonnen (5‰- Stichprobe) bzw. für den Transitverkehr abgeschätzt. Die Kalibrierung der Verkehrsleistung (tkm)[24] erfolgt dementsprechend ebenso wie im Personenverkehr anhand der Zeitreihen aus *Verkehr in Zahlen*.

4.4.1.2 Verkehrsleistung des See- und Luftverkehrs

Die Entwicklung der Verkehrsleistung des See- und Luftverkehrs findet nicht in ASTRA-D statt und wird stattdessen über eine Fortschreibung verkehrsrelevanter Parameter abgeleitet.

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

Die somit abgeleitete globale Verkehrsleistung wird nach dem Verursacherprinzip über den deutschen Anteil der globalen Weltwirtschaftsleistung Deutschland zugerechnet. Dazu werden die Daten der im Projekt durchgeführten Modellierung des Farm-Modells verwendet und eine Reduktion des deutschen Anteils an der Weltwirtschaftsleistung von 6,1 % auf 4,1 % zwischen 2010 und 2050 hinterlegt. Die Deutschland auf diese Art und Weise zugeordnete Verkehrsleistung wird nicht vollständig über deutsche Häfen abgewickelt. Der in Deutschland abgehende Verkehr wird über das Verhältnis der von Deutschland abgehenden zur Deutschland zugerechneten Verkehrsleistung des Seegüterverkehrs im Jahr 2010 abgebildet und über den Zeitverlauf konstant gehalten. Die Grundlage bildet dafür wie bei der Modellierung in ASTRA-D die in *Verkehr in Zahlen* angegebene Verkehrsleistung über deutsche Häfen.

Für die Ableitung der Verkehrsleistung im Flugverkehr werden die Parameter Verkehrsleistung je Einwohner bzw. je Wirtschaftsleistung verwendet. Für Trendfortschreibun-

[24] tkm: Tonnenkilometer

gen werden Zeitreihen für diese Parameter benötigt. Die Grundlage der historischen Verkehrsnachfrage bilden Daten aus TREMOD 5.2. Die Zeitreihen für die Einwohnerentwicklung und die Entwicklung des BIP werden Statistiken des Statistischen Bundesamts entnommen (DESTATIS 2010, DESTATIS 2011b).

Für die Fortschreibung der genannten Parameter wird für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) eine lineare Trendfortschreibung der Entwicklung der letzten 20 Jahre für den Zeitraum bis 2030 angenommen und darauf folgend eine Abnahme der Steigerung dieser Parameter. Im Jahr 2050 steigen die beiden genannten Parameter für die Abbildung der Flugverkehrsleistung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nicht weiter an (Abbildung 4-10). Für die Betrachtung im Klimaschutzszenario 80 und 90 wird die Verkehrsleistung, vom Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ausgehend, mit Hilfe von Preiselastizitäten bestimmt, die aus Peter et al. (2012) übernommen werden.

Abbildung 4-10 Entwicklungsparameter für die Verkehrsleistung im Flugverkehr im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (indiziert), historische Entwicklung und Fortschreibung bis 2050

Quelle: Eigene Annahmen des Öko-Instituts, historische Daten abgeleitet nach ifeu 2011, DESTATIS 2010, DESTATIS 2011b

4.4.1.3 Grundlagen der Technologiedatenbasis von TEMPS

Für das Jahr 2010 werden für alle betrachteten Verkehrsträger die spezifischen Energieverbräuche der Fahrzeuge benötigt. Für den Straßenverkehr, für den eine detaillierte Bestandsmodellierung durchgeführt wird, werden diese auf der Differenzierungs-

ebene Größenklasse, Antriebstyp und Zulassungsjahr benötigt. Für die übrigen Verkehrsträger wird aufgrund der Systembetrachtung keine Bestandsmodellierung angewendet.

Für alle Bestandsdaten bildet mit Ausnahme des Seeverkehrs TREMOD 5.2 die Ausgangslage der Modellierung. Im Seeverkehr wird eine Bestandseffizienz für das Jahr 2007 aus der *Consensus*-Abschätzung des weltweiten Energiebedarfs des Seeverkehrs abgeleitet und als Grundlage für das Jahr 2010 verwendet. Um für die Bestandsmodellierung der Pkw eine gute Datengrundlage zu besitzen, werden für das Jahr 2010 die durchschnittlichen Verbräuche bei Neuzulassungen gemäß des Kraftfahrzeugbundesamts (KBA 2011) verwendet.

4.4.2 Private Haushalte

Die Zahl der privaten Haushalte ist in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen. Diese Entwicklung ist im Wesentlichen auf die Zunahme an Ein- und Zweipersonenhaushalte zurück zu führen, die sich auch in den kommenden Jahren fortsetzen wird. Diese Argumentation wird auch durch andere Studien gestützt.[25] Der Trend einer leicht rückläufigen Bevölkerung seit 2002 führt lediglich zu einer Dämpfung dieser Entwicklung. Die Projektion der Zahl der privaten Haushalte wird basierend auf der Entwicklung der Bevölkerung (Kapitel 4.1.1) und der Anzahl der Personen je privatem Haushalt abgeleitet. Einen Überblick über diesen Indikator aus ausgewählten Studien ist in Tabelle 4-14 dargestellt.

Tabelle 4-14 Entwicklung der Anzahl der Personen je privatem Haushalt 2008-2050 aus ausgewählten Studien

Studie	2008	2020	2030	2040	2050
	Personen pro Haushalt				
Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050	2,09	1,99	1,94	1,88	1,86
Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030	2,06	1,96	1,90	-	-
Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung	2,07	1,98	1,93	1,87	1,86

Quellen: World Wide Fund for Nature, Deutschland (2009); BMWi *(2010); Schliesinger et al. (2010)*

Wie aus Tabelle 4-14 hervorgeht wird jeweils bis zum Ende des Projektionshorizonts von einer rückläufigen Anzahl an Personen je privatem Haushalt ausgegangen, wobei von einem Wert von ca. 1,86 Pers./HH in 2050 ausgegangen wird. In Anlehnung an die empirische Entwicklung und den Studienüberblick (Tabelle 4-14) wird im Rahmen dieser Studie die Entwicklung in Tabelle 4-15 angenommen. Da bei der Bevölkerung, insbesondere zwischen 2030 und 2050, ein Rückgang um ca. 8 Mio. berechnet wurde,

[25] Prognos; Öko-Institut (2009); IER; RWI; ZWE (2010); Prognos; EWI; GWS (2010)

sinkt die Anzahl der Privaten Haushalte im selben Zeitraum von 40,97 Mio. auf 38,81 Mio. Somit entwickelt sich die Zahl der privaten Haushalte in der langfristigen Perspektive rückläufig. Ab 2040 schlägt der Bevölkerungsrückgang massiv zu Buche mit einem Rückgang um ca. 2 Millionen Haushalte zwischen 2040 und 2050. In diesem Zeitraum geht auch die Bevölkerung um ca. 4 Millionen zurück, während der Trend zu kleineren Haushaltsgrößen in die Sättigung geht.

Tabelle 4-15 Entwicklung der Anzahl an Personen je privatem Haushalt und der Privaten Haushalte 2008-2050

	Einheit	2008	2020	2030	2040	2050
Personen je Privater Haushalt	Pers./HH	2,07	1,98	1,93	1,87	1,86
Private Haushalte	Mio.	39,48	40,76	40,97	40,62	38,61

Quellen: BMWi und BMU (2010) *und eigene Berechnungen für die Bevölkerungsentwicklung*

4.4.2.1 Raumwärme und Warmwasser

Die Wohnflächennachfrage steigt bis 2030 auf das 1,3-fache. Das Wachstum liegt bis zum Jahr 2020 bei ca. 0,5%, flacht dann und nimmt bis zum Jahr 2030 einen Werte um 0,33% an. Tabelle 4-16 und Abbildung 4-11 zeigen gesamte die Entwicklung der Wohnfläche bis zum Jahr 2030.

Auch wenn die Bevölkerung im Simulationszeitraum abnimmt, nimmt die Wohnfläche zu. Es wird wie im Energiekonzept eine Zunahme der Pro-Kopf-Wohnfläche angenommen, siehe Tabelle 4-16, die durch die sinkende Anzahl der Personen pro Haushalt bei sich nur langsam anpassenden Wohnungszuschnitten verursacht wird.

Tabelle 4-16 Entwicklung von Nutzfläche und Wohnfläche

		2010	2020	2030	2040	2050
		Tausend m²				
Wohnfläche	m²	3.292.952	3.516.990	3.648.827	3.763.423	3.704.873
durchschnittliche jährliche Wachstumsrate		*0,69%*	*0,68%*	*0,37%*	*0,31%*	*-0,16%*
Bevölkerung	Mio.	81,9	80,6	79,0	76,0	71,8
Wohnfläche pro Kopf	m²	40,4	43,6	46,2	49,5	51,6
Nutzfläche	m²	1.096.954	1.147.646	1.138.636	1.210.654	1.246.124
durchschnittliche jährliche Wachstumsrate		*0,46%*	*0,46%*	*-0,08%*	*0,63%*	*0,29%*

Quellen: eigene Projektionsrechnungen

Abbildung 4-11 Entwicklung der Wohnfläche 2008-2030

Quellen: Eigene Darstellung

4.4.3 Industrie

Die wesentlichen Rahmendaten für den Sektor Industrie ist die Entwicklung der realen Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftszweigen. Die diesbezüglichen Annahmen sind in Kapitel 4.1.2 *Wirtschaftsentwicklung* umfassend dargestellt, da in den Szenarien unterschiedliche Annahmen zur Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz und damit zur jährlichen Produktion getroffen werden. Für eine Übersicht der entsprechenden Annahmen siehe Abschnitt 5.3.1.1.

4.4.4 Gewebe, Handel und Dienstleistung (GHD)

Für den Sektor GHD ist neben der Anzahl der Beschäftigten die Energiebezugsfläche der zweite bedeutende Bestimmungsfaktor (siehe Tabelle 4-17). Energiedienstleistungen wie die Raumbeleuchtung oder Raumlufttechnische Anlagen sind eher an die Fläche als an die Anzahl der Beschäftigten gekoppelt. Diese wurde anhand von spezifischen Kennwerten ausgehend von den Annahmen zur Entwicklung der Anzahl der Beschäftigten ermittelt. Die Energiebezugsfläche wird nicht nach Szenarien unterschieden.

Tabelle 4-17 Entwicklung der Energiebezugsfläche im Sektor GHD in allen Szenarien

Wirtschaftszweig	WZ 2008	2010	2020	2030	2040	2050
		Mio. m²				
Erziehung und Unterricht	P	142	133	123	117	110
Finanz- und Versicherungsdienstleistungen	K	40	46	45	49	51
Gesundheits-und Sozialwesen	Q	115	111	106	105	102
Gastgewerbe	I	88	99	94	101	101
Handel; Reparatur von Fahrzeugen	G	397	457	469	525	560
Öffentliche Verwaltung, Verteidigung	O	158	144	130	119	109
Verkehr, Information und Kommunikation	H+J	121	133	155	173	191
Sonstige Wirtschaftszweige	L+M+N+R+S	362	366	354	380	391
Alle Wirtschaftsbereiche		1.422	1.488	1.476	1.569	1.615

Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

4.5 Potenzialrestriktionen

4.5.1 Biomasse

Die energetische Nutzung von Biomasse wird kontrovers diskutiert. Auf der einen Seite steht der Beitrag, den Biomassenutzung für Klimaschutz und nachhaltige Entwicklung sowie für Energie- und Versorgungssicherheit leisten kann. Auf der anderen Seite sind die Konsequenzen von Nutzungskonflikten zu berücksichtigen, die auf verschiedenen Stufen der Nutzungskette von Biomasse (dargestellt in Abbildung 4-12) auftreten können. Dies führt zu entsprechenden Restriktionen bei der Bewertung der für die energetische Nutzung verfügbaren Biomassepotenziale.

Abbildung 4-12 Konversionsstufen von Biomasse (schematisch)

Quelle: WWF 2009

Im Rahmen dieser Studie wird davon ausgegangen, dass Biomasse nur in dem Maße eingesetzt wird, in dem sie nachhaltig erzeugt und verarbeitet werden kann. Maßgeblich ist also nicht das in vielen frühen Studien ausgewiesene technische oder wirtschaftliche, sondern das nachhaltige Potenzial. Der WBGU hat in seiner Studie „Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung“ (WBGU 2009) ein Konzept zur Implementierung der entsprechenden Anforderungen entwickelt und bewertet das globale technisch-nachhaltige Potenzial für energetische Biomassenutzung mit einem Umfang von 80-170 EJ/a. Dies beinhaltet sowohl den Anbau von Energiepflanzen als auch die Verwertung von Abfällen und Reststoffen.

Im Falle importierter Biomasseprodukte ist es nicht einfach zu überprüfen, ob bei der Produktion und Verarbeitung die Kriterien der Nachhaltigkeit eingehalten wurden, da entsprechende Herkunftsnachweise oft nicht verfügbar sind. Daher ist anzustreben, bei der energetischen Nutzung von Biomasse zunächst auf die – deutlich kleineren - einheimische Potenziale zurückzugreifen[26]. Das nationale Potenzial für Deutschland wird

[26] An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass eine Sicherstellung der Nutzung vorrangig heimischer Flächen institutionell nicht einfach sicherzustellen ist, unter anderem aus

vom WBGU nicht ausgewiesen. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen verweist in seinem Sondergutachten „Klimaschutz durch Biomasse“ (SRU 2007) auf die Ergebnisse zweier Studien (Öko-Institut 2004, DLR 2004), die in Tabelle 4-18 zusammengefasst sind.

Tabelle 4-18 Reststoffpotenzial und Flächenpotenzial für den Anbau von Energiepflanzen in Deutschland.

Studie/Jahr	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Reststoffpotenzial in [PJ/a]						
Öko-Institut	520	525	536	545		
DLR	543	677	696	705	715	724
Flächenpotenzial in [Mio. ha] (ohne Grünland)						
Öko-Institut		0,61	1,82	2,84		
DLR		0,15	1,1	2	3,1	4,2

Quelle: Öko-Institut (2004), DLR (2004)

Bei einer nutzbaren Anbaufläche von 4 Mio. ha für das Jahr 2050 lassen sich darauf durch den Anbau von Energiepflanzen, je nach Entwicklung der klimatischen Rahmenbedingen, 415-522 PJ/a an Primärenergie gewinnen (Kollas et al 2009). Zusammen mit der Nutzung von Reststoffen resultiert dies in einem technisch-nachhaltigen Potenzial für inländisch erzeugte Biomasse von 1200 PJ/a. Dieses Potenzial wird in den hier untersuchten Szenarien deutlich überschritten.[27] Es wird davon ausgegangen, dass über die Nutzung inländischer Potenziale hinaus Biomasse in einer Größenordnung von 900 PJ/a importiert werden kann. Diese Abschätzung erfolgt in Anlehnung an die Studie „Modell Deutschland“ (WWF 2009). Sie basiert auf der Annahme, dass das in Europa und Russland nachhaltig nutzbare Biomassepotenzial von ca. 20.000 PJ/a (EEA 2006, WBGU 2009) gemäß der bis zum Jahr 2050 zu erwartenden Bevölkerungsentwicklung gleichmäßig pro Kopf verteilt wird. Damit steht für Deutschland im

Gründen des Handelsrechts. Darüber hinaus bedarf die Sicherstellung nachhaltiger Biomasse durch Zertifizierung weiterer Diskussion. Schließlich kann indirekten Landnutzungseffekten aufgrund der zahlreichen globalen Nutzungskonkurrenzen nur durch eine Reduzierung der Fläche für Anbaubiomasse begegnet werden. Diese Aspekte können in dieser Modellierungsrunde nicht vertieft werden. Aus diesem Grund soll den Restriktionen der Biomassenutzung auf verschiedenen Ebenen im Rahmen dieser Studie durch die flächenmäßige Beschränkung der verfügbaren Fläche Rechnung getragen werden. Auch soll darauf hingewiesen, dass die Begrifflichkeit des Imports vor allem in der Bilanz von Importen und Exporten gesehen werden muss. So kann beispielsweise der Export von Feldfrüchten aus Deutschland durch einen Import von Bioenergie ausgeglichen werden. Zentral bleibt die Beschränkung der zur Verfügung stehenden Fläche.

[27] Die tatsächlich genutzten Potenziale werden in den zugehörigen Ergebniskapiteln ausgewiesen.

Jahr 2050 ein nutzbares Gesamtpotenzial von 2100 PJ/a (oder 30 GJ p.P.) zur Verfügung[28].

4.5.2 Carbon Capture and Storage (CCS)

Die Abschätzungen der erschließbaren Potenziale zur Speicherung von abgeschiedenem CO_2 sind durch ein hohes Maß an Unsicherheit geprägt. Nicht nur bezüglich der Quantifizierung von Speicherkapazitäten verschiedener geologischer Formationen, sondern auch in Bezug auf Langzeitwirkungen und Leckage-Raten besteht immer noch erheblicher Forschungsbedarf.

Ein im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) erstelltes Gutachten (BMU 2007) identifiziert drei für Deutschland relevante Speicheroptionen:

- Ausgeförderte Gasfelder
- Tiefe saline Aquifere
- Tiefe Kohleflöze

In Summe wird für alle drei Speicheroptionen eine Speicherkapazität von 18-47 Gt CO_2 ausgewiesen.

Eine Studie jüngeren Datums (Knopf et al. 2010) beziffert die Speicherkapazität tiefer saliner Aquifere, welche mengenmäßig die bedeutendste Option darstellen, mit 6,3-12,8 Gt CO_2 (90%-Konfidenzintervall).

Die in den untersuchten Szenarien tatsächlich in Anspruch genommenen Speicherkapazitäten werden in den entsprechenden Ergebniskapiteln ausgewiesen. Die Abscheiderate liegt in allen Szenarien deutlich unter 100 Mt CO_2/a. Selbst die konservativen Schätzwerte für die verfügbare Speicherkapazität stellen somit für die hier vorgestellten Szenarien keine bindenden Restriktionen dar. Der limitierende Faktor für den Einsatz der CCS-Option in Deutschland sind nach aktuellem Wissensstand eher die Kosten für Abscheidung, Transport und Speicherung als die Verfügbarkeit von Speicheroptionen.[29]

[28] Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass auch die stoffliche Nutzung von Biomasse zur Minderung von Treibhausgasen beitragen kann. Dies kann jedoch im Rahmen der ersten Runde der Modellierung der Klimaschutzszenarien 2050 nicht vertieft abgebildet werden.

[29] Der Frage nach gesellschaftlicher und politischer Akzeptanz soll an dieser Stelle nicht nachgegangen werden.

4.5.3 Speicher

Im Rahmen dieser Studie werden unterschiedliche Optionen untersucht, welche es erlauben, Strom zu speichern und damit eine Entkopplung von Stromerzeugung und Nachfrage zu erreichen: Pumpspeicherkraftwerke, regelbare Lasten in der Industrie und der Einsatz von Elektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff und Methan (Power-to-Gas)[30].

Pumpspeicherkraftwerke sind eine bewährte Technologie, jedoch unterliegen sie starken Begrenzungen durch natürliche Gegebenheiten. Um dies zu reflektieren, wird in diesem Projekt für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) angenommen, dass ein Ausbau der Pumpspeicherkapazitäten über das heutige Maß von 6,7 GW hinaus nicht möglich ist. Für das ambitioniertere Klimaschutzszenario 80 und 90 wird angenommen, dass die installierte Leistung von Pumpspeicherkraftwerken auf 11 GW steigt, wie im Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan (50Hertz Transmission, TransnetBW, et al. 2013) vorgesehen. Weitere Steigerungen werden aufgrund des Fehlens adäquater geographischer Randbedingungen nicht vorgesehen.

Über den Einsatz von Wasserkraft im deutschen Stromnetz hinaus wird angenommen, dass durch den Ausbau von Verbindungskabeln nach Norwegen in begrenztem Maße die dortige Wasserkraft zur Stromspeicherung mitgenutzt werden kann. Basierend auf Expertenschätzungen wird angenommen, dass im Jahr 2020[31] eine Übertragungskapazität von 1,4 GW vorliegt. Im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 wird des Weiteren angenommen, dass die Kabelleistung danach alle 10 Jahre um weitere 1,4 GW erweitert werden kann.

Eine weitere Möglichkeit, überschüssige Erzeugung zu anderen Zeitpunkten verfügbar zu machen sind regelbare Lasten, welche bereits jetzt in verschiedenen Industriezweigen zur Verfügung stehen. Insbesondere in der Herstellung von Chlor, Holz und Zement gibt es signifikante Potenziale, welche durch minimalen Ausbau von benötigter Informationstechnik verfügbar sind (Paulus and Borggrefe 2011; Hartkopf, Scheven, and Prelle 2012). Für das Klimaschutzszenario 80 und das Klimaschutzszenario 90 wird angenommen, dass diese Potenziale vollumfänglich zur Verfügung stehen[32]. Darüber hinaus wird angenommen, dass durch Luftzerlegung erzeugter reiner Sauerstoff, welcher in CCS-Prozessen in der Industrie benötigt wird, zwischengespeichert werden kann und somit eine zusätzliche Verschiebung der Stromerzeugung ermöglicht. Insgesamt werden damit im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 im Bereich

---

[30] Darüber hinaus werden Wärmespeicher betrachtet. Da es sich hierbei jedoch lediglich um eine Flexibilisierungsmaßnahme für KWK-Anlagen handelt und um keinen Stromspeicher, wird er an dieser Stelle nicht dargestellt.

[31] http://www.statnett.no/en/Projects/NORDLINK/

[32] Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) wird angenommen, dass regelbare Lasten nicht zur Verfügung stehen.

des industriellen Lastmanagements in den Jahren 2030 0,5 GW, 2040 1,5 GW und 2050 2,1 GW an regelbaren Lasten zur Verfügung stehen.

Des Weiteren kann überschüssiger Strom aus erneuerbaren Quellen dazu eingesetzt werden, um mittels Elektrolyse Methan oder Wasserstoff zu erzeugen (Power-to-Gas). Grundsätzlich sind hier die Potenzialbegrenzungen durch die installierte Kapazität des Elektrolyseurs und die Größe von Speichern gegeben. Das Gasnetz bietet im Prinzip eine Kapazität von 210 TWh (ZSW, Fraunhofer IWES, and SolarFuel 2011) für Methan und in geringerem Maße auch für Wasserstoff. Aus technischen Gründen wird allerdings die Beimischungsgrenze für H_2 bei 5% angesetzt (Müller-Syring et al. 2013), die auch im Modell PowerFlex angenommen wird. Für die Beimischung von stromgeneriertem Methan ins Erdgasnetz wurde modellendogen eine Obergrenze von 10% vorgegeben, da diese Option erst nach dem Einsatz von stromgeneriertem Methan im Verkehrssektor und in der Industrie zum Zuge kommen und daher in der Menge begrenzt sein sollte. Im modellierten Ergebnis greift diese Grenze jedoch nicht, es treten nur Anteile von stromgeneriertem Methan im Erdgasnetz von unter 3% auf.

4.5.4 Stromimporte

Der Import von Strom wird durch mehrere Faktoren bestimmt. Zum einen bestimmen Stromerzeugungskapazitäten in europäischen Nachbarländern über die dort inländisch benötigten Kapazitäten hinaus die generelle Verfügbarkeit von Strom, der nach Deutschland exportiert werden kann. Zum anderen orientieren sich die Stromflüsse an den Grenzkosten der Stromerzeugung. Sofern beispielsweise künftig günstige EE-Stromerzeugungspotenziale in Europa (und Nordafrika, Naher Osten) erschlossen werden können, so können diese aus ökonomischen Gründen Stromerzeugung in Deutschland verdrängen. Schließlich beschränkt der Ausbau der Übertragungsnetze und der Kuppelstellen die Größenordnung des möglichen Imports.

Stromimporte werden im Rahmen dieses Projekts durch den Modellverbund aus PowerACE und ELIAS/PowerFlex abgebildet. Dabei ermittelt PowerACE stundenscharfe Stromflüsse aus oder nach Deutschland (nach ökonomischem Kalkül). Diese werden dem Modellverbund ELIAS/PowerFlex[33] vorgegeben. Um der möglichen Beschränkung der Übertragungs- und Kuppelstellenkapazitäten Rechnung zu tragen, wird für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) einerseits von einer überwiegend inländischen Bedarfsdeckung ausgegangen, andererseits von einer deutlich geringeren Menge an importierbarem erneuerbarem Strom. Für das Klimaschutzszenario 80 und das Klimaschutzszenario 90 wird davon ausgegangen, dass 2030 5%, 2040 10% und 2050 15% des deutschen Strombedarfs aus Importen (konventionell, EE) bestehen darf.

[33] Mit Ausnahme des AMS (2012). Hier wurden die (vergleichsweise geringen) Importe direkt in PowerFlex ermittelt.

Dabei wird die importierbare erneuerbare Strommenge im KS 80 und KS 90 deutlich höher als im AMS (2012) eingeschätzt.

5 Projektionen für die energiebedingten Treibhausgasprojektionen und den Energieverbrauch

5.1 Gebäudebereich – Wärmebereitstellung

5.1.1 Annahmen und Parameter

Für verschiedene Szenarien wurden einzelne Parameter in der Projektionsrechnung variiert. Folgende Maßnahmen wurden in den Parametern abgebildet um den Energiebedarf für Wärmebereitstellung in Gebäuden in den anspruchsvolleren Szenarien zu reduzieren:

- Erhöhung der Sanierungsrate
- Entwicklung der technischen Möglichkeiten der Sanierungen in ambitionierteren Sanierungsoptionen
- Nutzungspflicht für Erneuerbare bei Sanierung
- Senkung der Innenraumtemperatur

Die Ausgestaltung der Maßnahmen für die verschiedenen Szenarien wird in den folgenden Abschnitten dargestellt.

5.1.1.1 Sanierungsrate

Die Sanierungsrate bezieht sich in der Projektionsrechnung auf die Vollsanierung der Gebäudehülle und wird indirekt über die Bauteillebensdauer und den Zeitpunkt der vorhergehenden Erneuerung des Bauteils ermittelt. Dieser Zeitpunkt ist abhängig von der Bauperiode. Darin begründet sich das Wachstum der Sanierungsraten, wie es in Tabelle 5-1 und in Abbildung 5-1 zu erkennen ist.–

Tabelle 5-1 Entwicklung der Sanierungsrate

Szenario	2010–2020	2021–2030	2031–2040	2041–2050	2010–2050	Anteil energetisch
AMS (2012)						
gesamt	1,10%	1,50%	1,70%	1,80%	1,50%	
energetisch	*0,90%*	*1,10%*	*1,30%*	*1,40%*	*1,20%*	*80%*
Klimaschutzszenario 80						
gesamt	2,42%	2,57%	2,49%	2,39%	2,47%	
energetisch	*1,87%*	*2,05%*	*2,03%*	*1,95%*	*1,97%*	*80%*
Klimaschutzszenario 90						
gesamt	3,10%	2,80%	4,50%	4,10%	3,60%	
energetisch	*2,30%*	*2,30%*	*3,70%*	*3,20%*	*2,90%*	*81%*

Quellen: Eigene Berechnungen

Ob die sich im KS90 entwickelnden Sanierungsraten durch die Industrie und das Handwerk abgebildet werden könnten bedarf weiterer Untersuchungen. Der Anteil der energetischen Sanierung ergibt sich aus den Annahmen über das Investorverhalten. Er resultiert aus der Annahme, dass 80% der Investoren über ihre Verpflichtung entspre-

chend der EnEV informiert sind. Ein agentenbasiertes Modul im Berechnungsmodell simuliert das Investorverhalten.[34]

Abbildung 5-1 Entwicklung der Sanierungsrate für alle Szenarien

Quelle: Eigene Darstellung

Im Zeitraum zwischen 2010 und 2020 sind aufgrund des angenommenen Sanierungsstaus zunächst höhere Sanierungsraten zu erwarten als beispielsweise im Folgezeitraum zwischen 2020 und 2030.

5.1.1.2 Sanierungsoptionen

In der Modellierung der Investitionsentscheidung für die Sanierung stehen vier Sanierungsoptionen zur Auswahl. Es wird eine Standardsanierungsoption definiert, die für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) in Tabelle 5-2 dargestellt ist. Diese Sanierungsoption berücksichtigt die jeweilige Baualtersklasse und Gebäudekategorie. Neben der Standardoption besteht die Möglichkeit der Instandhaltung, was keiner energetischen Sanierung entspricht. Weiterhin werden eine etwas und eine sehr ambitionierte Sanierungsoption angeboten.

---

[34] Die Abbildung des Investorenverhaltens leitet sich aus folgenden Untersuchungen ab:

Steinbach, J. (2013). Akteursspezifische Untersuchung von Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz und zum Ausbau erneuerbarer Energien im Wohngebäudebereich. In *Proceedings of the IEWT (8. Internationale Energiewirtschaftstagung)* (S. 48–50). Wien.

Steinbach, J. (2013). *Internal working paper: literature review of integrating user and investment behaviour in bottom-up simulation models*. Karlsruhe. Abgerufen von http://www.entranze.eu/files/downloads/D4_1/D41-WP-IntegrationStakeholder_final.pdf

Da jede energetische Sanierung mit einer Komforterhöhung einhergeht, handelt es sich bei energetischen Sanierungen eigentlich um Modernisierungen.

Tabelle 5-2 zeigt die Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudeaussenhülle gemittelt über Baualtersklassen und Gebäudekategorien für Neubau, Bestand sowie nach Sanierung.

Tabelle 5-2 U-Werte[35] im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

	U-Werte [kWh/(m²K)]			
	Dach	Außenwand	Fenster	Boden
Wohngebäude				
Bestand	0,58	0,77	2,00	0,70
Sanierungsoption nach EnEV 2009	0,24	0,36	1,71	0,43
Sanierungsoption ab 2020	0,21	0,30	1,45	0,37
Sanierungsoption ab 2030	0,18	0,25	1,16	0,31
Neubau				
EnEV09	0,20	0,28	1,30	0,35
ab 2014	0,16	0,22	1,04	0,28
Nichtwohngebäude				
Bestand	0,72	0,99	2,20	0,86
Sanierungsoption nach EnEV 2009	0,25	0,32	1,51	0,36
Sanierungsoption ab 2020	0,25	0,33	1,55	0,39
Sanierungsoption ab 2030	0,20	0,26	1,26	0,31
Neubau				
EnEV09	0,25	0,30	1,50	0,35
ab 2014	0,19	0,24	1,17	0,27

Quellen: *IWU (2003); Diefenbach et al. (2010); Diefenbach und Loga (2011)* (verarbeitet) und eigene Annahmen zu zukünftigen Sanierungsoptionen

Auch in Zukunft werden Dämmmaterialien, -systeme und -verfahren weiterentwickelt. Diese Lerneffekte führen dazu, dass die Gebäude zum gleichen Preis besser energetisch saniert werden können. Diese Sanierungsmöglichkeiten werden, wie folgt im Modell abgebildet.

Im Klimaschutzszenario 80 wurden zur Verbesserung der Sanierungsoptionen die in Tabelle 5-3 dargelegten Faktoren angewendet.

[35] Die U-Werte gemittelt über die verfügbaren Sanierungsoptionen für unterschiedliche Baualtersklassen und Gebäudekategorien

Tabelle 5-3 Veränderung der energetischen Qualität im Klimaschutzszenario 80 gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (Faktor)

	Veränderung gegenüber dem Defizitszenario			
	Dach	Außenwand	Fenster	Boden
Wohngebäude				
Sanierungsoption ab 2020			0,7	
Sanierungsoption ab 2030			0,9	
Sanierungsoption nach EnEV 2009			0,8	
Neubau				
ab 2014			0,8	
ab 2016	0,8	0,8	0,6	0,8
Nichtwohngebäude Neubau				
ab 2014			0,7	
ab 2016	0,8	0,8	0,6	0,8

Quellen: Eigene Annahmen Fraunhofer ISI

Im Klimaschutzszenario 90 wurde eine Verbesserung der Sanierungsoptionen um 20% gegenüber dem Klimaschutzszenario 80 angenommen.

5.1.1.3 Nutzungspflicht mit Auslösetatbestand Sanierung (Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90)

Die im EEWärmeG festgesetzte Nutzungspflicht für Erneuerbare ist im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) für den Auslösetatbestand Neubau. Im Klimaschutzszenario 80 und im Klimaschutzszenario 90 wird die Nutzung Erneuerbarer auch bei umfangreichen Sanierungen gefordert.

5.1.1.4 Innentemperatur (Klimaschutzszenario 90)

Die Innenraumtemperatur für Wohngebäude wird im Klimaschutzszenario 90 als Suffizienzmaßnahme um 1°C von 20°C auf 19°C reduziert. Die absolute Temperatur rührt aus der Norm, DIN V 4101-6, zur Heizwärmebedarfsberechnung.

5.1.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) sinkt der Endenergiebedarf für Wohngebäude im Haushaltssektor bis zum Jahr 2050 um 37 % gegenüber 2008 auf ungefähr 1.300 PJ, wie Tabelle 5-4 und Abbildung 5-2 veranschaulichen. Heizöl- und Kohle verlieren schnell an Bedeutung. Bei Ersatz eines solchen Heizsystems wird bereits gegenwärtig größtenteils der Brennstoff substituiert. Im Jahr 2050 werden diese Brennstoffe kaum mehr für die Wärmeversorgung in Wohngebäuden genutzt werden.

Erdgas hingegen deckt auch im Jahr 2050 über 50 % des Endenergiebedarfs. Relativ sinkt der mit Erdgas gedeckte Endenergiebedarf auf 63 % gegenüber 2008.

Der Strombedarf geht zunächst stark zurück und verstetigt sich ab 2020. Strom wird als Hilfsenergie für die Pumpen in Wärmepumpen und Solarthermieanlagen aber auch

in Verteilsystemen eingesetzt. Relativ zum gesamten Endenergiebedarf schwankt der Stromanteil um die 5 %. Durch Wärmepumpen werden im Jahr 2050 6% des Endenergiebedarfs für Wärme in Gebäuden des Haushaltssektors mit Hilfe von Umweltwärme gedeckt.

Der durch Fern- und Nahwärme gedeckte Endenergiebedarf steigt mäßig. Die bestehenden Fern- und Nahwärmesysteme werden weiter genutzt und schwach ausgebaut. Der relative Anteil steigt, aufgrund der Reduktion des gesamten Endenergiebedarfs bis zum Jahr 2050 auf 23 %.

Die dezentrale Erneuerbare Versorgung der Wohngebäude erlebt in diesem Szenario keinen wesentlichen absoluten Zuwachs, nur etwa 11 %. Vielmehr ist eine Verschiebung von Biomasse zu Solar- und Umweltwärme ablesbar. Bis zum Jahr 2050 wird die genutzte Solarwärme verdoppelt und die Umweltwärme sogar versechsfacht.

Tabelle 5-4 Endenergiebedarf von Gebäuden im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Energieträger	**2008**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
			PJ		
Strom	123	89	76	78	77
Erdgas	1.029	969	912	791	653
Fern-und Nahwärme	156	258	298	308	305
Heizöl	509	227	54	9	5
Kohle	48	27	12	5	3
biogene Brennstoffe	235	271	247	217	182
Umweltwärme	12	25	40	64	77
Solarthermie	12	25	33	32	28
Summe	2.124	1.890	1.673	1.502	1.329
Minderung ggü. 2008		-235	-452	-622	-796
prozentuale Minderung ggü. 2008		-11%	-21%	-29%	-37%

Quellen: UBA *(2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI*

Abbildung 5-2 Endenergiebedarf im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Quellen: UBA (2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Im GHD-Sektor werden im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bereits relativ hohe Endenergieeinsparungen erzielt. Tabelle 5-5 zeigt, dass die Minderungen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) 56 % bis zum Jahr 2050 gegenüber 2008 erreichen.

Abbildung 5-3 zeigt die Entwicklung des Energieträgermix. Sie verläuft ähnlich der Entwicklung für Wohngebäude. Der Heizöl- und Kohleeinsatz sinkt stark, der Erdgasbedarf dominiert und der Strombedarf verhält sich nahezu konstant. Zwei wesentliche Unterschiede sind jedoch im Vergleich zum Haushaltssektor festzustellen. Zum einen sinkt die Versorgung mit Fernwärme um 22 % von 2008 bis 2050. Zum anderen wächst der gegenüber Wohngebäuden geringere Anteil dezentraler Erneuerbarer in Nichtwohngebäuden von 4 % in 2008 auf 15 % im Jahr 2050. Im Vergleich dazu werden Wohngebäude im Jahr 2050 zu 22 % mit dezentraler erneuerbarer Wärme versorgt. Das Wachstum des Erneuerbaren Anteils gegenüber 2008 deutet bereits auf einen Angleich hin, denn es liegt für Nichtwohngebäude bei 150 % und damit über dem für Wohngebäude in Höhe von 111 %.

Tabelle 5-5 Endenergiebedarf von Gebäuden im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Energieträger	2008	2020	2030	2040	2050
			PJ		
Strom	47	22	19	21	23
Erdgas	418	414	376	294	191
Fern-und Nahwärme	115	123	116	105	89
Heizöl	183	103	30	2	1
Kohle	15	13	9	3	0
biogene Brennstoffe	28	35	27	24	20
Umweltwärme	3	3	4	10	16
Solarthermie	3	10	15	14	11
sonstige Erneuerbare	3	7	6	7	7
Summe	815	730	602	479	359
Minderung ggü. 2008		-85	-213	-336	-456
prozentuale Minderung ggü. 2008		-10%	-26%	-41%	-56%

Quellen: UBA *(2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI*

Abbildung 5-3 Endenergiebedarf im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Quellen: UBA *(2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI*

5.1.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Die Ergebnisse für das Klimaschutzszenario 80 sind für Wohngebäude in Tabelle 5-6 und für Nichtwohngebäude in Tabelle 5-7 dargestellt. In beiden Bereichen wurde im Klimaschutzszenario 80 eine zusätzliche Energieeinsparung um etwa 15 % in 2050 gegenüber 2008 erreicht und der erneuerbare Anteil um weitere 6 bis 8 % Prozentpunkte erhöht.

Erster sichtbarer Unterschied zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ist in Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 der deutlichere Rückgang des Erdgasbedarfes. Er sinkt bis zum Jahr 2050 auf unter 50% gegenüber 2008, nämlich auf 30 % in Wohngebäuden und auf 36 % in Nichtwohngebäuden. Der Rückgang im Erdgasbedarf ist zum Großteil der Energieeinsparung zuzuschreiben. Substituiert wird Erdgas nur im Haushaltssektor durch Erneuerbare und durch Fernwärme.

Der Fernwärmeanteil wächst für Nichtwohngebäude als auch für Wohngebäude um knapp 10 Prozentpunkte gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) im Jahr 2050. Die absolute Fernwärme schrumpft jedoch um 8 PJ für Nichtwohngebäude, während sie bei Wohngebäuden um 16 PJ zuwächst.

Durch den vermehrten Einsatz von Solarthermie und Wärmepumpen in Haushalten, steigen deren Endenergiebedarfe um 17 PJ und 6 PJ gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) in 2050. Weiterhin wird hierfür mehr Strom benötigt und der Stromanteil steigt um 7 PJ, auf 84 PJ. Das entspricht 8,5 % des Endenergiebedarfs im Haushaltssektor.

Im GHD-Sektor sinkt der Stromverbrauch absolut im Klimaschutzszenario 80 gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) um 2 PJ.

Tabelle 5-6 Endenergiebedarf der Gebäude im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 80

Energieträger	2008	2020	2030	2040	2050
			PJ		
Strom	123	87	79	84	84
Erdgas	1.029	831	628	431	298
Fern-und Nahwärme	156	240	297	317	321
Heizöl	509	207	42	5	2
Kohle	48	23	9	3	2
biogene Brennstoffe	235	248	230	197	164
Umweltwärme	12	26	43	72	83
Solarthermie	12	27	40	47	45
Summe	2.124	1.688	1.368	1.157	999
Minderung ggü. 2008		-436	-757	-968	-1.125
prozentuale Minderung ggü. 2008		-21%	-36%	-46%	-53%

Quellen: UBA (2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 5-4 Endenergiebedarf im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 80

Quellen: UBA *(2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI*

Tabelle 5-7 Endenergiebedarf im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 80

Energieträger	2008	2020	2030	2040	2050
			PJ		
Strom	47	22	18	19	21
Erdgas	418	368	271	152	87
Fern-und Nahwärme	115	120	104	89	81
Heizöl	183	95	23	2	1
Kohle	15	12	7	2	0
biogene Brennstoffe	28	35	28	22	19
Umweltwärme	3	3	6	12	15
Solarthermie	3	10	14	14	11
sonstige Erneuerbare	3	9	8	7	6
Summe	815	673	479	317	240
Minderung Gebäude ggü. 2008		-142	-336	-498	-575
prozentuale Minderung ggü. 2008		-17%	-41%	-61%	-71%

Quellen: UBA *(2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI*

Abbildung 5-5 Endenergiebedarf im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 80

Quellen: UBA *(2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI,*

5.1.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Im Klimaschutzszenario 90 mäßigt sich die zusätzliche Einsparung gegenüber dem Klimaschutzszenario 80. Die Minderung beträgt 57 % bei Wohngebäuden und 79 % bei Nichtwohngebäuden im Jahr 2050 gegenüber 2008.

Die Gebäudesektoren erleben keine oder nur eine eingeschränkte weitere Substitution von fossilen Brennstoffen, so kommt es dazu, dass auch der durch Erneuerbare Energien abgedeckte Anteil des Endenergiebedarfs kleiner wird. Im Nichtwohngebäudebereich schrumpft der Einsatz aller Energieträger gegenüber dem Klimaschutzszenario 80 in 2050: Erdgas um 29 PJ, Fern- und Nahwärme um 20 PJ, biogene Brennstoffe und Umweltwärme um 10 PJ und Solarthermie um 3 PJ,

Im Wohngebäudebereich gibt es eine Ausnahme, die Fernwärme. Sie substituiert andere Energieträger und trägt mit zusätzlichen 23 PJ gegenüber dem Klimaschutzszenario 80 zur Deckung des Endenergiebedarfes bei. Die Deckung durch Strom, biogene Brennstoffe und Umweltwärme wird in ähnlicher Größenordnung reduziert, nämlich um 16, 20 und 23 PJ. Die größte und kleinste Veränderung erfahren der Erdgaseinsatz mit einer Verringerung um 47 PJ und der Solarthermieeinsatz mit einer Reduktion um 7 PJ gegenüber dem Klimaschutzszenario 80.

Tabelle 5-8 Endenergiebedarf im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 90

Energieträger	2008	2020	2030	2040	2050
			PJ		
Strom	123	82	71	71	69
Erdgas	1.029	780	593	383	251
Fern-und Nahwärme	156	250	312	329	344
Heizöl	509	197	43	5	2
Kohle	48	22	9	3	2
biogene Brennstoffe	235	234	218	178	146
Umweltwärme	12	23	36	55	60
Solarthermie	12	27	39	43	38
Summe	2.124	1.614	1.321	1.065	912
Minderung ggü. 2008		-510	-803	-1.059	-1.212
prozentuale Minderung ggü. 2008		-24%	-38%	-50%	-57%

Quellen: UBA *(2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI*

Abbildung 5-6 Endenergiebedarf im Haushaltssektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 90 – 2050

Quellen: UBA (2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Tabelle 5-9 Endenergiebedarf im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 90

Energieträger	2008	2020	2030	2040	2050
			PJ		
Strom	47	22	18	19	21
Erdgas	418	369	261	127	58
Fern-und Nahwärme	115	119	99	75	60
Heizöl	183	95	23	2	1
Kohle	15	12	7	2	0
biogene Brennstoffe	28	31	23	16	10
Umweltwärme	3	3	5	8	7
Solarthermie	3	10	14	12	8
sonstige Erneuerbare	3	8	8	6	4
Summe	815	669	458	266	171
Minderung Gebäude ggü. 2008		-146	-357	-549	-644
prozentuale Minderung ggü. 2008		-18%	-44%	-67%	-79%

Quellen: UBA (2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Abbildung 5-7 Endenergiebedarf im GHD-Sektor nach Energieträgern für das Klimaschutzszenario 90

Quellen: UBA (2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

5.1.5 Vergleich der Szenarien

Das Energiekonzept der Bundesregierung beinhaltet das Ziel, den Primärenergiebedarf für die Bereitstellung von Wärme in Gebäuden bis zum Jahr 2050 um 80 % zu reduzieren. Tabelle 5-10 gibt die Entwicklungen des Endenergiebedarfs für die verschiedenen Szenarien wieder. Demnach wird der Endenergiebedarf um maximal 63 %, im Klimaschutzszenario 90, reduziert. Berücksichtigt man die Vermeidung von Brennstoffen durch den Einsatz von solarer und Umgebungswärme wird eine Reduktion von 67 % erreicht. Weiterhin tragen Fernwärme und Strom, die im Jahr 2050 zum Großteil aus Erneuerbaren generiert werden, zur klimaneutralen Wärmebereitstellung bei. Biogene Brennstoffe ergänzen die Substitution fossiler Brennstoffe und leisten ebenfalls einen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasen.

Der Strombedarf sinkt in allen Szenarien bis 2050. Im Klimaschutzszenario 80 sinkt er nicht so stark wie im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), weil mehr Elektrizität für den Betrieb von Wärmepumpen und Umwälzpumpen für Solarthermie notwendig ist. Es werden 23 PJ Endenergiebedarf mehr, nämlich 154 PJ statt 131 PJ durch diese Technologien gedeckt. Im Klimaschutzszenario 90 hingegen wird der Wärmebedarf so drastisch reduziert, dass dieser vermehrte Einsatz stromgestützter erneuerbarer Wärmebereitstellung nicht notwendig wird, sondern auf 114 PJ, also 17 PJ weniger, als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) reduziert wird.

Diese absoluten Differenzen spiegeln sich aufgrund des gesamten Rückgangs des Endenergiebedarfs kaum in den prozentualen Anteilen der Solarthermie und Umweltwärme wieder, die sich im Klimaschutzszenario 80 mit 12,4 % um ein Prozent über dem Anteil von 10,5 % im Klimaschutzszenario 90 unterscheiden.

Tabelle 5-10 Endenergiebedarf für Wärmebereitstellung in Gebäuden in den Sektoren GHD und Haushalte

Energieträger		2008	2020	2030	2040	2050
		PJ				
Brennstoffe	AMS	2.792	2.509	2.180	1.883	1.589
	KS 80	2.792	2.252	1.750	1.370	1.134
	KS 90	2.792	2.179	1.691	1.241	992
davon Solarthermie und Umweltwärme	AMS	29	63	93	120	131
	KS 80	29	66	103	144	154
	KS 90	29	63	94	118	114
Strom	AMS	163	111	95	98	99
	KS 80	163	109	97	104	105
	KS 90	163	104	89	90	90
Gesamt	AMS	2.955	2.620	2.275	1.981	1.688
	KS 80	2.955	2.361	1.846	1.474	1.240
	KS 90	2.955	2.283	1.780	1.331	1.083
prozentuale Minderung ggü. 2008	AMS		-11%	-23%	-33%	-43%
	KS 80		-20%	-38%	-50%	-58%
	KS 90		-23%	-40%	-55%	-63%
Anteil Solarthermie und Umweltwärme	AMS	1%	2%	4%	6%	8%
	KS 80	1%	3%	6%	10%	12%
	KS 90	1%	3%	5%	9%	11%
prozentuale Minderung ggü. 2008 ohne Endenergie aus Solar- und Umweltwärme	AMS		-13%	-25%	-36%	-47%
	KS 80		-22%	-40%	-55%	-63%
	KS 90		-24%	-42%	-59%	-67%

Quellen: UBA *(2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI*

Abbildung 5-8 Endenergiebedarf für Wärmebereitstellung in Gebäuden in den Sektoren GHD und Haushalte

Quellen: UBA *(2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI*

5.1.6 Zielerreichung Wärme in Gebäuden

Die Bundesregierung hat im Energiekonzept von 2010 (BMWi und BMU 2010) zwei Ziele für den Wärmebedarf in Gebäuden festgelegt. Demnach soll der Wärmebedarf bis zum Jahr 2020 gegenüber dem im Referenzjahr 2008 um 20% gesenkt werden. Wärme wird in Gebäuden für die Anwendungen Warmwasser und Raumwärme gebraucht.

Das zweite Ziel bezieht sich auf das Jahr 2050 und setzt als Bezugsgröße den Primärenergiebedarf. Der Primärenergiebedarf bezieht definitionsgetreu alle Verluste von der Gewinnung der Energieträger bis zur Anwendung als Wärme mit ein[36]. Dies umfasst den Transport von Energieträgern sowie verschiedene Umwandlungsstufen. Hierzu gehören beispielsweise die Vorbehandlung der Energieträger und der Umwandlungs-

[36] Demgegenüber bezieht der Endenergiebedarf nur alle Verluste beim Nutzer, also in diesem Fall in den in den Bilanzgrenzen von Haushalten, Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungs- sowie Industriegebäuden mit ein. Er stellt also einen Teil des Primärenergiebedarfs dar. Die Differenz zwischen Primärenergiebedarf und Endenergiebedarf bilden die Verluste vor Ankunft an der Bilanzgrenze des Nutzers. Diese Verluste entstehen beispielsweise durch den Transport zum Nutzer und gegebenenfalls bei der Vorverarbeitung des Energieträgers.

prozess von Energieträgern in Wärme. Heutzutage erfolgt die Umwandlung in Wärme großteils noch durch die Verbrennung von Kohle, Gas oder Holz vor Ort oder im Fernwärmekraftwerk. Dabei entstehen Verluste, die den Primärenergiebedarf erhöhen.

Werden Solarthermie und Umweltwärme vor Ort beim Nutzer zur Deckung des Wärmebedarfs eingesetzt, so entspricht der Wärmebedarf dem Primärenergiebedarf. Die Energie wird direkt beim Nutzer als Wärmeenergie aufgenommen[37]. Dies entspricht der Vorgehensweise der AGEB bei der Erstellung der Energiebilanzen, den Primärenergiefaktoren in der EnEV und denen in der DIN V 185999.

Bei der Erreichung der Ziele für Wärme in Gebäuden sind die Bilanzgrenze des Ziels sowie die Methodik der Bilanzierung zu berücksichtigen. Um die Dimensionen der Zielerreichung besser zu erfassen, enthält Tabelle 5-11 neben der Entwicklung des Gesamtendenergiebedarfs ebenfalls den Bedarf getrennt nach Raumwärme und Warmwasser. Weiterhin wurde der Beitrag von Solarthermie und Umweltwärme separiert, um die Daten für die Zielinterpretation zur Verfügung zu stellen. Es handelt es sich um vor Ort frei verfügbare erneuerbare Energieträger. Der Strom für die Unterstützung der solarthermischen Systeme und der Wärmepumpen ist der Position Strom zugeordnet und bleibt im Endenergiebedarf enthalten.

Das Energiekonzept verwendet für das 20%-Reduktionsziel bis zum Jahr 2020 den Begriff Wärmebedarf. Wird dieser Begriff als Heizwärmebedarf aufgenommen, so sind sowohl Raumwärme als auch Warmwasser einzuschließen. Der Raumwärmebedarf lässt sich durch energetische Sanierung in vielen deutschen Gebäuden mehr als halbieren. Der Warmwasserbedarf jedoch ist direkt an das Verbraucherverhalten geknüpft und bleibt in den betrachteten Szenarien daher konstant. Dennoch wird dieses Ziel im Klimaschutzszenario 80 erreicht.

In Tabelle 5-11 ist zur Untersuchung der Zielerreichung der Endenergiebedarf dargestellt. Die Ziele beziehen zwar nicht auf die Größe Endenergiebedarf, jedoch kann diese Darstellung Anhaltspunkte liefern. Zunächst ist der gesamte Endenergiebedarf für Warmwasser und Raumwärme in Gebäuden der Sektoren Haushalte und GHD inklusive allen Energieträgern aufgelistet. Er sinkt im Klimaschutzszenario 80 um 58 % auf 1.240 PJ im Jahr 2050. Ohne den Beitrag von vor Ort frei verfügbaren erneuerbaren Energieträgern Solarthermie und Umweltwärme vergrößert sich die Einsparung auf 63 %. Betrachtet man ausschließlich die Raumwärme werden sogar 69 % eingespart.

Im Ausgangsjahr beträgt der Anteil des Endenergiebedarfs für Warmwasser ein knappes Achtel. Er steigt mäßig in den 12 Jahren bis zum Jahr 2020 auf weiterhin geringe 15 %. Daher ist der Einfluss dieses Sockelbedarfs von ca. 345 PJ oder 95 TWh noch nicht signifikant. Das zweiprozentige Wachstum des Endenergiebedarfs für Warmwas-

[37] Es entstehen keine Übertragungsverluste für die Bereitstellung vor Ort beim Nutzer. Die freie Verfügbarkeit der Energie erlaubt es, die Umwandlungsverluste in der energetischen Bilanzierung zu vernachlässigen.

ser ist bedingt durch die größere Anzahl der Haushalte. Es kann durch eine entsprechende Raumwärmeeinsparung aufgewogen werden.

Tabelle 5-11 Endenergiebedarf für Wärmebereitstellung in Gebäuden

Endenergiebedarf	2008	2020	2050	Minderung 2020	Minderung 2050
	PJ				
Klimaschutzszenario 80					
Endenergiebedarf	2.939	2.361	1.240	**20%**	58%
Endenergiebedarf ohne Solarthermie und Umweltwärme	2.910	2.295	1.087	21%	63%
Endenergiebedarf Warmwasser	341	349	340	-2%	0%
Endenergiebedarf Raumwärme	2.599	2.013	899	23%	65%
Endenergiebedarf Raumwärme ohne Solarthermie und Umweltwärme	2.583	1.976	807	24%	69%
Klimaschutzszenario 90					
Endenergiebedarf	2.939	2.283	1.083	22%	63%
Endenergiebedarf ohne Solarthermie und Umweltwärme	2.910	2.220	969	24%	67%
Endenergiebedarf Warmwasser	341	348	335	-2%	2%
Endenergiebedarf Raumwärme	2.599	1.934	748	26%	71%
Endenergiebedarf Raumwärme ohne Solarthermie und Umweltwärme	2.583	1.901	684	26%	**73,5%**

Quellen: UBA (2012b), Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Bei Betrachtung des 80 %-Reduktionsziels für das Jahr 2050 ist festzustellen, dass auch im Klimaschutzszenario 90 das Reduktionsziel bei einfacher Übertragung auf den Endenergiebedarf um mindestens 7 % verfehlt wird, und das nur wenn man alleinig Raumwärme betrachtet und den durch Solarthermie und Umweltwärme erbrachten gedeckten Bedarf abzieht. Ohne diesen Bedarf und bei Betrachtung von Raumwärme und Warmwasser erreicht man zehn Prozent weniger Einsparung, nämlich eine Senkung um 63 %.

Für die primärenergetische Betrachtung sind Annahmen für den Primärenergiefaktor von Strom und Fernwärme zu treffen. Die Faktoren für das Jahr 2008, 2020 und 2050 entstammen der DIN V 185999 für den nicht erneuerbaren Anteil. Die Faktoren für das Jahr 2050 sind für eine Darstellung die dem Kraftwerkspark in 2050 gerecht wird an die Ergebnisse aus dem Stromsektor anzugleichen. Diese Primärenergieberechnung unterscheidet sich somit von der im Kapitel 5.9 gewählten Methode, die alle Sektoren vereint, und den nachgefragten Energieträgern die modellierten Umwandlungsverluste zuschreiben kann.

Tabelle 5-13 belegt, dass für das Erreichen des 80 %-Reduktionsziels die Energieeinsparmaßnahmen und die Substitution durch effizientere Wärmebereitstellungstechnologien bereits einen Großteil der Einsparungen, nämlich 72 % liefern können. Die zur Zielerreichung fehlenden 8 %-Punkte müssen durch Maßnahmen im Umwandlungssektor erbracht werden. Daraufhin sinkt der Primärenergiefaktor von Strom und Fernwärme, was die Reduktion des Primärenergiebedarfs im Jahr 2050 zur Folge hat. Im

Jahr 2050 werden 90 PJ Strom und 404 PJ Fernwärme in Gebäuden für die Wärmebereitstellung nachgefragt.

Tabelle 5-12 Primärenergiefaktoren

Primärenergiefaktoren	
biogene Brennstoffe	1,5
Erdgas	1,1
Erneuerbare	1,5
Fernwärme	1
Heizöl	1,1
Kohle	1,1
Solarthermie	1
Sonstige	1
Sonstige Gase	1,1
Strom	2,8
Umweltwärme	1

— Vornorm — **DIN V 18599-1:2011-12**

Tabelle A.1 — Primärenergiefaktoren[a]

Energieträger[a]		Primärenergiefaktoren f_p	
		insgesamt	nicht erneuerbarer Anteil
		A	B
Fossile Brennstoffe	Heizöl EL	1,1	1,1
	Erdgas H	1,1	1,1
	Flüssiggas	1,1	1,1
	Steinkohle	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Biogas	1,5	0,5
	Bioöl	1,5	0,5
	Holz	1,2	0,2
Nah-/Fernwärme aus KWK[b]	fossiler Brennstoff	0,7	0,7
	erneuerbarer Brennstoff	0,7	0,0
Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	fossiler Brennstoff	1,3	1,3
	erneuerbarer Brennstoff	1,3	0,1
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	2,4
	Verdrängungsstrommix	2,8	2,8
Umweltenergie	Solarenergie	1,0	0,0
	Erdwärme, Geothermie	1,0	0,0
	Umgebungswärme	1,0	0,0
	Umgebungskälte	1,0	0,0
Abwärme innerhalb des Gebäudes	aus Prozessen, siehe 3.1.32	1,0	0,0

[a] Bezugsgröße Endenergie: Heizwert H_i.

[b] Angaben sind typisch für durchschnittliche Nah-/Fernwärme mit einem Anteil der KWK von 70 %.

Bei Prozessen der Fern- und Nahwärme oder Fernkälte werden die Werte der nicht in Tabelle A.1 enthaltenen Anlagen gesondert errechnet, siehe A.4.

Für gebäudebezogene KWK-Anlagen ergibt sich der Primärenergiefaktor nach DIN V 18599-9, sofern diese Systeme analog einer Nahwärme bewertet werden (Verfahren B).

Quellen: Din V 185999

Tabelle 5-13 Primärenergie in Gebäuden

Primärenergiebedarf	2008	2020	2050	Minderung 2020	Minderung 2050
	PJ				
Klimaschutzszenario 80					
Primärenergiebedarf	3.532	2.794	1.541	**21%**	56%
Primärenergiebedarf ohne Solarthermie und Umweltwärme	3.502	2.728	1.439	22%	59%
Primärenergiebedarf Warmwasser	409	413	423	-1%	-3%
Primärenergiebedarf Raumwärme	3.123	2.382	1.118	24%	64%
Primärenergiebedarf Raumwärme ohne Solarthermie und Umweltwärme	3.107	2.345	1.025	25%	67%
Klimaschutzszenario 90					
Primärenergiebedarf	3.532	2.695	1.332	24%	62%
Primärenergiebedarf ohne Solarthermie und Umweltwärme	3.502	2.632	1.238	25%	65%
Primärenergiebedarf Warmwasser	409	413	423	-1%	-3%
Primärenergiebedarf Raumwärme	3.123	2.297	966	26%	69%
Primärenergiebedarf Raumwärme ohne Solarthermie und Umweltwärme	3.107	2.261	873	27%	**72%**

Quellen: Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

5.2 Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung

5.2.1 Annahmen und Parameter

Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung wird bei großen elektrischen Haushaltsgeräten, mit Ausnahme von Wäschetrockner und Spülmaschinen, nur noch von geringfügig steigenden oder konstanten Ausstattungsraten ausgegangen. Überwiegend wird die Bestandsänderung an großen Geräten in den kommenden Jahren durch Ersatzbeschaffungen bestimmt. Für IKT-Endgeräte wird hingegen im Wesentlichen mit weiter steigenden Ausstattungsraten gerechnet. Dies gilt insbesondere für Computer, Set-top-Boxen und Router, bei denen noch deutliche Zuwächse zu erwarten sind. Bei denen dieses Verbrauchssegment der IKT-Endgeräte dominierenden Fernsehern wird bei der heute schon hohen Ausstattungsrate von rund 1,6 TV-Geräten pro Haushalt in Deutschland nur noch ein geringfügiger Anstieg angenommen. Insgesamt sind IKT-Endgeräte diejenige Verbrauchergruppe, bei der die Änderung der Ausstattungsraten mit den größten Unsicherheiten verbunden ist, aufgrund kurzer Reinvesititonszyklen zwischen 4-8 Jahren und einer hohen Dynamik in der Entwicklung neuer Energieanwendungen.

Bei der Anzahl an Beleuchtungspunkten pro Wohneinheit (ist äquivalent zur Ausstattungsrate bei Haushaltsgeräten) wird mit einer weitgehend konstanten Anzahl gerechnet. Schwierig zu bestimmen ist aufgrund der unzureichenden Datenlage der heutige

und zukünftige Bestand an Klimageräten in privaten Haushalten. Die Abschätzung erfolgt hier in Anlehnung an die ErP Proparatory Studies (2008a) zu Raumklimageräten in privaten Haushalten und eine darauf aufbauende Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Barthel et al. 2010). Danach wird bereits bis 2030 von einem Zuwachs des Bestands um den Faktor 7,6 ausgegangen. Die Ausstattungsraten der privaten Haushalte mit elektrischen Haushaltsgeräten, Beleuchtung und Klimaanlagen werden auf Grundlage der regelmäßigen Veröffentlichungen des ZVEI und weiterer Studien (Barthel, Franke, Müller, & Dittmar 2010;BITKOM 2008;ErP Preparatory Studies 2008a;Fraunhofer IZM and Fraunhofer ISI 2009;GFK 2010;Prognos & Öko-Institut 2009;StBA 2010;ZVEI 2009). Im AMS (2012), KS 80 und KS 90 wird von gleichen Ausstattungsraten ausgegangen, um eine hohe Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien zu gewährleisten. Entsprechend sind auch die Sättigungsgrenzen der einzelnen Energieanwendungen in allen drei Szenarien identisch.

Der spezifische Stromverbrauch der einzelnen Gerätekategorien, der Beleuchtung und Klimaanlagen wird durch die jeweiligen Nutzungszeiten in den verschiedenen Betriebszuständen, die Verteilung der Anteile der Energieeffizienzklassen an den Geräteverkäufen sowie die spezifische Leistungsaufnahme in den verschiedenen Betriebszuständen bestimmt. Letztere wiederum wird insbesondere durch die jeweiligen Anforderungen an Mindesteffizienzstandards durch die Ökodesign-Richtlinie bestimmt. Auch die Anteile der Energieeffizienzklassen an den Geräteverkäufen werden zumindest am unteren Rand durch die Anforderungen der Ökodesign-Richtlinie beschränkt, wodurch weniger effiziente Klassen zunehmend nicht mehr auf den Markt gebracht werden dürfen.

Darüber hinaus wird im AMS (2012) angenommen, dass sich die Entwicklung der Geräte-, Beleuchtungs- und Klimaanlagenverkäufe nach Effizienzklassen, wie sie bis 2008 nach den Angaben der GFK (2010) auf dem Markt zu beobachten war, auch in Zukunft fortsetzt. Weitere Quellen die neben der GfK für die Schätzung der spezifischen Verbräuche herangezogen werden sind Barthel, Franke, Müller & Dittmar (2010), ErP (2007a-c, 2008a-e, 2009), Fraunhofer IZM & Fraunhofer ISI (2009), Olonscheket al. (2011), Prognos (2007), Prognos & EWI (2006), Prognos & Öko-Institut (2009). Für das KS 80 wird mit einer weiteren Verstärkung der Marktdynamik gerechnet. Dies schließt auch die Einführung einer ‘Neue Klasse‘ ein, die stellvertretend für effizientere, bisher noch nicht definierte Effizienzklassen steht. Darüber hinaus wird im KS 90 angenommen, dass die Konsumenten wesentlich sensibler auf Labelling von effizienten Produkten reagieren bzw. dass die Minimierung der Lebenszykluskosten bei der Kaufentscheidung einen höheren Stellenwert einnimmt.

Die Nutzungszeiten in den verschiedenen Betriebszuständen sind vor allem für die IKT-Geräte relevant. Hier wird überwiegend auf die Annahmen in Fraunhofer IZM & Fraunhofer ISI (2009) zurückgegriffen. Für die meisten IKT-Geräte wird dabei von weiter steigenden Nutzungszeiten ausgegangen. Dies führt zu einer teilweisen Kompensation technischer Effizienzverbesserungen der Geräte und zu einem entsprechend geringeren Rückgang – oder sogar Anstieg - des spezifischen Stromverbrauchs. Für das

AMS (2012), KS 80 und KS 90 werden die gleichen Nutzungszeiten unterstellt. Den gleichen Effekt haben Trends wie größere Monitore und eine erhöhte Leistungsfähigkeit der Geräte (so genannter direkter Rebound-Effekt).

Bei der Beleuchtung ist ein Rückgang des spezifischen Verbrauchs darauf zurückzuführen, dass bereits im AMS (2012) davon ausgegangen wird, dass Glühlampen aufgrund der Vorschriften unter der Ökodesign-Richtlinie zukünftig vollständig aus dem Markt gehen werden. Halogenlampen bleiben nur noch als Nischenanwendungen im Markt bestehen. Als Ersatz kommen dafür im AMS (2012) zunächst verstärkt Leuchtstofflampen zur Anwendung, die die Glüh- und Halogenlampen nahezu vollständig ersetzen. LED-Lampen diffundieren im AMS (2012) nur langsam in den Markt. Die zusätzlichen Einsparungen für Beleuchtung im KS 80 und KS 90 sind auf die stärkere Marktdiffusion von LED-Lampen zurück zu führen. [38]

5.2.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Einen Überblick über die Entwicklung des Stromverbrauchs privater Haushalte im AMS (2012) nach Anwendungsbereichen geben Tabelle 5-14 und Abbildung 5-9. Bereits im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) verzeichnen die privaten Haushalte einen kontinuierlichen Rückgang des Stromverbrauchs, der sich bis zum Jahr 2050 auf knapp ein Viertel beläuft. Die größten Verbrauchsminderungen sind dabei in den Anwendungsgruppen „Weiße Ware“ (-50%), „Beleuchtung“ (-40%) und „Kochen“ (-25%) zu verzeichnen. Demgegenüber stagniert der Stromverbrauch für IKT-Endgeräte bis 2030, da sich hier der Einfluss weiter steigender Gerätebestände und von Effizienzverbesserungen zunächst kompensieren. Erst danach dominieren die Effizienzgewinne, so dass auch die IKT-Geräte zum beobachteten Verbrauchsrückgang beitragen. Im Bereich der Klimatisierung wird zumindest bis 2030 mit einem deutlichen Bestandszuwachs gerechnet (siehe Abschnitt 5.2.1), der sich in einem deutlichen Anstieg des Stromverbrauchs von 3 PJ in 2010 auf 23 PJ in 2030 niederschlägt. Bei elektrischen Kleingeräten wiederum ist insbesondere aufgrund fehlender Politikmaßnahmen nicht mit nennenswerten Verbesserungen der Energieeffizienz zu rechnen, so dass hier der Verbrauch bis 2030 stagniert und auch danach nur leicht sinkt. Der Rückgang des Verbrauchs zwischen 2030 und 2050 ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass sich die Geräte der Weißen Ware und Fernseher bereits 2030 nahe der Sättigungsgrenze befinden und somit in diesem Zeitraum nur noch ein minimaler Anstieg der Ausstattungsraten erfolgt, der teilweise zu einer Kompensation der Effizienzsteigerung in den Jahren zuvor führte.

Die wirksamste Politikmaßnahme im Bereich des Stromverbrauchs der privaten Haushalte ist die Ökodesign-Richtlinie. Diese beeinflusst insbesondere die Effizienzentwick-

[38] Eine detailliertere Auflistung der Ausstattungsraten und spezifischen Verbräuche ist in (Öko-Institut et al. 2013) aufgeführt.

lung bei der Beleuchtung und den IKT-Endgeräten sowie etwas abgeschwächter auch bei den großen elektrischen Haushaltsgeräten. Die relativ große Wirkung dieser Maßnahme schon im AMS (2012) ist darauf zurück zu führen, dass hier bereits eine ambitionierte Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie für alle Produkte auf Basis der Durchführungsmaßnahme bzw., wenn noch nicht vorhanden, der niedrigsten Lebenszykluskosten angenommen wurde. Die zweite relevante Politikmaßnahme ist die Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung, die im AMS (2012) vor allem zu den hohen Einsparungen bei der Weißen Ware.

Abbildung 5-9 Energienachfrage im AMS (2012) nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050 (Quellen: Schätzungen Fraunhofer ISI)

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-14 Energienachfrage nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050 – AMS (2012)

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Weiße Ware	120,1	102,8	89,7	73,9	60,5
Strom	120,1	102,8	89,7	73,9	60,5
Kochen	44,9	40,0	37,9	35,6	33,8
Strom	41,7	36,9	35,0	32,8	31,2
Erdgas	3,2	3,0	2,8	2,8	2,6
IKT-Endgeräte	77,6	76,8	76,7	69,0	59,8
Strom	77,6	76,8	76,7	69,0	59,8
Kleingeräte	28,8	28,8	28,7	26,7	25,3
Strom	28,8	28,8	28,7	26,7	25,3
Klimatisierung	3,0	12,5	21,8	23,2	22,6
Strom	3,0	12,5	21,8	23,2	22,6
Beleuchtung	41,5	33,5	28,2	21,9	16,2
Strom	41,5	33,5	28,2	21,9	16,2
Sonstige	73,6	78,0	80,5	78,7	79,7
Strom	73,6	78,0	80,5	78,7	79,7
Gesamtenergieverbrauch	389,5	372,4	363,5	328,9	297,9
ggü. 2008		-26,7	-35,6	-70,2	-101,2
ggü. 2008 [%]		-6,9%	-9,1%	-18,0%	-26,0%

Quelle: Eigene Berechnungen

5.2.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Die erwartete Entwicklung des Stromverbrauchs von Haushaltsgeräten, Beleuchtung und Klimageräten im KS 80 für die einzelnen Anwendungsbereiche zeigen Abbildung 5-10 und Tabelle 5-15. Gegenüber dem AMS (2012) liegt der Verbrauchsrückgang mit rund 30,3% bis 2050 nur geringfügig höher. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass in den Anwendungsgruppen mit den höchsten Einsparpotenzialen, der Weißen Ware und der Beleuchtung, diese bereits im AMS (2012) weitgehend realisiert wurden. Bei der Weißen Ware wurde zudem noch eine Förderung von hocheffizienten (marktbesten) Geräten unterstellt im Zusammenhang mit einer Rückgabe von Altgeräten. Dies führt dazu, dass gegenüber dem AMS (2012) die Effizienzpotentiale der Weißen Ware zu einem früheren Zeitpunkt erschlossen werden. Deutlichere Einsparungen ergeben sich des Weiteren bei den IKT-Endgeräten, da hier von einer ambitionierteren Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie als im AMS (2012) ausgegangen wird. Klimageräte bleiben in diesem Szenario mit 19.4 PJ in 2050 ähnlich wie im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) mit 22.6 PJ weiterhin von untergeordneter Bedeutung an der sektoralen Stromnachfrage.

Abbildung 5-10 Energienachfrage im KS 80 nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-15 Energienachfrage nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050 – KS 80

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Weiße Ware	120,1	100,6	77,6	64,1	57,5
Strom	120,1	100,6	77,6	64,1	57,5
Kochen	44,9	39,9	35,1	32,6	30,4
Strom	41,7	36,9	32,3	30,0	28,0
Erdgas	3,2	3,0	2,7	2,6	2,3
IKT-Endgeräte	77,6	69,0	58,9	52,4	47,1
Strom	77,6	69,0	58,9	52,4	47,1
Kleingeräte	28,8	29,1	28,2	27,4	26,8
Strom	28,8	29,1	28,2	27,4	26,8
Klimatisierung	3,0	11,9	19,5	20,1	19,4
Strom	3,0	11,9	19,5	20,1	19,4
Beleuchtung	41,5	31,9	21,8	17,1	15,1
Strom	41,5	31,9	21,8	17,1	15,1
Sonstige	73,6	79,0	79,1	81,0	84,6
Strom	73,6	79,0	79,1	81,0	84,6
Gesamtenergieverbrauch	389,5	361,4	320,3	294,7	281,0
ggü. 2008		-37,7	-78,8	-104,5	-118,1
ggü. 2008 [%]		-9,7%	-20,2%	-26,8%	-30,3%

Quelle: Eigene Berechnungen

5.2.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Der erwartete Stromverbrauch von Haushaltsgeräten, Beleuchtung und Klimageräten im KS 90 für die einzelnen Anwendungsbereiche ist in Abbildung 5-11 und Tabelle 5-16 dargestellt. Dabei sinkt die Energienachfrage insgesamt um ca. 42% gegenüber 2008 auf ein Niveau von 235.2 PJ im Jahr 2050. Die größten Verbrauchsminderungen sind dabei in den Anwendungsgruppen „Weiße Ware“ (-64%), „Beleuchtung (-72%) und „Kochen (-48%) zu verzeichnen. Gegenüber den anderen beiden Szenarien zeigt sind, dass die Stromnachfrage zu einem wesentlichen früheren Zeitpunkt und stärker sinkt aufgrund der Verbreitung von effizienten Haushaltsgeräten, Beleuchtung und Klimageräten im Bestand. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Szenario von zusätzlichen Effizienzklassen ausgegangen wurde und sich die Haushaltsbewohner nahezu immer für die beste verfügbare Anwendung entscheiden im Falle eine Ersatz- oder Neuinvestition. Des Weiteren im KS 90 ein Bewusstseinswandel unterstellt der dazu führt, dass die Entscheidungsträger wesentlichen sensibler auf das Labelling von Geräten bei der Kaufentscheidung reagieren. Im Zuge dieses Bewusstseinswandels wurde zudem von einer niedrigeren Ausstattung der Haushalte mit Geräten ausgegangen. Da Kleinanwendungen aufgrund deren höheren Dynamik auch in diesem Szenario nicht von politischen Maßnahmen adressiert werden sinkt die Stromnachfrage dieser Gruppe in Relation zu den anderen Szenarien am geringsten.

Abbildung 5-11 Energienachfrage im KS 90 nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-16 Energienachfrage nach Anwendungsgruppen für den Zeitraum 2010-2050 – KS 90

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Weiße Ware	120,1	82,7	58,1	48,1	43,7
Strom	120,1	82,7	58,1	48,1	43,7
Kochen	44,9	33,3	26,8	24,8	23,3
Strom	41,7	30,3	24,2	22,4	21,2
Erdgas	3,2	3,0	2,6	2,4	2,1
IKT-Endgeräte	77,6	61,6	49,3	44,2	40,5
Strom	77,6	61,6	49,3	44,2	40,5
Kleingeräte	28,8	24,9	23,0	23,3	24,1
Strom	28,8	24,9	23,0	23,3	24,1
Klimatisierung	3,0	11,5	17,9	17,7	16,3
Strom	3,0	11,5	17,9	17,7	16,3
Beleuchtung	41,5	26,2	16,3	12,8	11,4
Strom	41,5	26,2	16,3	12,8	11,4
Sonstige	73,6	67,6	64,3	68,8	76,0
Strom	73,6	67,6	64,3	68,8	76,0
Gesamtenergieverbrauch	389,5	307,9	255,8	239,6	235,2
ggü. 2008		-91,2	-143,4	-159,5	-163,9
ggü. 2008 [%]		-23,4%	-36,8%	-40,9%	-42,1%

Quelle: Eigene Berechnungen

5.2.5 Vergleich der Szenarien

Ein Vergleich der Stromnachfrage in den drei Szenarien ist Tabelle 5-17 und Abbildung 5-12 zu entnehmen. In allen Szenarien geht der Stromverbrauch der privaten Haushalte bis 2050 kontinuierlich zurück. Der Unterschied zwischen dem AMS (2012) und dem KS 80 fällt mit 24 % bzw. 28 % bis 2050 relativ gering aus. Im KS 90 kann demgegenüber nochmals ein deutlich stärkerer Rückgang der Stromnachfrage um 40% bis 2050 erreicht werden. Dies erfordert jedoch die Ausschöpfung nahezu aller verfügbaren Einsparpotenziale. Die langfristige Annäherung der Projektions-Ergebnisse ist darauf zurückzuführen, dass die Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimageräte sich langfristig auf eine Sättigungsgrenze von Ausstattungsraten hin approximieren. Wie bereits in Kapitel 5.2.4 beschrieben wurde im KS 90 von einer niedrigeren Sättigungsgrenze ausgegangen. Des Weiteren ist die Annäherung auf eine langfristige Angleichung der spezifischen Verbräuche zurückzuführen, da die vorzeitig erschlossenen Effizienzpotentiale im KS 90 dazu führen, dass der Ersatz von Geräten in diesem Szenario bei einem längerfristigen Zeithorizont geringe zusätzliche Einsparpotentiale mit sich bringt.

Abbildung 5-12 Vergleich der Energienachfrage der Szenarien AMS (2012), KS 80 und KS 90 für den Zeitraum 2010-2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-17 Vergleich der Energienachfrage der Szenarien AMS (2012), KS 80 und KS 90 für den Zeitraum 2010-2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
AMS (2012)	389.5	372.4	363.5	328.9	297.9
Strom	386.3	369.4	360.7	326.1	295.4
Erdgas	3.2	3.0	2.8	2.8	2.6
KS 80	389.5	361.4	320.3	294.7	281.0
Strom	386.3	358.4	317.6	292.1	278.6
Erdgas	3.2	3.0	2.7	2.6	2.3
KS 90	389.5	307.9	255.8	239.6	235.2
Strom	386.3	304.9	253.2	237.2	233.1
Erdgas	3.2	3.0	2.6	2.4	2.1
DS ggü. 2010		-17.1	-26.0	-60.6	-91.6
DS ggü. 2010 [%]		-4.4%	-6.7%	-15.6%	-23.5%
MS ggü. 2010		-28.1	-69.2	-94.9	-108.5
MS ggü. 2010 [%]		-7.2%	-17.8%	-24.4%	-27.9%
2GS ggü. 2010		-81.6	-133.7	-149.9	-154.3
2GS ggü. 2010 [%]		-21.0%	-34.3%	-38.5%	-39.6%

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-18 zeigt die Emissionsentwicklungen für CO_2, CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick.

Die Emissionen der Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O gehen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (AMS (2012)) in der Periode 2005 bis 2050 von 112 Mio. t CO_2-Äqu. auf 38 Mio. t CO_2-Äqu., also um insgesamt etwa 74 Mio. t CO_2-Äqu. zurück. Im Klimaschutzszenario 80 (KS 80) liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 18 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 94 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Im Klimaschutzszenario 90 (KS 90) sinken die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 97 Mio. t CO_2-Äqu. auf 15 Mio. t CO_2-Äqu.

Für die Periode 2005 bis 2020 ergibt sich damit im AMS (2012) eine Emissionsminderung von 33 % und für den Zeitraum von 2005 bis 2050 von 66 %. Die entsprechenden Vergleichswerte für das KS 80 belaufen sich auf 42 % bzw. 84 % und für das KS 90 auf 45 % bzw. 87 %.

Bezogen auf die Ausgangswerte des Jahres 1990 betragen die entsprechenden Reduktionsraten bis 2050 im AMS (2012), KS 80 und KS 90 71%, 87% bzw. 89%.

Tabelle 5-18 Emissionsentwicklungen für den Haushaltssektor (Gebäude + Geräte) im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CO_2-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	129.474	111.074	101.946				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				73.882	56.462	45.576	37.334
Klimaschutzszenario 80				64.274	39.325	24.958	17.176
Klimaschutzszenario 90				60.579	37.469	22.194	14.451
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	1.200	502	746				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				537	467	402	324
Klimaschutzszenario 80				489	414	350	282
Klimaschutzszenario 90				462	393	309	247
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	802	363	417				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				265	196	156	125
Klimaschutzszenario 80				236	160	117	90
Klimaschutzszenario 90				223	152	104	78
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	131.476	111.939	103.110				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				74.684	57.125	46.134	37.783
Klimaschutzszenario 80				65.000	39.899	25.424	17.548
Klimaschutzszenario 90				61.264	38.014	22.607	14.776
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-43,2	-56,6	-64,9	-71,3
Klimaschutzszenario 80				-50,6	-69,7	-80,7	-86,7
Klimaschutzszenario 90				-53,4	-71,1	-82,8	-88,8
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-33,3	-49,0	-58,8	-66,2
Klimaschutzszenario 80				-41,9	-64,4	-77,3	-84,3
Klimaschutzszenario 90				-45,3	-66,0	-79,8	-86,8

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

5.3 Industrie

5.3.1 Annahmen und Parameter

Im Folgenden werden zunächst die Annahmen zur Entwicklung der industriellen Produktion diskutiert und danach auf die Annahmen zur Struktur des Energiebedarfs und zur Diffusion von Effizienztechniken in den einzelnen Technologiefeldern eingegangen.

5.3.1.1 Produktionsmenge und Materialeffizienz

Für die energieintensiven Branchen der Industrie ist neben der Bruttowertschöpfung die die Tonnenproduktion eine zentrale Aktivitätsgröße. Gleichzeitig stellt sie über Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft einen wichtigen Stellhebel für die Vermeidung von Treibhausgasen dar.

Für diese sind in den folgenden Tabellen, Tabelle 5-19 und Tabelle 5-20 die Annahmen zur Entwicklung von 2000 bis 2050 dargestellt. Während die Produktionsmengen im Jahr 2000 und 2010 aus verschiedenen Statistiken der Verbände sowie vom Statistischen Bundesamt stammen, stellt die Fortschreibung eine Annahme dar, die in Diskussion mit Branchenvertretern validiert wurde. Die Entwicklung der Wertschöpfung in der übergeordneten Statistischen Einheit, dem NACE-2-Steller (nach europäischer Aktivitätsklassifizierung), muss dabei nicht unbedingt parallel zur physischen Produktion verlaufen, da sich die Wertschöpfung zum großen Teil an der Produktion der höherwertigen, weniger energieintensiven Zwischenprodukte orientiert und weniger an der Produktion von energieintensiven Grundstoffen.

In Tabelle 5-19 und Tabelle 5-20 sind zunächst die Annahmen für das Aktuelle-Maßnahmen- und das Klimaschutzszenario 80 dargestellt. Für beide werden die gleichen Produktionsmengen zugrunde gelegt.

Tabelle 5-19 Entwicklung der industriellen Produktion im Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 (Teil 1)

Prozess/Produkt	Einheit	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Eisen und Stahl							
Sintern	kt	30.845	28.560	27.726	25.715	23.380	21.293
Oxygenstahl - Hochofen	kt	33.052	30.615	29.721	27.565	25.063	22.825
Elektrostahl - EAF	kt	13.324	13.215	17.018	17.797	17.587	18.675
Walzstahl	kt	38.974	36.827	40.432	39.241	36.894	35.900
Koksofen	kt	9.115	8.171	7.932	7.357	6.689	6.092
Schmelzreduktion	kt	-	-	-	-	-	-
Direkte Reduktion	kt	455	487	593	593	593	593
Nicht-Eisen Metalle							
Aluminium primär	kt	644	403	550	485	431	389
Aluminium sekundär	kt	572	611	824	899	979	1.070
Aluminium Strangpressen	kt		559	617	680	750	826
Aluminium Gießereien	kt	646	810	869	959	1.057	1.165
Aluminium Walzen	kt		1.877	2.069	2.281	2.515	2.773
Kupfer primär	kt	310	402	350	350	350	350
Kupfer sekundär	kt	399	302	301	301	301	301
Kupferbearbeitung	kt	1.999	1.732	1.858	1.858	1.858	1.858
Primärzink	kt	261	238	238	238	238	238
Sekundärzink	kt	67	89	89	89	89	89
Papiergewerbe							
Papier	kt	18.182	22.509	25.040	25.567	25.608	26.278
Zellstoff - Verfahren	kt	873	1.383	1.355	1.107	929	800
Holzstoff - Verfahren	kt	1.342	1.520	1.490	1.217	1.021	880
Altpapierstoff	kt	13.677	15.378	17.242	17.929	18.260	19.218
Glas							
Behälterglas	kt		4.379	4.601	4.818	4.969	5.173
Flachglas	kt		1.814	1.906	1.996	2.058	2.142
Glasfasern	kt		1.013	1.064	1.114	1.149	1.196
Übriges Glas	kt		479	504	527	544	566
Keramik							
Haushalts- und Sanitärkeramik	kt		120	122	123	123	123
Technische Keramik	kt		239	242	242	242	243
Fliesen, Platten, Feuerfestkeramik	kt		2.192	2.298	2.378	2.405	2.472
Nicht metallische Mineralstoffe							
Klinker Brennen (trocken)	kt	24.303	22.823	23.790	22.122	20.205	18.891
Klinker Brennen (halbtrocken)	kt	1.978	1.718	-	-	-	-
Klinker Brennen (feucht)	kt	-	-	-	-	-	-
Aufbereitung von Kalkstein	kt		24.311	23.567	21.915	20.016	18.715
Gips	kt		953	953	953	953	953
Zementmahlen	kt	35.414	32.721	32.589	32.061	31.395	30.871
Kalkmahlen	kt		5.250	5.250	5.250	5.250	5.250
Ziegel	kt	18.307	10.642	12.956	12.746	12.367	11.941
Kalkbrennen	kt	7.382	6.339	7.000	7.000	7.000	7.000

Quelle: FORECAST-Industry, Fraunhofer ISI

Tabelle 5-20 Entwicklung der industriellen Produktion im Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 (Teil 2)

Prozess/Produkt	Einheit	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Chemie							
Adipinsäure	kt		358	456	552	668	808
Ammoniak	kt	3.221	3.128	3.450	3.450	3.479	3.539
Calciumcarbid	kt		180	190	190	190	190
Industrieruß	kt	346	684	684	684	684	684
Chlor, Diaphragma	kt	860	1.104	1.162	-	-	-
Chlor, Membran	kt	2.035	2.611	3.615	4.777	4.777	4.777
Chlor, Amalgan	kt	642	824	-	-	-	-
Ethylen	kt		4.794	5.299	5.842	6.441	7.101
Methanol	kt	1.922	1.924	2.025	2.025	2.025	2.025
Salpetersäure	kt	1.828	2.513	3.086	3.581	4.054	4.479
Sauerstoff	kt		7.312	8.082	8.910	9.824	10.830
Polycarbonat	kt		432	601	727	899	1.136
Polyethylen	kt		2.704	3.287	3.624	4.042	4.561
Polypropylen	kt	1.337	1.832	2.227	2.455	2.739	3.091
Polysulfone	kt		323	449	594	777	1.005
Soda	kt	1.422	1.454	1.454	1.454	1.454	1.454
TDI	kt		380	528	639	773	935
Titandioxid	1000 m³		437	483	533	587	647
Nahrungsmittel							
Zucker	kt		3.846	3.963	3.884	3.812	3.746
Molkerei	kt		13.877	14.298	14.015	13.754	13.515
Bierbrauen	kt		9.853	9.951	9.560	9.196	8.857
Fleischverarbeitung	kt	3.116	4.631	4.880	4.929	4.981	5.037
Backwaren	kt		4.328	4.504	4.459	4.420	4.387
Stärke	kt		1.811	1.885	1.866	1.850	1.836
Kunststoffverarbeitung							
Extrusion	kt		4.325	5.006	5.438	5.928	6.543
Spritzgießen	kt		2.178	2.521	2.738	2.985	3.294
Blaßformen	kt		950	1.099	1.194	1.302	1.436

Quelle: FORECAST-Industry, Fraunhofer ISI

Für das Klimaschutzszenario 90 wurden die Produktionsmengen angepasst um einen stärkeren Einfluss von Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft abzubilden, welche jeweils den Energiebedarf reduzieren. In Tabelle 5-21 sind zunächst die zentralen Annahmen bezüglich der Nutzung von Sekundärrohstoffen und weniger energieintensiven Füllstoffen zusammengefasst und im Vergleich der Szenarien dargestellt. Wie alle Produktionsmengen, sind auch dies exogene Annahmen und nicht als Wirkung von z.B. Emissionshandel oder anderen Instrumenten der Klimapolitik modelliert.

Tabelle 5-21 Entwicklung ausgewählter Kennwerte zur Nutzung von Sekundärrouten bei energieintensiven Produkten im Vergleich zwischen den Szenarien

Kennwert	2000	2010	2030		2050	
			AMS und KS 80	KS 90	AMS und KS 80	KS 90
Stahl: Anteil Elektrostahl	29%	30%	39%	42%	45%	51%
Aluminium: Anteil Sekundäraluminium	47%	60%	65%	68%	73%	77%
Kupfer: Anteil Sekundärkupfer		43%	46%	49%	46%	52%
Papier: Anteil Recyclingfaserstoff	86%	85%	89%	90%	92%	95%
Zement: Klinkerfaktor	74%	77%	69%	64%	61%	52%

Quelle: FORECAST-Industry. Fraunhofer ISI

Annahmen zur Materialeffizienz im Sinne von gesunkener Nachfrage und entsprechend gesunkener Produktion energieintensiver Güter wurden je Produkt bzw. Zwischenprodukt getroffen. Im Klimaschutzszenario 90 wurde im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien eine gesteigerte Materialeffizienz unterstellt, die langfristig (2050) in einer Reduktion der produzierten Menge um 3-5% resultiert. Dies ist der Fall für Stahl, Aluminium, Zink, Papier, Glas, Zement, Ammoniak, Chlor, Ethylen, Methanol, Kunststoffe, sowie Fleisch. Wenngleich es kaum Untersuchungen zu den Potenzialen einer gesteigerten Materialeffizienzpolitik gibt, so ist davon auszugehen, dass diese Annahmen eher konservativ sind und unter den verfügbaren Potenzialen liegen.

Die resultierende Entwicklung der Produktionsmenge im Klimaschutzszenario 90 ist in den folgenden beiden Tabellen dargestellt.

Tabelle 5-22 Entwicklung der industriellen Produktion im Klimaschutzszenario 90 (Teil 1)

Prozess/Produkt	Einheit	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Eisen und Stahl							
Sintern	kt	30.845	28.560	27.033	24.120	21.079	18.436
Oxygenstahl - Hochofen	kt	33.052	30.615	28.616	25.532	22.314	19.515
Elektrostahl - EAF	kt	13.324	13.215	17.539	18.696	18.736	19.910
Walzstahl	kt	38.974	36.827	39.927	38.260	35.510	34.105
Koksofen	kt	9.115	8.171	7.637	6.814	5.955	5.209
Schmelzreduktion	kt	-	-	-	-	-	-
Direkte Reduktion	kt	455	487	586	578	571	563
Nicht-Eisen Metalle							
Aluminium primär	kt	644	403	526	443	375	323
Aluminium sekundär	kt	572	611	840	924	1.008	1.101
Aluminium Strangpressen	kt		570	613	671	736	806
Aluminium Gießereien	kt	646	810	864	947	1.037	1.136
Aluminium Walzen	kt		1.883	2.056	2.253	2.468	2.704
Kupfer primär	kt	310	402	341	333	324	315
Kupfer sekundär	kt	399	302	310	319	327	336
Kupferbearbeitung	kt	1.999	1.732	1.858	1.858	1.858	1.858
Primärzink	kt	261	238	229	220	212	203
Sekundärzink	kt	67	89	93	98	103	107
Papiergewerbe							
Papier	kt	18.182	22.509	24.727	24.928	24.648	24.964
Zellstoff - Verfahren	kt	873	1.481	1.290	973	717	497
Holzstoff - Verfahren	kt	1.342	1.200	1.425	1.082	808	574
Altpapierstoff	kt	13.677	15.399	17.368	18.191	18.494	19.204
Glas							
Behälterglas	kt	-	3.991	4.543	4.698	4.782	4.914
Flachglas	kt	-	2.183	1.894	1.971	2.019	2.089
Glasfasern	kt	-	808	1.051	1.086	1.106	1.137
Übriges Glas	kt	-	345	497	514	523	538
Keramik							
Haushalts- und Sanitärkeramik	kt	-	107	122	123	123	123
Technische Keramik	kt	-	225	242	242	242	243
Fliesen, Platten, Feuerfestkeramik	kt	-	2.077	2.298	2.378	2.405	2.472
Nicht metallische Mineralstoffe							
Klinker Brennen (trocken)	kt	24.303	21.236	22.611	19.951	17.259	15.255
Klinker Brennen (halbtrocken)	kt	1.978	1.729	-	-	-	-
Klinker Brennen (feucht)	kt	-	-	-	-	-	-
Aufbereitung von Kalkstein	kt	-	24.311	23.567	21.915	20.016	18.715
Gips	kt	-	953	953	953	953	953
Zementmahlen	kt	35.414	29.894	32.181	31.259	30.218	29.328
Kalkmahlen	kt	-	5.253	5.184	5.119	5.053	4.988
Ziegel	kt	18.307	10.642	12.956	12.746	12.367	11.941
Kalkbrennen	kt	7.382	6.339	7.000	7.000	7.000	7.000

Quelle: FORECAST-Industry, Fraunhofer ISI

Tabelle 5-23 Entwicklung der industriellen Produktion im Klimaschutzszenario 90 (Teil 2)

Prozess/Produkt	Einheit	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Chemie							
Adipinsäure	kt	-	598	456	552	668	808
Ammoniak	kt	3.221	3.128	3.407	3.363	3.349	3.362
Calciumcarbid	kt	-	207	190	190	190	190
Industrieruß	kt	346	684	684	684	684	684
Chlor, Diaphragma	kt	860	1.164	1.147	-	-	-
Chlor, Membran	kt	2.035	2.118	3.570	4.658	4.598	4.538
Chlor, Amalgan	kt	642	747	-	-	-	-
Ethylen	kt	-	5.063	5.233	5.696	6.199	6.746
Methanol	kt	1.922	1.622	2.000	1.974	1.949	1.924
Salpetersäure	kt	1.828	2.513	3.086	3.581	4.054	4.479
Sauerstoff	kt	-	6.934	8.082	8.910	9.824	10.830
Polycarbonat	kt	-	415	593	709	865	1.079
Polyethylen	kt	-	2.712	3.246	3.533	3.891	4.333
Polypropylen	kt	1.337	2.012	2.199	2.394	2.636	2.936
Polysulfone	kt	-	322	444	579	748	955
Soda	kt	1.422	1.454	1.454	1.454	1.454	1.454
TDI	kt	-	682	528	639	773	935
Titandioxid	1000 m³	-	443	483	533	587	647
Nahrungsmittel							
Zucker	kt	-	3.443	3.963	3.884	3.812	3.746
Molkerei	kt	-	12.966	14.298	14.015	13.754	13.515
Bierbrauen	kt	-	9.568	9.951	9.560	9.196	8.857
Fleischverarbeitung	kt	3.116	4.130	4.819	4.806	4.795	4.786
Backwaren	kt	-	4.628	4.504	4.459	4.420	4.387
Stärke	kt	-	1.213	1.885	1.866	1.850	1.836
Kunststoffverarbeitung							
Extrusion	kt	-	4.318	4.944	5.302	5.706	6.216
Spritzgießen	kt	-	2.174	2.489	2.669	2.873	3.129
Blaßformen	kt	-	948	1.085	1.164	1.253	1.365

Quelle: FORECAST-Industry, Fraunhofer ISI

5.3.1.2 Technologische Entwicklung und Energieeffizienz

Im Folgenden werden die Annahmen und das Vorgehen für die Modellierung der Prozess- sowie der Querschnittstechniken in den Bereichen Strom und Wärme beschrieben. Für alle beschriebenen Bereiche gilt, dass die Rechnungen auf der Ebene der einzelnen Wirtschaftszweige der Industrie durchgeführt wurden und so Verschiebungen zwischen den Sektoren Berücksichtigung finden. Während im Kapitel 3.2.2 bereits die Methodik der Berechnung sowie das genutzte Modell FORECAST-Industry beschrieben ist, wird hier vorwiegend auf die unterschiedlichen Annahmen in den Szenarien eingegangen.

Prozesstechniken

Die Datengrundlage für den Energiebedarf und weitere Eigenschaften der 64 im Modell berücksichtigten Industrieprozesse und den knapp 200 ihnen zugeordneten Einsparop-

tionen basieren auf einer Untersuchung der Einsparpotenziale in der energieintensiven Industrie (Fleiter, Schlomann, Eichhammer 2013).

Die Diffusionsgeschwindigkeit der Einsparoptionen hängt, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben von ihrer Amortisationszeit sowie den Erwartungen der Unternehmen bezüglich der maximal zulässigen Amortisationszeit ab. Während viele Unternehmen nur in Einsparoptionen mit einer Amortisationszeit von maximal 2-3 Jahren investieren, so ist die Spannweite recht groß und hängt von verschiedenen Faktoren ab. Um diese Beobachtung im Modell abzubilden, wird für die Investition in einzelne Einsparoptionen in einem Jahr eine Verteilung abhängig von der Amortisationszeit hinterlegt. Diese ist in Abbildung 5-13 als kumulative Verteilung dargestellt. Während ihre Steigung vorwiegend monetäre Hemmnisse der Investition abbildet, so bildet die Differenz des Startwertes (bei Amortisationszeit = 0) nicht-monetäre Hemmnisse, wie z.B. mangelnde Informationen ab. Entsprechend werden im AMS (2012) nur noch 50% der Einsparoptionen mit einer Amortisationszeit von einem Jahr umgesetzt, während es im KS 80 77% und im KS 90 88% sind. Im KS 90 werden selbst bei einer Amortisationszeit von 11 Jahren noch 50% der Einsparoptionen umgesetzt. Folglich spiegeln die Annahmen im KS 90, aber auch im KS 80, eine Überwindung der meisten Hemmnisse wider, wozu ein umfangreicher Mix an verschiedensten Politikinstrumenten notwendig ist.

Zusätzlich zu diesen Annahmen zur Erwartung der Unternehmen an die Amortisationszeit von Effizienzmaßnahmen verkürzen höhere EUA-Preise im KS90 und KS80 die reale Amortisationsdauer und beschleunigen über die verbesserte Wirtschaftlichkeit die Diffusion der Maßnahmen.

Abbildung 5-13 Kumulative Verteilung der maximal zulässigen Amortisationszeit für Investitionen in Energieeinsparoptionen je Szenario

Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer ISI

Über die separat modellierten Prozesse der energieintensiven Industrie (und den Raumwärmebedarf) hinaus entfallen noch etwa weitere 15% des Brennstoffbedarfs auf eine Vielzahl an kleineren Prozessen. Diese befinden sich vorwiegend in den Wirtschaftszweigen Sonstige Chemie, Sonstige, Ernährung und Tabak, Fahrzeugbau und Metallbearbeitung. Diese Prozesse werden zu einem generischen Prozess zusammengefasst und es wird angenommen, dass hier eine ähnliche Einsparung erreicht werden kann, wie in den separat modellierten Prozessen im jeweiligen Szenario.

Strom Querschnittstechniken

Um die Einsparpotenziale der Querschnittstechniken auf Seiten der Stromnachfrage zu modellieren muss zunächst ermittelt werden, wie hoch der Stromverbrauch der einzelnen Anwendungen ist. Diese wird im Modell FORECAST-Industry über Anteile am Stromverbrauch der Sektoren berechnet, da eine reine Bottom-up-Berechnung aufgrund der sehr heterogenen Anwendungen in diesem Umfang nicht praktikabel wäre. Die entsprechenden Annahmen sind in Tabelle 5-24 zusammen gefasst und basieren auf den im Projekt „Datenbasis Energieeffizienz“ erstellten Anwendungsbilanzen (Prognos, TU München und Fraunhofer ISI 2011).

Die Einsparpotenziale bei den Strom-Querschnittstechniken werden entsprechend der im Kapitel 3.2.2 beschriebenen Methodik modelliert.

Tabelle 5-24 Anteile der Querschnittstechniken am Stromverbrauch der Wirtschaftszweige der Industrie im Jahr 2010 [%]

Wirtschaftszweig	Ventilatoren	Druckluft	Kälte	Pumpen	Übrige Motoren	Beleuchtung	Summe
Gewinnung von Steinen und Erden, sonst. Bergbau	10	6	2	30	49	2	100
Ernährung und Tabak	11	9	34	10	6	7	76
Papiergewerbe	18	8	4	23	45	1	99
Grundstoffchemie	11	2	5	22	30	1	70
Sonstige chemische Industrie	11	2	12	26	40	3	93
Gummi- u. Kunststoffwaren	5	15	8	9	48	5	91
Glas u. Keramik	10	17	4	4	59	4	97
Verarbeitung v. Steine u. Erden	10	17	3	4	62	3	98
Metallerzeugung	12	3	1	5	44	1	65
NE-Metalle, -gießereien	10	3	1	7	24	1	45
Metallbearbeitung	9	5	9	7	43	9	83
Maschinenbau	16	15	11	1	12	16	71
Fahrzeugbau	10	12	7	4	39	10	81
Sonstige Wirtschaftszweige	12	14	8	12	19	12	76
Gesamte Industrie	11	8	8	12	33	5	77

Quelle: Basierend auf Prognos, TU München und Fraunhofer ISI (2011)

Im Folgenden sind die Annahmen zur Modellierung der Querschnittstechniken im Bereich Wärmenachfrage und –Erzeugung beschrieben.

Raumwärme

Raumwärme machte im Jahr 2010 etwa 11% des Brennstoffbedarfs der Industrie aus. Somit gehört die Raumwärme zwar nicht zu den größten Bereichen, sie stellt jedoch

ein relativ homogenes Feld mit vergleichsweise hohen Einsparpotenzialen dar. Die derzeitige Datenlage erlaubt jedoch kaum detailliertere Angaben zum Raumwärmebedarf der Industrie zu tätigen. Einige Studien haben versucht, die Raumwärme anhand der Statistiken der Erwerbstätigen auf Büro- und Produktionsgebäude aufzuteilen (z.B. Prognos, TU München, Fraunhofer ISI 2011), jedoch ist die Belastbarkeit derartiger Ansätze kaum feststellbar, da jegliche empirische Grundlagen fehlen. Entsprechend findet die Modellierung von Raumwärme und Warmwasserbedarf im Industriesektor sehr vereinfacht statt und orientiert sich dabei an den Ergebnissen der weitaus detaillierteren Modellierung zum GHD-Sektor. Das Vorgehen ist dabei wie folgt:

1. Zunächst wird der Energiebedarf der Raumwärme anhand der Anteile aus Tabelle 5-25 berechnet.
2. Der Energiebedarf für Raumwärme wird anhand der Bruttowertschöpfung je Sektor bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben. Hierbei wird ein Entkopplungsfaktor von 0,9 unterstellt sowie zunächst keine Veränderung der Energieeffizienz (frozen efficiency).
3. Für jedes Szenario wird die Entwicklung des Raumwärme und Warmwasserbedarfs im GHD-Sektor als Effizienzindex von 2010 bis 2050 berechnet.
4. Über Multiplikation des Effizienzindexes mit dem frozen efficiency Brennstoffbedarf ergibt sich der Brennstoffbedarf für Raumwärme des jeweiligen Szenarios.

Wenngleich diesem Ansatz die Einschränkung zugrunde liegt, dass er die technischen Besonderheiten und Restriktionen der Raumwärmebereitstellung nur bedingt berücksichtigt, so bringt er doch einige Vorteile mit sich. Strukturelle Verschiebungen zwischen den Industriezweigen werden berücksichtigt und gleichzeitig wird eine mit den Gebäuden im GHD-Sektor kompatible Entwicklung unterstellt und damit ein zwischen den Sektoren konsistentes Szenario erzeugt. Eine detailliertere Modellierung ist erst möglich, wenn die empirische Datengrundlage verbessert wurde.

Tabelle 5-25 Anteil einzelner Anwendungen am Brennstoffbedarf der Industrie

Wirtschaftszweig	Mechanische Energie	Prozess-wärme	Raum-wärme	Warm-wasser
Ernährung und Tabak	1%	83%	14%	1%
Fahrzeugbau	1%	41%	53%	6%
Gewinnung von Steinen und Erden, sonst. Bergbau	1%	91%	7%	1%
Glas u. Keramik	1%	94%	4%	0%
Grundstoffchemie	1%	98%	1%	0%
Gummi- u. Kunststoffwaren	1%	57%	38%	4%
Maschinenbau	1%	29%	64%	7%
Metallbearbeitung	1%	61%	35%	4%
Metallerzeugung	0%	99%	0%	0%
NE-Metalle, -gießereien	1%	91%	7%	1%
Papiergewerbe	1%	96%	3%	0%
Sonstige chemische Industrie	1%	86%	12%	1%
Sonstige Wirtschaftszweige	1%	55%	41%	4%
Verarbeitung v. Steine u. Erden	0%	98%	2%	0%
Summe	**1%**	**87%**	**11%**	**1%**

Quelle: Anwendungsbilanzen der AG-Energiebilanzen

Dampferzeuger

Ähnlich der Raumwärme ist auch das Wissen zur Struktur und Effizienz industrieller Dampferzeuger und Dampfverteilnetze relativ gering. Umfangreiche Studien sind kaum verfügbar und die letzten Abschätzungen von Einsparpotenzialen liegen bereits 10 Jahre zurück (z.B. Schmid et al. 2003). Entsprechend ist das Vorgehen für die Modellierung ähnlich aggregiert wie für die Raumwärme. Folgende Schritte werden dafür durchgeführt:

1. Zunächst wird der Brennstoffbedarf der Dampferzeuger im Jahr 2010 anhand der von Prognos, TU München und Fraunhofer ISI (2011) erstellten Anwendungsbilanzen aufgeteilt. Hier wurde der Energiebedarf der Dampferzeuger als Restgröße berechnet, indem Niedertemperaturwärme unter 100° inkl. Raumwärme auf der einen Seite und Industrieöfen (>500°) auf der anderen Seite abgezogen wurden. Vom verbleibenden Energiebedarf wird ausgegangen, dass er in einer Form von Dampferzeuger erzeugt wird.
2. Dieser Energiebedarf im Jahr 2010 wird anhand der Bruttowertschöpfung bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben (frozen efficiency). Hierbei wird ein Entkopplungsfaktor von 0,9 unterstellt.
3. Laut Schmid et al. (2003) haben Dampferzeuger eine mittlere Lebensdauer von 20 Jahren und der Bestand weißt ein technisches Einsparpotenzial von etwa 16% auf. Es wird angenommen, dass dieses Potenzial bis spätestens 2050 zu 40% (AMS (2012)), 60% (KS 80) bzw. 100% (KS 90) erschlossen wird.
4. Über Multiplikation mit dem frozen efficiency Energiebedarf je Sektor ergibt sich so der resultierende Energiebedarf von Dampferzeugern bzw. das zugehörige Einsparpotenzial.

Abwärme und Wärmepumpen

Die industrielle Abwärmenutzung ist ein vielfältiges Feld mit den unterschiedlichsten Anwendungsmöglichkeiten. Abwärme kann zum Vorwärmen von Materialien des gleichen Prozesses genutzt werden oder als Wärmequelle für einen anderen Prozess des gleichen oder eines anderen Unternehmens. Abwärme kann in ein Fern- oder Nahwärmenetz eingespeist werden und kann über Wärmepumpen im Temperaturniveau angehoben werden, was die Nutzungsmöglichkeiten erhöht. Sie kann sogar in Kälte umgewandelt werden.

Für die Modellierung können nicht all diese vielfältigen Möglichkeiten genutzt werden. Stattdessen wird abgeschätzt, welche Menge an Abwärme über Wärmepumpen in den einzelnen Industriebranchen nutzbar ist. Mögliche räumliche Einschränkungen werden dabei nicht betrachtet.

Das technische Potenzial für die Nutzung von Wärmepumpen im Niedertemperaturbereich wurde von Wolf et al. (2012) berechnet und stellt für die Modellierung die Grundlage dar (siehe Tabelle 5-26).

Tabelle 5-26 Technisches Potenzial zur Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen nach Wirtschaftszweig und Temperaturniveau

Wirtschaftszweig	Endenergie [PJ]		
	< 80°C	< 100°C	< 140°C
Ernährung und Tabak	47	61	145
Fahrzeugbau	40	40	40
Grundstoffchemie	32	47	132
Maschinenbau	50	50	53
Papiergewerbe	22	145	145
Sonstige Wirtschaftszweige	72	72	86

Quelle: Basierend auf Wolf et al. (2012)

Je Szenario wurden unterschiedliche Annahmen zur Ausnutzung der technischen Potenziale getätigt. Im AMS (2012) werden bis 2050 5% der technischen Potenziale genutzt, während es im KS 80 15% und im KS 90 40% sind. Weiter wird davon ausgegangen, dass im AMS (2012) nur das Potenzial bis 80°C erschlossen wird, während im KS 80 Wärme bis 100°C und im KS 90 bis 140°C mittels Wärmepumpen bereitgestellt werden kann. Für den Stromverbrauch der Wärmepumpen wurde für das Jahr 2010 eine mittlere Jahresarbeitszahl von 3 angenommen, die bis zum Jahr 2050 abhängig von den Szenarien auf 3,3 (AMS (2012)), 3,4 (KS 80) bzw. 4 (KS 90) ansteigt. Entsprechend ist die von Wärmepumpen bereitgestellte Wärme im KS 90 zwar am höchsten, jedoch sorgen effizientere Wärmepumpen dafür, dass der Strombedarf weniger stark steigt.

Brennstoffwechsel

Der Brennstoffwechsel im Industriesektor ist zum einen eine wichtige CO_2-Vermeidungsoption, stellt zum anderen aber wegen der hohen Heterogenität der industriellen Prozesse eine große Herausforderung an die Modellierung. Diese wird noch verschärft durch die sehr geringe Verfügbarkeit empirischer Daten. Der für die Modellierung gewählte Ansatz ist so detailliert wie nötig um sektorale Besonderheiten bezüglich der Restriktionen und Möglichkeiten des Brennstoffwechsels zu berücksichtigen, geht jedoch nicht mehr ins Detail als es die verfügbare Datengrundlage erlauben würde.

Da die Modellierung des Brennstoffwechsels die Besonderheiten der einzelnen Wirtschaftszweige und ihre Verschiebungen berücksichtigen soll, mussten zunächst die Energiebilanzen des ZSE erweitert werden, da diese nicht nach Wirtschaftszweigen unterscheiden. Diese Aufteilung wurde daher von der AG-Energiebilanzen abgeleitet, wobei die Anteile der einzelnen Energieträger so angepasst wurden, dass sie in der Summe weiterhin konsistent mit dem ZSE Emissionsregisters sind.

Die Modellierung des Brennstoffwechsels setzt auf den Wachstumsraten der Anteile der einzelnen Energieträger je Wirtschaftszweig auf. Hierfür wird berücksichtigt:

- Die mittlere jährliche Wachstumsrate des Energieträgers im jeweiligen Wirtschaftszweig in den vergangenen 5 Jahren
- Die erwartete Entwicklung des Energieträgers in den jeweiligen Szenarien basierend auf der vergangenen Entwicklung
- Ober- und Untergrenzen von +3 bzw. -3% jährlicher Wachstumsrate
- Berücksichtigung des Emissionshandels in den jeweiligen Wirtschaftszweigen indem die Wachstumsrate von der CO_2-Intensität der Energieträger abhängt.

Unterschiede zwischen den Szenarien ergeben sich über eine höhere Gewichtung der CO_2-Intensität der Energieträger entsprechend der jeweiligen CO_2-Preise der Szenarien. Zusätzlich wurde im KS 90 angenommen, dass in den nicht-ETS Sektoren bzw. der nicht-energieintensiven Industrie eine Energie/CO_2 Steuer eingeführt wird, die ähnliche Anreize zum Brennstoffwechsel erzeugt wie der Emissionshandel.

5.3.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) fällt der Energiebedarf von 2020 bis 2050 kontinuierlich, was vorwiegend auf ein nur moderates Wirtschaftswachstum im Industriesektor und eine Stagnation der energieintensiven Branchen zurückzuführen ist. Hingegen ist von 2010 bis 2020 ein leichter Anstieg zu verzeichnen, der auf ein höheres Wachstum zurückzuführen ist. Bezüglich der Energieträger zeigen sich leichte Verschiebungen, die jedoch hauptsächlich bereits in der Vergangenheit zu beobachtende Trends fortsetzen. Die Bedeutung von Kohle, Heizöl, Erdgas und sonstigen Gasen (vorwiegend Gichtgas) nimmt weiter ab, während Erneuerbare Energien und die Nutzung von Abfällen leicht zulegen. Der Einsatz von Strom zeigt eine relativ stabile Entwicklung nimmt aber anteilig an Bedeutung zu. Diese Verschiebung zwischen den Brennstoffen ist zu einem Großteil durch strukturelle Verschiebungen und ein Wachstum dienstleistungsbasierter Industrien auf Kosten energieintensiver Industriezweige bedingt. Zusätzlich spielen auch Instrumente wie der Emissionshandel eine Rolle sowie der bereits in der Vergangenheit beobachtete Trend der einzelnen Energieträger. Selbst ohne besonders ambitionierte Politikinstrumente ist somit nicht von einem Anstieg des Energiebedarfs der Industrie auszugehen.

Tabelle 5-27 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern im AMS (2012), 2010 - 2050

Energieträger	**2010**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
			PJ		
Strom	787	839	805	787	790
Erdgas	565	584	561	529	505
Fern-und Nahwärme	339	373	379	378	378
Heizöl	128	111	89	71	58
Kohle	367	357	316	278	248
Sonstige Gase	166	144	118	99	85
Erneuerbare Energien	20	27	33	43	59
Abfall	29	39	47	53	60
Summe	2.403	2.474	2.350	2.240	2.183
Veränderung ggü. 2010		71	-53	-163	-220
prozentuale Veränderung ggü. 2010		3%	-2%	-7%	-9%

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-14 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern im AMS (2012), 2010 - 2050

Quelle: Eigene Darstellung

Bei Betrachtung des Brennstoffbedarfs der einzelnen Industriebranchen zeigt sich bei den größten Branchen ein gegenläufiger Trend. Während der Brennstoffbedarf der Metallerzeugung deutlich fällt (getrieben durch einen Wechsel von Oxygenstahl zu Elektrostahl), steigt der Brennstoffbedarf der chemischen Grundstoffindustrie weiter an. Beim Strombedarf zeigt sich auf Branchenebene eine eher kontinuierliche Entwicklung, die daraus folgt, dass sich Energieeffizienzfortschritt und Wachstum der Wertschöpfung und Produktion in etwa ausgleichen.

Abbildung 5-15 Entwicklung des Brennstoffbedarfs im AMS (2012) nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas)

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 5-28 Entwicklung des Brennstoffbedarfs im AMS (2012) nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) [PJ]

	2010	2020	2030	2040	2050
Ernährung und Tabak	110	109	101	92	85
Fahrzeugbau	69	73	66	59	51
Gewin. von Steinen und Erden	8	8	8	8	8
Glas u. Keramik	50	51	51	51	52
Grundstoffchemie	292	308	332	357	389
Gummi- u. Kunststoffwaren	36	38	35	32	30
Maschinenbau	41	43	38	33	27
Metallbearbeitung	48	53	52	48	44
Metallerzeugung	539	519	456	399	353
NE-Metalle, -gießereien	43	46	47	47	49
Papiergewerbe	118	119	115	108	105
Sonstige chemische Industrie	77	82	79	75	72
Sonstige Wirtschaftszweige	87	92	83	74	66
Verarbeitung v. Steine u. Erden	97	93	82	70	63
Summe	**1.616**	**1.635**	**1.544**	**1.452**	**1.393**

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 5-16 Entwicklung der Stromnachfrage im AMS (2012) nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas)

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 5-29 Entwicklung der Stromnachfrage im AMS (2012) nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) [TWh]

	2010	2020	2030	2040	2050
Ernährung und Tabak	17	17	16	15	14
Fahrzeugbau	18	20	19	19	19
Gewin. von Steinen und Erden	2	2	2	2	2
Glas u. Keramik	5	5	5	5	5
GrundStoffchemie	43	45	45	46	47
Gummi- u. Kunststoffwaren	14	14	13	13	13
Maschinenbau	11	12	12	12	12
Metallbearbeitung	14	16	17	17	17
Metallerzeugung	21	22	20	19	18
NE-Metalle, -gießereien	17	20	19	18	17
Papiergewerbe	21	20	18	17	16
Sonstige chemische Industrie	7	8	8	8	8
Sonstige Wirtschaftszweige	22	25	24	24	24
Verarbeitung v. Steine u. Erden	7	7	7	6	6
Summe	**219**	**233**	**224**	**219**	**220**

Quelle: Eigene Darstellung

5.3.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) zeigt das Klimaschutzszenario 80 eine deutlich ambitioniertere Dekarbonisierung. Diese spiegelt sich zum einen in einem knapp 300 PJ niedrigeren Energiebedarf im Jahr 2050 wieder und zum anderen im deutlich höheren Anteil von CO_2-armen Energieträgern. Dieser Brennstoffwechsel ist besonders deutlich in den energieintensiven Branchen zu verzeichnen. Kohle wird 2050 nur noch für schwer substituierbare Prozesse z.B. in der Eisen- und Stahlindustrie eingesetzt. Während die höheren Preise für CO_2-Zertifikate (EUAs) den Brennstoffwechsel im EU EHS-Sektor beschleunigen, so wird für die nicht am Emissionshandel teilnehmenden Branchen davon ausgegangen, dass (monetäre) Anreize zum Brennstoffwechsel geschaffen werden, die ähnlich hoch wie die CO_2-Zertifikate-Preise liegen. Diese zeigen ihre Wirkung entsprechend der Branchenstruktur vorwiegend im Bereich der Niedertemperaturwärme.

Der Strombedarf sinkt sogar um mehr als 30 TWh von 2010 bis 2050, was auf eine umfangreiche und ambitionierte Erschließung der Einsparpotenziale im Bereich der Querschnittstechniken wie Elektromotorsysteme zurückzuführen ist. Im Bereich des eher (Niedertemperatur-) Wärmebedarfs der nicht-energieintensiven Industrie sind noch weitere Einsparpotenziale zu erschließen.

Tabelle 5-30 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern im KS 80, 2010–2050

Energieträger	**2010**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
			PJ		
Strom	787	775	747	694	679
Erdgas	565	539	449	357	288
Fern-und Nahwärme	339	402	400	369	335
Heizöl	128	69	40	25	18
Kohle	367	351	304	267	234
Sonstige Gase	166	124	93	73	59
Erneuerbare Energien	20	41	82	142	210
Abfall	29	51	69	78	87
Summe	2.403	2.352	2.183	2.006	1.910
Veränderung ggü. 2010		-51	-220	-397	-493
prozentuale Veränderung ggü. 2010		-2%	-9%	-17%	-21%

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-17 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern im KS 80, 2010–2050

Quelle: Eigene Darstellung

5.3.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Im Klimaschutzszenario 90 sinkt der Energiebedarf von 2010 bis 2050 um 34%. Im Jahr 2050 sind die vier zentralen Energieträger Strom, Erdgas, Fernwärme, Erneuerbare Energien und Kohle. Letztere wird für die Eisenreduktion bei der Herstellung von Oxygenstahl benötigt. Sowohl Strombedarf als auch Brennstoffbedarf befinden sich 2050 auf einem sehr niedrigen Level, der eine konsequente Umsetzung von Effizienzmaßnahmen verlangt, die weit über das heutige Niveau hinausgehen. Während sich der Strombedarf im Vergleich zum Klimaschutzszenario 80 nicht deutlich geändert hat, so liegt der Bedarf anderer Brennstoffe nochmal deutlich niedriger. Verantwortlich hierfür sind zum einen Steigerungen im Bereich der Materialeffizienz, die zu einem niedrigeren Produktionsniveau und Prozessverschiebungen führen. Weiterhin werden im Bereich Abwärmenutzung auch Maßnahmen umgesetzt, die eine deutlich längere Amortisationszeit haben, als üblicherweise von Unternehmen gefordert (teilweise deutlich über 5 Jahre).

Tabelle 5-31 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern im KS 90, 2010 - 2050

Energieträger	**2010**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
			PJ		
Strom	787	763	736	682	670
Erdgas	565	501	392	294	225
Fern-und Nahwärme	339	374	343	286	232
Heizöl	128	64	34	20	13
Kohle	367	334	272	225	186
Sonstige Gase	166	118	83	62	47
Erneuerbare Energien	20	38	69	113	158
Abfall	29	46	56	57	56
Summe	2.403	2.238	1.985	1.738	1.587
Veränderung ggü. 2010		-165	-418	-665	-816
prozentuale Veränderung ggü. 2010		-7%	-17%	-28%	-34%

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-18 Endenergiebedarf im Sektor Industrie nach Energieträgern im KS 90, 2010 - 2050

Quelle: Eigene Darstellung

Auf Ebene der einzelnen Industriebranchen zeigt sich ein deutlicher Rückgang bei der Metallerzeugung (Wechsel von Oxygenstahl zu Elektrostahl), aber im Gegensatz zum AMS (2012) fällt im KS 90 auch der Brennstoffbedarf der Branchen deutlich, die vorwiegend Niedertemperaturwärme nachfragen (Ernährung, Papier, Teile der Chemie). Ein zentraler Grund hierfür ist die verstärkte Nutzung von Abwärme in Kombination mit Wärmepumpen. Entsprechend wirkt sich das steigernd auf den Strombedarf der entsprechenden Branchen aus.

Abbildung 5-19 Entwicklung des Brennstoffbedarfs im KS 90 nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas)

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 5-32 Entwicklung des Brennstoffbedarfs im KS 90 nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) [PJ]

	2010	2020	2030	2040	2050
Ernährung und Tabak	110	90	66	46	32
Fahrzeugbau	69	67	53	39	27
Gewin. von Steinen und Erden	8	8	7	6	5
Glas u. Keramik	50	48	44	41	42
Grundstoffchemie	292	279	281	283	289
Gummi- u. Kunststoffwaren	36	36	31	26	22
Maschinenbau	41	37	27	17	9
Metallbearbeitung	48	50	45	37	30
Metallerzeugung	539	488	392	321	266
NE-Metalle, -gießereien	43	43	41	41	41
Papiergewerbe	118	94	71	50	36
Sonstige chemische Industrie	77	77	67	59	52
Sonstige Wirtschaftszweige	87	80	61	44	30
Verarbeitung v. Steine u. Erden	97	81	63	46	36
Summe	**1.616**	**1.475**	**1.249**	**1.057**	**917**

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 5-20 Entwicklung der Stromnachfrage im KS 90 nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas)

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 5-33 Entwicklung der Stromnachfrage im KS 90 nach Industriebranchen (vor Abgleich CCS, KWK-Wärme und Power-to-Gas) [TWh]

	2010	2020	2030	2040	2050
Ernährung und Tabak	17	16	16	15	14
Fahrzeugbau	18	18	18	17	16
Gewin. von Steinen und Erden	2	2	2	2	2
Glas u. Keramik	5	4	4	4	4
Grundstoffchemie	43	42	42	42	43
Gummi- u. Kunststoffwaren	14	11	10	8	8
Maschinenbau	11	11	11	11	11
Metallbearbeitung	14	15	15	14	14
Metallerzeugung	21	20	18	15	15
NE-Metalle, -gießereien	17	18	17	15	14
Papiergewerbe	21	18	16	14	13
Sonstige chemische Industrie	7	7	7	7	7
Sonstige Wirtschaftszweige	22	23	23	22	22
Verarbeitung v. Steine u. Erden	7	6	6	5	4
Summe	**219**	**212**	**204**	**189**	**186**

Quelle: Eigene Darstellung

5.3.5 Vergleich der Szenarien

In der folgenden Tabelle ist der resultierende Energiebedarf der Industrie im Vergleich über die Szenarien dargestellt. Der Endenergiebedarf sinkt in allen Szenarien, was im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) hauptsächlich auf einen strukturellen Wandel bzw. auf eine Stagnation der energieintensiven Branchen zurückzuführen ist. Im Klimaschutzszenario 80 kommen erhebliche Energieeffizienzgewinne hinzu - besonders im Bereich der elektrischen Motorsysteme. Im Klimaschutzszenario 90 werden besonders im Bereich der (Niedertemperatur-) Wärmenachfrage noch zusätzliche Effizienzpotenziale erschlossen.

Tabelle 5-34 Übersicht Endenergiebedarf im Sektor Industrie je Szenario, 2010 - 2050

Energieträger	Szenario	2010	2020	2030	2040	2050
		PJ				
Brennstoffe						
Energiebedarf	AMS	1.616	1.635	1.544	1.452	1.393
	KS 80	1.616	1.580	1.441	1.317	1.235
	KS 90	1.616	1.475	1.249	1.057	917
Prozentuale Minderung gegenüber 2010	AMS		1%	-4%	-10%	-14%
	KS 80		-2%	-11%	-18%	-24%
	KS 90		-9%	-23%	-35%	-43%
Strom						
Energiebedarf	AMS	787	839	805	787	790
	KS 80	787	775	747	694	679
	KS 90	787	763	736	682	670
Prozentuale Minderung gegenüber 2010	AMS		7%	2%	0%	0%
	KS 80		-2%	-5%	-12%	-14%
	KS 90		-3%	-7%	-13%	-15%
Prozentuale Minderung gegenüber 2008	AMS		0%	-4%	-6%	-6%
	KS 80		-7%	-11%	-17%	-19%
	KS 90		-9%	-12%	-19%	-20%
Endenergie gesamt						
Energiebedarf	AMS	2.403	2.474	2.350	2.240	2.183
	KS 80	2.403	2.355	2.188	2.011	1.914
	KS 90	2.403	2.238	1.985	1.738	1.587
Absolute Minderung gegenüber 2010	AMS		71	-53	-163	-220
	KS 80		-48	-215	-392	-489
	KS 90		-165	-418	-665	-816
Prozentuale Minderung gegenüber 2010	AMS		3%	-2%	-7%	-9%
	KS 80		-2%	-9%	-16%	-20%
	KS 90		-7%	-17%	-28%	-34%

Quelle: Eigene Berechnungen

Weiterhin wird deutlich, dass in allen Szenarien die relativen Einsparungen im Bereich der Brennstoffe (vorwiegend zur Wärmebereitstellung) deutlich höher sind als beim Strombedarf – obwohl bereits im Klimaschutzszenario 80 die hohen Einsparpotenziale bei elektrischen Motorsystemen größtenteils ausgeschöpft sind. Mehrere Gründe sind hierfür verantwortlich. Zum einen ein fortgesetzter struktureller Wandel, da das Wachstum nicht in den energieintensiven (vorwiegend Wärme benötigenden) Industrien stattfindet. Zum anderen wurden im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 die hohen Einsparpotenziale im Niedertemperaturwärmebereich weitgehend ausgeschöpft und durch den Einsatz von Wärmepumpen hat sogar eine Verschiebung von

anderen Brennstoffen zu Strom stattgefunden. Hierdurch ergibt sich bis 2050 ein Strom-Mehrverbrauch von etwa 12 (KS 90) bzw. 4 (KS 80) TWh, der im Klimaschutzszenario 90 etwa 6% des Strombedarfs im Jahr 2050 ausmacht. Als Resultat all dieser Trends gewinnt Strom als Energieträger damit langfristig an Bedeutung, obwohl er in zwei Szenarien absolut sinkt.

Abbildung 5-21 Endenergiebedarf im Sektor Industrie je Szenario, 2010 - 2050

Quelle: Eigene Darstellung

Der Beitrag der einzelnen Technologiefelder zu den erzielten Brennstoffeinsparungen je Szenario ist in Abbildung 5-22 dargestellt. Im Klimaschutzszenario 80 ist ein Großteil der Einsparungen bis 2050 auf Prozesstechnik, Dampferzeuger und Abwärmenutzung/Wärmepumpen zurück zu führen. Raumwärme und Warmwasser spielen nur eine geringe Rolle, da im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bereits ein Großteil der Einsparpotenziale ausgeschöpft wurde. Im Klimaschutzszenario 90 kommen besonders in den Bereichen Abwärmenutzung/Wärmepumpen, Prozesstechnik sowie Materialeffizienz deutliche Einsparpotenziale hinzu. Bei Wärmepumpen können durch technische Verbesserungen im Klimaschutzszenario 90 Temperaturen bis 140°C erreicht werden und dadurch neue Anwendungsbereiche erschlossen werden. Bei Einsparoptionen im Bereich der Prozesse werden im Klimaschutzszenario 90 auch Amortisationszeiten über 10 Jahre akzeptiert und neue Verfahren berücksichtigt, die sich bisher noch in der Entwicklung befinden (z.B. CO_2-arme Zementherstellung, Endabmessungsnahes Stahlgießen, Sauerstoffverzehrkathoden bei der Chlorherstellung, innovative Papiertrocknungsverfahren, Magnetheizer beim Aluminiumverarbeiten). Materialeffizienz fasst Effekte zusammen, die zu einem leichten Rückgang (<=5%) der

Produktion von energieintensiven Grundstoffen führen sowie eine Verschiebung hin zu Sekundärprozessen (Papier, Stahl, Aluminium, Kupfer) und Ersatzstoffen (Ersatz für Klinker bei der Zementherstellung) führen. Insgesamt ist die erzielte Reduktion des Energiebedarfs im Klimaschutzszenario 90 als sehr ambitioniert einzustufen und erfordert umfangreiche Weichenstellungen der Politik und eine dynamische Entwicklung der notwendigen technologischen Innovationen, die sich aufgrund der sehr langen Lebensdauer des Anlagenbestandes nur langsam verbreiten. Es wurde in keinem Szenario von einem vorzeitigen Austausch von Geräten und Anlagen ausgegangen. Dieser würde die Kosten der Energieeinsparungen erheblich erhöhen. Wenn keine bisher unbekannten technologischen Durchbrüche erzielt werden, ist der Brennstoffbedarf im Klimaschutzszenario 90 an der unteren Grenze angelangt.

Abbildung 5-22 Beitrag der einzelnen Technologiefelder zu den erzielten Brennstoffeinsparungen je Szenario im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)[39]

Quelle: Eigene Darstellung

[39] Gesamthöhe der Balken entspricht dem Brennstoffbedarf im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012).

Tabelle 5-35 Beitrag der einzelnen Technologiefelder zu den erzielten Brennstoffeinsparungen je Szenario im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Technologiefeld	2010	2020		2030		2040		2050	
		KS 80	KS 90	KS 80	KS 90	KS 80	KS 90	KS 80	KS 90
Energieverbrauch AMS	1.616	1.635	1.635	1.544	1.544	1.452	1.452	1.393	1.393
Verbleibender Verbrauch KS 80 bzw. KS 90	1.616	1.577	1.475	1.436	1.249	1.312	1.057	1.231	917
Einsparung Prozesse (KS 90 inkl. Materialeffizienz)	-	37	89	63	155	74	193	74	214
Einsparung Raumwärme und Warmwasser	-	(0)	2	3	11	7	25	11	40
Einsparung Dampferzeuger und -Verteilnetz	-	10	14	20	30	30	45	41	61
Einsparung Abwärmenutzung und Wärmepumpen	-	12	55	22	99	30	132	36	160

Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 5-23 wird ersichtlich, wie sich der Energiebedarf auf die einzelnen Energieträger verteilt. Demnach geht in allen Szenarien die relative und absolute Bedeutung der sehr kohlenstoffreichen Energieträger wie Heizöl und Kohle zurück. Besonders im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 nehmen Abfälle und Erneuerbare Energien stark an Bedeutung zu. Jedoch ist im Klimaschutzszenario 90, bedingt durch die zusätzlichen Energieeinsparungen und den Einsatz von Wärmepumpen im Niedertemperaturbereich, der Anteil der Erneuerbaren Energien wieder etwas niedriger als im Klimaschutzszenario 80. Entsprechend gewinnt Strom an Bedeutung, was neben dem Einsatz von Wärmepumpen auch auf die höheren Energieeinsparungen im Bereich der anderen Brennstoffe zurückzuführen ist. Im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nimmt auch die Bedeutung von Erdgas sowohl im Klimaschutzszenario 80 als auch im Klimaschutzszenario 90 stark ab. Einsatz von Kohle findet im Klimaschutzszenario 80 und im Klimaschutzszenario 90 fast ausschließlich in der Stahlherstellung statt.

Abbildung 5-23 Vergleich des Energiebedarfs je Energieträger und Szenario

Quelle: Eigene Darstellung

Bei Betrachtung der Veränderung des Brennstoffbedarfs je Wirtschaftszweig wird deutlich, wie groß in allen Szenarien der Anteil der Metallerzeugung an der gesamten Veränderung ist (siehe Abbildung 5-24). Dieser Rückgang des Brennstoffbedarfs ist jedoch nur zu einem kleinen Teil auf effizientere Herstellungsverfahren zurückzuführen, sondern zum Großteil auf eine Verschiebung von Oxygenstahl hin zu Elektrostahl sowie eine insgesamt leicht rückläufige Stahlproduktion. Im Klimaschutzszenario 80 kommen verstärkt auch Effizienzgewinne hinzu, wie durch das Endabmessungsnahe Gießen und im Klimaschutzszenario 90 werden nochmal weitere Einsparungen durch Materialeffizienzverbesserungen und einen höheren Recyclinganteil erreicht. Abbildung 5-25 zeigt den Beitrag der einzelnen Prozesse der Metallerzeugung zur Veränderung des Brennstoffbedarfs des Sektors.

Abbildung 5-24 Veränderung des Brennstoffbedarfs je Wirtschaftszweig im Vergleich zum Jahr 2010

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 5-25 Veränderung des Brennstoffbedarfs je Prozess in der Branche Metallerzeugung im Vergleich zum Jahr 2010

Quelle: Eigene Darstellung

Im Folgenden ist die Veränderung des Strombedarfs je Wirtschaftszweig dargestellt. Die Beiträge der einzelnen Branchen sind hier deutlich gleichmäßiger aufgeteilt als dies bei der Brennstoffnachfrage der Fall ist, was auch der gleichmäßigeren Verteilung der Stromnachfrage auf die Branchen entspricht.

Abbildung 5-26 Veränderung des Strombedarfs je Wirtschaftszweig im Vergleich zum Jahr 2010

Quelle: Eigene Darstellung

Im Bereich der Stromnachfrage spielen die Querschnittstechniken (besonders die elektrischen Motorsysteme) eine besondere Rolle. Die Veränderung des Strombedarfs dieser Techniken ist in Abbildung 5-27 dargestellt. Auch hier ist zu beachten, dass es sich bei der Veränderung nicht nur um reine Energieeinsparung handelt, sondern diese auch die wirtschaftliche Entwicklung der einzelnen Branchen berücksichtigt. Dennoch zeigt gerade der große Unterschied zwischen Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) und Klimaschutzszenario 80, wie hoch die Einsparpotenziale in diesem Bereich sind. Die zusätzlichen Einsparungen im Klimaschutzszenario 90 sind eher moderat und zeigen auch, dass bereits im Klimaschutzszenario 80 ein Großteil der verfügbaren Einsparpotenziale ausgeschöpft wurde.

Abbildung 5-27 Veränderung des Strombedarfs je Querschnittstechnik im Vergleich zum Jahr 2010

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 5-36 zeigt die Emissionsentwicklungen für CO_2, CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick.

Die Emissionen der Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O gehen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) [AMS (2012)] in der Periode 2005 bis 2050 von 69 Mio. t CO_2-Äqu. auf 51 Mio. t CO_2-Äqu., also um insgesamt etwa 18 Mio. t CO_2-Äqu. zurück. Im Klimaschutzszenario 80 (KS 80) liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 21 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 48 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Im Klimaschutzszenario 90 (KS 90) sinken die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 54 Mio. t CO_2-Äqu. auf 15 Mio. t CO_2-Äqu.

Für die Periode 2005 bis 2020 ergibt sich damit im AMS (2012) eine Emissionsminderung von 3 % und für den Zeitraum von 2005 bis 2050 von 26 %. Die entsprechenden Vergleichswerte für das KS 80 belaufen sich auf 17 % bzw. 69 % und für das KS 90 auf 16 % bzw. 78 %.

Bezogen auf die Ausgangswerte des Jahres 1990 betragen die entsprechenden Reduktionsraten im AMS (2012), KS 80 und KS 90 53%, 80% bzw. 86%.

Tabelle 5-36 Emissionsentwicklungen für den Industriesektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CO_2-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	107.367	68.974	68.632				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				67.202	60.777	54.948	50.809
Klimaschutzszenario 80				57.013	45.142	31.110	21.200
Klimaschutzszenario 90				58.158	45.319	34.457	15.072
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	184	87	88				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				92	83	75	69
Klimaschutzszenario 80				92	69	43	24
Klimaschutzszenario 90				86	58	34	16
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	796	382	392				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				387	350	319	301
Klimaschutzszenario 80				346	291	233	198
Klimaschutzszenario 90				337	263	206	130
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	108.348	69.442	69.113				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				67.681	61.209	55.341	51.178
Klimaschutzszenario 80				57.451	45.503	31.385	21.422
Klimaschutzszenario 90				58.580	45.640	34.698	15.218
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-37,5	-43,5	-48,9	-52,8
Klimaschutzszenario 80				-47,0	-58,0	-71,0	-80,2
Klimaschutzszenario 90				-45,9	-57,9	-68,0	-86,0
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-2,5	-11,9	-20,3	-26,3
Klimaschutzszenario 80				-17,3	-34,5	-54,8	-69,2
Klimaschutzszenario 90				-15,6	-34,3	-50,0	-78,1

Anmerkungen: nur energiebedingte Emissionen in der Abgrenzung des NIR, ohne Brennstoffeinsatz in den Industriekraftwerken des Verarbeitenden Gewerbes

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

5.4 GHD – Geräte und Prozesse

Im Folgenden werden die Annahmen und Simulationsergebnisse für den Energiebedarf des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistung, der nicht zur Bereitstellung von Wärme und Kälte in Gebäuden (siehe Abschnitt 5.1) verwendet wird, ausgewiesen.

5.4.1 Annahmen und Parameter

Wie im Abschnitt 3.2.3 beschrieben, wird der Strombedarf für Geräte und Prozesse im Sektor GHD mit dem Modell FORECAST-Tertiary berechnet. Im Modell wird der Strombedarf bottom-up anhand von spezifischen Kennwerten (z.B. installierte Leistung) und Aktivitätsgrößen (z.B. Anzahl der Beschäftigten je Wirtschaftszweig) berechnet. Während eine vollständige Darstellung der Kennwerte den Umfang dieses Berich-

tes übersteigen würde, soll anhand von Tabelle 5-37 das aggregierte Resultat dieses Bottom-up-Mengengerüsts gezeigt werden. Die Tabelle zeigt den Anteil der einzelnen Anwendungen am Stromverbrauch der Wirtschaftszweige. Die Modellierung der Einsparpotenziale findet schließlich auf Ebene der einzelnen Anwendungen und Wirtschaftszweige statt.

Die Anteile der Anwendungen sind mit verfügbaren empirischen Erhebungen abgeglichen (siehe z.B. Schlomann et al. 2009). Zwar konnte aufgrund der unterschiedlichen Aggregierung und der nicht erhobenen, aber für die Modellierung benötigten, Kennwerte kein vollständiger Angleich vorgenommen werden, jedoch sind die Modellannahmen generell im Einklang mit den erhobenen Daten.

Wenngleich diese Werte als (empirisch abgeglichene) Annahmen zu betrachten sind, so lassen sich doch typische Muster erkennen. So hat der Sektor Handel einen sehr hohen Bedarf an Beleuchtung und Kühlung, im Gastgewerbe spielt Kochen eine große Rolle, in den Büros des Finanz- und Versicherungssektors sind IKT-Anwendungen vergleichsweise bedeutend und in Krankenhäusern hat Waschen einen vergleichsweise hohen Anteil.

Tabelle 5-37 Anteile der Anwendungen am Strombedarf je Wirtschaftszweig des Sektors GHD im Jahr 2010

Wirtschaftszweig	**Innenraum-beleuchtung**	**Straßen-beleuchtung**	**IKT Büro**	**Rechenzentren und Server**	**Lüftung und Klimatisierung**	**Aufzüge**	**Weitere Gebäudestrom-verbraucher**	**Kochen (gewerblich)**	**Waschen (gewerblich)**	**Kühl- und Gefriergeräte**	**Summe**
Handel; Reparatur von Fahrzeugen	14,2	0,0	0,4	1,4	2,0	0,1	7,4	0,0	0,0	11,3	**36,8**
Gastgewerbe	2,1	0,0	0,1	0,3	0,4	0,0	1,6	2,8	0,9	2,4	**10,7**
Verkehr und Lagerei, IuK	2,2	4,4	0,3	0,7	0,2	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	**8,7**
Finanz- und Versicherungsdienstl.	1,1	0,0	0,3	0,4	0,4	0,3	0,5	0,0	0,0	0,2	**3,2**
Gesundheits-und Sozialwesen	1,8	0,0	0,3	0,8	0,1	0,9	0,5	3,0	1,2	0,3	**8,9**
Erziehung und Unterricht	2,5	0,0	0,4	0,6	0,0	0,0	0,5	1,9	0,0	0,3	**6,2**
Öff. Verwaltung, Verteidigung;	3,6	0,0	0,6	0,9	0,3	0,6	0,3	0,0	0,0	0,5	**6,8**
Sonstige Wirtschaftszweige	9,2	0,0	1,1	1,5	0,5	0,0	4,8	0,0	0,0	0,5	**17,6**
Summe	**36,7**	**4,4**	**3,5**	**6,4**	**4,0**	**2,0**	**16,0**	**7,7**	**2,1**	**16,0**	**98,8**

Quelle: Fraunhofer ISI, TEP Energy / FORECAST

Abbildung 5-28 Strombedarf im Sektor GHD nach Wirtschaftszweig und Energieanwendungen für das Jahr 2010

Quelle: Fraunhofer ISI, TEP Energy / FORECAST

Die drei berechneten Szenarien unterscheiden sich vorwiegend hinsichtlich der für die Wirtschaftlichkeitsrechnung der Investitionsentscheidung angenommenen impliziten Diskontierungsrate. Hier liegt das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bei 120%, das Klimaschutzszenario 80 bei 20% und das Klimaschutzszenario 90 5%. Entsprechend ist besonders vom Aktuelle-Maßnahmen- zum Klimaschutzszenario 80 eine große Lücke und damit eine völlig andere Szenariophilosophie zu verzeichnen. Während im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) noch etwaige Hemmnisse sehr ausgeprägt sind, sind diese im Klimaschutzszenario 90 weitestgehend überwunden. Die relativ hohen hinterlegten impliziten Diskontierungsraten sind nicht mit dem klassischen Zinsfuß bei Investitionsentscheidungen zu verwechseln. Die impliziten Diskontierungsraten sind typischerweise deutlich höher, da sie auch Hemmnisse, wie z.B. fehlende Informationen über die Verfügbarkeit von Effizienzmaßnahmen, berücksichtigen. D.h. sie beschreiben nicht die Bewertung einzelner bekannter Investitionsprojekte, sondern beschreiben auch die (nicht-) Investition in nicht bekannte Projekte und Möglichkeiten, die jedoch wirtschaftlich wären.

Weiterhin wurde im Klimaschutzszenario 80 und im Klimaschutzszenario 90 eine (in beiden Szenarien gleiche) geringfügige Änderung von Kenngrößen vorgenommen, die das Nutzerverhalten von Energiedienstleistungen beschreiben. Diese umfasst:

- Ein langsamerer Anstieg der installierten Lichtleistung je m² Gebäudefläche. Diese steigt in KS 80 und KS 90 um 0,4–0,8% pro Jahr und im AMS (2012) um 1,2%.
- Eine geringere Zunahme der Kühlregale in Supermärkten von 1,5% jährlich im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) auf 0,3–0,5% im KS 80 und KS 90 Szenario.
- Ein geringeres jährliches Wachstum der Anzahl der Server und Rechenzentren von 3% im AMS (2012) auf 2% im KS 80 und KS 90.

Weiterhin wurden im KS 80 und KS 90 eine schnellere Diffusion von hocheffizienten Geräten und in den Bereichen Beleuchtung (LEDs und OLEDs) und Klimatisierung hinterlegt, die nicht alleine wirtschaftlich getrieben ist, sondern über sehr ambitionierte Mindeststandards den Markt schnell umwälzt und die technologische Entwicklung antreibt.

Der Brennstoffbedarf des Sektors GHD, der nicht für Gebäudewärme und –kälte verwendet wird, teilt sich wie folgt auf die Anwendungen auf (basierend auf Schlomann et al. 2009):

- **Prozesswärme: ~1%** (Absorptionskältemaschinen)
- **Kraft: ~33%** (Kraftstoffeinsatz verbrennungsmotorischer Antriebe, zur Acker- und Feldpflege, Einbringen der Ernte etc. in der Landwirtschaft (Traktoren etc.), zur Vorbereitung und zum Betrieb einer Baustelle im Baugewerbe (Strom- und Drucklufterzeugung, Bagger- und Radlader-Einsatz etc.), im Rahmen des Flugvorfeldbetriebes bei Flughäfen (Schlepper, Busse etc.) eingesetzt werden.
- **Prozesskälte ~66%** (z.B. Wasch- und Reinigungsverfahren, Kochen und Garen, Sterilisieren, Brennen und Schweißen sowie für die Wärmebedarfsdeckung von Schwimmbecken und Unterglasbauten)

Insgesamt spielt der Brennstoffbedarf von etwa 108 PJ im Jahr 2010 jedoch im Vergleich zum Strombedarf von 462 PJ nur eine untergeordnete Rolle und wird entsprechend weniger detailliert modelliert.

5.4.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) steigt der Stromverbrauch von etwa 128 TWh in 2010 auf etwa 155 TWh in 2050, was einem Zuwachs von gut 20% entspricht. Dieser ist vorwiegend durch die Zunahme bei Anwendungen wie Rechenzentren/Servern, IKT, Klimatisierung und auch Kühlung in Supermärkten zurückzuführen, aber auch auf die Zunahme der Anzahl der Erwerbstätigen als zentralen Treiber des Energiebedarfs im tertiären Sektor um etwa 7% von 2010 bis 2050.

Der Bedarf anderer Brennstoffe geht hingegen leicht zurück und es findet ein kontinuierlicher aber langsamer Wechsel zu Erneuerbaren Energieträgern statt.

Tabelle 5-38 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nach Energieträgern

Energieträger	**2010**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
	PJ				
Strom	462	480	464	514	558
Erdgas	39	37	33	32	30
Fern-und Nahwärme	0	0	0	0	0
Heizöl	66	63	54	48	41
Kohle	0	0	0	0	0
biogene Brennstoffe	3	4	6	9	12
Umweltwärme	1	2	2	2	2
Solarthermie	0	0	0	0	0
Summe	571	585	559	606	643
Veränderung ggü. 2010		14	-12	35	72
prozentuale Veränderung ggü. 2010		3%	-2%	6%	13%

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-29 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nach Energieträgern

Quelle: Eigene Darstellung

Bei Betrachtung der einzelnen Branchen des Sektors GHD zeigt sich bis 2050 eine stark variierende Entwicklung. Während der Strombedarf einzelner Branchen wie der öffentlichen Verwaltung oder dem Bereich Erziehung und Unterricht sogar abnimmt steigt er in anderen Bereichen, wie dem Finanzsektor, der Verkehrs- und Kommunikationsinfrastruktur sowie den übrigen Branchen, stark an. Dies ist zum einen auf einen ähnlichen Trend bei den Erwerbstätigen je Branche zurück zu führen (siehe Kapitel 4.1.3) und zum anderen auf die unterschiedliche Dynamik mit der sich stromverbrauchende Geräte und Anwendungen in den Branchen verbreiten sowie die Struktur der Energiedienstleistungen.

Tabelle 5-39 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Wirtschaftszweigen im AMS (2012)[40]

Wirtschaftszweig	2010	2020	2030	2040	2050	2050/2010
	TWh					
Handel; Reparatur von Fahrzeugen	37,3	41,3	36,0	40,5	44,2	19%
Gastgewerbe	10,8	10,7	10,5	11,7	12,5	16%
Verkehr und Lagerei, IuK	8,9	8,8	9,9	11,2	12,7	43%
Finanz- und Versicherungsdienstleistungen	3,3	4,0	4,2	5,0	5,7	76%
Gesundheits-und Sozialwesen	9,0	8,3	7,7	7,6	7,5	-16%
Erziehung und Unterricht	6,2	5,8	5,6	5,5	5,4	-13%
Öff. Verwaltung, Verteidigung;	6,9	6,3	6,0	5,8	5,8	-16%
Sonstige Wirtschaftszweige	17,9	18,9	20,3	23,8	26,7	49%
Summe bottom-up	100,2	104,0	100,3	111,1	120,5	20%
Summe kalibriert	128,4	133,2	128,5	142,4	154,3	20%
Veränderung ggü. 2010		4,8	0,1	14,0	25,9	
prozentuale Veränderung ggü. 2010		4%	0%	11%	20%	

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-40 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Anwendungen im AMS (2012)[40]

Anwendung	2010	2020	2030	2040	2050	2050/2010
	TWh					
Innenraumbeleuchtung	37,2	35,4	30,2	32,4	33,8	-9%
Straßenbeleuchtung	4,5	4,2	4,2	4,4	4,5	0%
IKT Büro	3,8	3,4	4,0	4,9	6,0	56%
Rechenzentren und Server	6,6	7,6	8,9	11,3	14,5	120%
Lüftung und Klimatisierung	4,0	5,3	6,6	8,9	11,2	177%
Aufzüge	2,0	2,0	1,7	1,6	1,6	-18%
Weitere Gebäudestromverbraucher	16,1	20,5	20,7	21,7	20,3	27%
Kochen (gewerblich)	7,7	6,4	5,8	5,6	5,2	-32%
Waschen (gewerblich)	2,1	2,2	2,0	2,0	2,0	-6%
Gewerbliche Kühl- und Gefriergeräte	16,2	17,0	16,3	18,2	21,3	32%
Summe Bottom-up	100,2	104,0	100,3	111,1	120,5	20%
Summe kalibriert	128,4	133,2	128,5	142,4	154,3	20%
Veränderung ggü. 2010		4,8	0,1	14,0	25,9	
prozentuale Veränderung ggü. 2010		4%	0%	11%	20%	

Quelle: Eigene Berechnungen

[40] „Summe bottom-up“ entspricht dem über das Mengengerüst berechneten Stromverbrauch aller modellierten Anwendungen, während „Summe kalibriert“ dem auf die Energiebilanz kalibrierten Strombedarf des Sektors GHD entspricht.

5.4.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Im Klimaschutzszenario 80 fällt der Strombedarf bis 2050 um etwa 27% verglichen mit 2010. Dieser drastische Rückgang spiegelt eine Umkehr des erwarteten Trends im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) wider und ist getrieben durch eine ambitionierte Umsetzung von Effizienzmaßnahmen und der schnelle Verbreitung hocheffizienter Geräte als auch von einem veränderten Verhalten beim Nutzen von Energiedienstleistungen.

Während auch im Klimaschutzszenario 80 nur Effizienzmaßnahmen umgesetzt werden, die wirtschaftlich realisierbar sind (positiver Barwert bei einem Diskontierungssatz von 20%), so wird jedoch davon ausgegangen, dass sämtliche darüber hinaus existierende Hemmnisse für den Einsatz von Effizienzmaßnahmen abgebaut werden. Diese sind gerade im Sektor GHD sehr hoch, da in vielen Unternehmen Energiebedarf mit einem Anteil an den Gesamtkosten von weniger als 1% eine untergeordnete Rolle spielt bzw. in diesen Unternehmen keine aktive Suche nach Einsparmaßnahmen stattfindet. Die umgesetzten Einsparpotenziale können somit als sehr ambitioniert eingestuft werden und verlangen entsprechend nach einem Mix von politischen Instrumenten zum Abbau von Hemmnissen, der deutlich über die derzeit implementierten Instrumente hinausgeht.

Die modellierten Änderungen beim der Nutzung von Energiedienstleistungen drücken sich z.B. durch eine langsamer steigende installierte Lichtleistung je Gebäudefläche, eine langsamere Verbreitung von weiteren elektrischen Anwendungen, sowie von Kühlregalen in Supermärkten und IKT und Rechenzentren aus.

Tabelle 5-41 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Klimaschutzszenario 80 nach Energieträgern

Energieträger	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Strom	462	383	341	341	339
Erdgas	39	35	29	26	22
Fern-und Nahwärme	0	0	0	0	0
Heizöl	66	60	47	35	24
Kohle	0	0	0	0	0
biogene Brennstoffe	3	5	9	15	20
Umweltwärme	1	3	3	4	4
Solarthermie	0	0	0	1	2
Summe	571	485	430	421	410
Veränderung ggü. 2010		-86	-141	-150	-161
prozentuale Veränderung ggü. 2010		-15%	-25%	-26%	-28%

Quelle: Eigene Berechnungen

Die zeitliche Umsetzung der Effizienzmaßnahmen verteilt sich nicht gleichmäßig über den Zeitraum bis 2050, sondern findet verstärkt zwischen 2010 und 2030 statt. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass ein umfangreicher Satz an Maßnahmen kurz-

fristig umgesetzt werden muss, um das Ziel, den Strombedarf bis 2020 um 10 % zu reduzieren, zu erreichen. Die Maßnahmen, wie z.B. Mindeststandards und die Einführung von hocheffizienten Technologien wirken dann auch in den Folgejahren noch. Aufgrund der relativ kurzen Lebensdauer vieler Anwendungen (z.B. Lampen und IKT-Geräte) wird die Wirkung entsprechender Maßnahmen relativ kurzfristig sichtbar, im Gegensatz zu anderen Sektoren wie Gebäuden oder Industrieanlagen.

Abbildung 5-30 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Klimaschutzszenario 80 nach Energieträgern

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 5-42 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Wirtschaftszweigen im KS 80[40]

Wirtschaftszweig	2010	2020	2030	2040	2050	2050/2010
	TWh					
Handel; Reparatur von Fahrzeugen	36,9	30,9	26,5	26,8	26,3	-29%
Gastgewerbe	10,7	8,9	7,7	8,0	7,9	-26%
Verkehr und Lagerei, IuK	8,7	6,9	6,9	6,9	7,5	-14%
Finanz- und Versicherungsdienstleistungen	3,2	3,1	2,9	3,1	3,2	-1%
Gesundheits-und Sozialwesen	8,9	7,3	6,8	6,5	6,4	-28%
Erziehung und Unterricht	6,2	4,7	4,4	4,1	3,6	-41%
Öff. Verwaltung, Verteidigung;	6,8	5,0	4,5	3,9	3,7	-46%
Sonstige Wirtschaftszweige	17,6	14,9	12,9	12,9	12,9	-27%
Summe bottom-up	98,9	81,7	72,6	72,2	71,5	-28%
Summe kalibriert	128,4	106,1	94,3	93,7	92,8	-28%
Veränderung ggü. 2010		-22,3	-34,1	-34,7	-35,6	
prozentuale Veränderung ggü. 2010		-17%	-27%	-27%	-28%	

Quelle: Eigene Berechnungen

Bei Betrachtung der einzelnen Anwendungen (siehe Tabelle 5-43) wird deutlich, dass besonders die Beleuchtung zu den Stromeinsparungen beiträgt. Hier sind bis 2030 hocheffiziente LED Beleuchtungen und Licht- sowie bewegungsabhängige Steuerungen weitgehend verbreitet. Auch bei anderen Anwendungen werden die verfügbaren Einsparpotenziale weitestgehend ausgenutzt und selbst wenn einige Anwendungen bis 2050 noch steigen, so zeigt sich im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ein erhebliches Einsparpotenzial.

Tabelle 5-43 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Anwendungen im KS 80[40]

Anwendung	2010	2020	2030	2040	2050	2050/2010
	TWh					
Innenraumbeleuchtung	36,7	26,2	23,8	22,1	19,1	-48%
Straßenbeleuchtung	4,4	3,5	3,0	2,7	2,6	-40%
IKT Büro	3,5	2,3	2,7	3,4	4,1	17%
Rechenzentren und Server	6,4	6,7	7,1	8,2	9,5	47%
Lüftung und Klimatisierung	4,0	4,5	4,3	5,1	5,4	36%
Aufzüge	2,0	2,0	1,8	1,7	1,6	-16%
Weitere Gebäudestromverbraucher	16,0	13,0	9,6	9,3	9,5	-41%
Kochen (gewerblich)	7,7	6,4	5,7	5,5	5,2	-32%
Waschen (gewerblich)	2,1	2,2	2,0	2,0	2,0	-6%
Gewerbliche Kühl- und Gefriergeräte	16,0	15,0	12,6	12,1	12,3	-23%
Summe	98,9	81,7	72,6	72,2	71,5	-28%
Summe kalibriert	128,4	106,1	94,3	93,7	92,8	-28%
Veränderung ggü. 2010		-22,3	-34,1	-34,7	-35,6	
prozentuale Veränderung ggü. 2010		-17%	-27%	-27%	-28%	

Quelle: Eigene Berechnungen

5.4.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Das Klimaschutzszenario 90 zeigt bezüglich des Strombedarfs nur eine geringfügig niedrigere Entwicklung als das Klimaschutzszenario 80 von -31%. Zwar sind die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit der Einsparmaßnahmen nochmals gesunken (Diskontierungsrate von 10%), jedoch sind über die bereits im Klimaschutzszenario 80 sehr ambitionierten Einsparungen kaum weitere Potenziale vorhanden. Lediglich beim Brennstoffbedarf zeigt sich ein anderes Bild als im Klimaschutzszenario 80. Hier ist bis 2050 der Großteil auf Erneuerbare Energien umgestellt.

Tabelle 5-44 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Klimaschutzszenario 90 nach Energieträgern

Energieträger	**2010**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
	PJ				
Strom	462	372	315	316	317
Erdgas	39	32	22	13	5
Fern-und Nahwärme	0	0	0	0	0
Heizöl	66	56	37	21	5
Kohle	0	0	0	0	0
biogene Brennstoffe	3	9	17	27	36
Umweltwärme	1	3	3	4	4
Solarthermie	0	0	1	2	3
Summe	571	472	396	382	370
Veränderung ggü. 2010		-99	-175	-189	-201
prozentuale Veränderung ggü. 2010		-17%	-31%	-33%	-35%

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-31 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Klimaschutzszenario 90 nach Energieträgern

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 5-45 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Wirtschaftszweigen im KS 90[40]

Wirtschaftszweig	2010	2020	2030	2040	2050	2050/2010
			TWh			
Handel; Reparatur von Fahrzeugen	36,8	30,4	24,3	24,3	24,3	-34%
Gastgewerbe	10,7	8,8	7,4	7,5	7,4	-31%
Verkehr und Lagerei, IuK	8,7	6,8	6,4	6,4	6,9	-20%
Finanz- und Versicherungsdienstleistungen	3,2	2,9	2,6	2,7	2,8	-13%
Gesundheits-und Sozialwesen	8,9	7,3	6,5	6,1	5,9	-33%
Erziehung und Unterricht	6,2	4,6	3,9	3,5	3,2	-48%
Öff. Verwaltung, Verteidigung;	6,8	4,8	3,8	3,4	3,2	-53%
Sonstige Wirtschaftszweige	17,6	13,5	11,1	11,3	11,2	-36%
Summe bottom-up	98,8	78,9	65,9	65,1	64,8	-34%
Summe kalibriert	128,4	102,6	85,7	84,6	84,2	-34%
Veränderung ggü. 2010		-25,8	-42,7	-43,8	-44,2	
prozentuale Veränderung ggü. 2010		-20%	-33%	-34%	-34%	

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-46 Strombedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse nach Anwendungen im KS 90[40]

Anwendung	2010	2020	2030	2040	2050	2050/2010
	TWh					
Innenraumbeleuchtung	36,7	25,1	18,5	16,7	14,2	-61%
Straßenbeleuchtung	4,4	3,5	3,0	2,7	2,6	-40%
IKT Büro	3,5	2,3	2,7	3,4	4,2	19%
Rechenzentren und Server	6,4	6,7	7,1	8,2	9,5	47%
Lüftung und Klimatisierung	4,0	3,8	3,5	4,0	4,2	6%
Aufzüge	2,0	2,0	1,8	1,7	1,6	-16%
Weitere Gebäudestromverbraucher	16,0	12,2	9,0	8,8	9,0	-44%
Kochen (gewerblich)	7,7	6,4	5,7	5,5	5,2	-32%
Waschen (gewerblich)	2,1	2,2	2,0	2,0	2,0	-6%
Gewerbliche Kühl- und Gefriergeräte	16,0	14,8	12,5	12,0	12,2	-24%
Summe	98,8	78,9	65,9	65,1	64,8	-34%
Summe kalibriert	128,4	102,6	85,7	84,6	84,2	-34%
Veränderung ggü. 2010		-25,8	-42,7	-43,8	-44,2	
prozentuale Veränderung ggü. 2010		-20%	-33%	-34%	-34%	

Quelle: Eigene Berechnungen

5.4.5 Vergleich der Szenarien

Beim Vergleich der Szenarien wird besonders deutlich, wie unterschiedlich die Entwicklung beim Strombedarf zwischen Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) und Klimaschutzszenario 80 ist. Hier sind bereits im Klimaschutzszenario 80 die für das Erreichen der Stromeinsparziele notwendigen sehr ambitionierten Einsparmaßnahmen umgesetzt, über die hinaus auch im Klimaschutzszenario 90 nicht deutlich mehr Potenziale vorhanden sind. Das Klimaschutzszenario 80 enthält auch bereits Annahmen zu veränderten Nutzungsverhalten von Energiedienstleistungen, die sich z.B. in einer weniger stark steigenden Lichtleistung je Gebäudefläche ausdrücken. Insgesamt ist damit beim Strombedarf bereits das Klimaschutzszenario 80 als sehr ambitioniert bezüglich der realisierten Einsparungen einzustufen. Das Klimaschutzszenario 90 geht nur leicht darüber hinaus. Um diese Einsparungen zu realisieren wäre ein deutlich umfassenderer Mix an Politikinstrumenten zur Überwindung sämtlicher Hemmnisse notwendig, als dieser heute vorhanden ist. Auch müssten implementierte Mindeststandards und ähnliche Instrumente kontinuierlich an den technischen Wandel angepasst werden bzw. diesen sogar vorwärts treiben und ambitionierter gestaltet werden.

Eine Reduktion des Strombedarfs im GHD Sektor ist demnach technisch (und wirtschaftlich) machbar und damit kann auch im GHD-Sektor ein wichtiger Beitrag zu den Stromeinsparzielen des Energiekonzepts geleistet werden. Ob es allerdings gelingen wird, den in Europa derzeit vorhandenen Trend hin zu einem steigenden Strombedarf im tertiären Sektor umzukehren, kann damit nicht gesagt werden.

Tabelle 5-47 Übersicht Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Vergleich, 2010 – 2050

Energieträger	Szenario	2010	2020	2030	2040	2050
		PJ				
Brennstoffe						
Energiebedarf	AMS	109	106	95	91	85
	KS 80	109	103	89	81	71
	KS 90	109	100	81	67	53
Prozentuale Minderung gegenüber 2010	AMS		-3%	-12%	-16%	-22%
	KS 80		-6%	-18%	-26%	-35%
	KS 90		-8%	-26%	-39%	-51%
Strom						
Energiebedarf	AMS	462	480	464	514	558
	KS 80	462	383	341	341	339
	KS 90	462	372	315	316	317
Prozentuale Minderung gegenüber 2010	AMS		4%	0%	11%	21%
	KS 80		-17%	-26%	-26%	-27%
	KS 90		-19%	-32%	-32%	-31%
Prozentuale Minderung gegenüber 2008	AMS		9%	5%	17%	26%
	KS 80		-13%	-23%	-23%	-23%
	KS 90		-16%	-29%	-29%	-28%
Endenergie gesamt						
Energiebedarf	AMS	571	585	559	606	643
	KS 80	571	485	430	421	410
	KS 90	571	472	396	382	370
Absolute Minderung gegenüber 2010	AMS		14	-12	35	72
	KS 80		-86	-141	-150	-161
	KS 90		-99	-175	-189	-201
Prozentuale Minderung gegenüber 2010	AMS		3%	-2%	6%	13%
	KS 80		-15%	-25%	-26%	-28%
	KS 90		-17%	-31%	-33%	-35%

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-32 Endenergiebedarf im Sektor GHD – Geräte und Prozesse im Vergleich, 2010 - 2050

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 5-33 zeigt den Beitrag der einzelnen Anwendungen zur Veränderung des Strombedarfs im Vergleich zum Jahr 2010. Demnach leistet die Beleuchtung einen zentralen Beitrag zur Minderung des Strombedarfs – selbst im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012). Während einige Anwendungen, wie die Kühlgeräte in Supermärkten und die sonstigen Gebäudestromverbraucher im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) noch steigen, tragen sie im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 zum Sinken des Strombedarfs bei. In letzteren beiden Szenarien wächst der Stromverbrauch lediglich in Rechenzentren, IKT und Klimatisierung bis 2050 weiter – allerdings deutlich langsamer als dies im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) der Fall ist.

Diese Veränderungen sind nicht mit Stromeinsparungen im engeren Sinne zu verwechseln. Da sie im Vergleich zum Strombedarf im Jahr 2010 berechnet wurden, ist es theoretisch möglich, dass einzelne Anwendungen keinen Effizienzgewinn aufweisen, jedoch aufgrund z.B. der abnehmenden Nutzung bis 2050 einen sinkenden Stromverbrauch aufweisen. Hingegen ist es möglich, dass bei Anwendungen, die bis 2050 einen steigenden Stromverbrauch haben, bereits umfangreiche Effizienzpotenziale realisiert wurden, die durch Politikinstrumente angestoßen werden könnten.

Abbildung 5-33 Veränderung des Strombedarfs im Sektor GHD – Prozesse und Geräte nach Anwendungen und Szenarien im Vergleich zu 2010

Quelle: Eigene Darstellung

In ähnlicher Weise ist in Abbildung 5-34 die Veränderung des Stromverbrauchs bezogen auf 2010 nach den Branchen des GHD-Sektors dargestellt. Im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 fällt der Strombedarf in allen Branchen, besonders stark jedoch im Bereich „Handel (und Reparatur von Fahrzeugen)“. Dies ist vorwiegend auf die Struktur der benötigten Energiedienstleistungen in dieser Branche zurückzuführen (siehe Abbildung 5-28). Die Anwendungen Beleuchtung und Kühlung, mit relativ hohen Einsparpotenzialen, machen einen Großteil des Strombedarfs in diesem Sektor aus.

Abbildung 5-34 Veränderung des Strombedarfs im Sektor GHD – Prozesse und Geräte nach Branchen und Szenarien im Vergleich zu 2010

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 5-48 zeigt die Emissionsentwicklungen für CO_2, CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick.

Die Emissionen der Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O gehen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) [AMS (2012)] in der Periode 2005 bis 2050 von 48 Mio. t CO_2-Äqu. auf 16 Mio. t CO_2-Äqu., also um insgesamt etwa 32 Mio. t CO_2-Äqu. zurück. Im Klimaschutzszenario 80 (KS 80) liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 8 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 40 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Im Klimaschutzszenario 90 (KS 90) sinken die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 44 Mio. t CO_2-Äqu. auf 4 Mio. t CO_2-Äqu.

Für die Periode 2005 bis 2020 ergibt sich damit im AMS (2012) eine Emissionsminderung von 18 % und für den Zeitraum von 2005 bis 2050 von 67 %. Die entsprechenden Vergleichswerte für das KS 80 belaufen sich auf 26 % bzw. 83 % und für das KS 90 auf 27 % bzw. 92 %.

Bezogen auf die Ausgangswerte des Jahres 1990 betragen die entsprechenden Reduktionsraten bis 2050 im AMS (2012), KS 80 und KS 90 82%, 91% bzw. 96%.

Tabelle 5-48 Emissionsentwicklungen für den GHD-Sektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CO_2-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	86.820	47.664	43.908				
AMS (2012)				39.007	30.183	22.371	15.698
Klimaschutzszenario 80				35.392	22.899	12.992	8.105
Klimaschutzszenario 90				34.949	21.153	9.742	3.981
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	1.630	72	89				
AMS (2012)				96	73	51	36
Klimaschutzszenario 80				93	69	43	33
Klimaschutzszenario 90				88	61	35	21
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	256	141	133				
AMS (2012)				121	93	68	51
Klimaschutzszenario 80				113	77	47	34
Klimaschutzszenario 90				111	72	39	24
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	88.707	47.878	44.130				
AMS (2012)				39.224	30.349	22.490	15.785
Klimaschutzszenario 80				35.597	23.044	13.082	8.172
Klimaschutzszenario 90				35.148	21.286	9.817	4.026
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
AMS (2012)				-55,8	-65,8	-74,6	-82,2
Klimaschutzszenario 80				-59,9	-74,0	-85,3	-90,8
Klimaschutzszenario 90				-60,4	-76,0	-88,9	-95,5
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
AMS (2012)				-18,1	-36,6	-53,0	-67,0
Klimaschutzszenario 80				-25,6	-51,9	-72,7	-82,9
Klimaschutzszenario 90				-26,6	-55,5	-79,5	-91,6
Anmerkungen: ohne bauwirtschaftlichen Verkehr							

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

5.5 Verkehr

5.5.1 Annahmen und Parameter

Relevante Parameter für die Entwicklung der Verkehrsleistung und des Modal Splits sind die Entwicklung der Kraftstoffpreise und der Nutzerkosten, die Motorisierungsrate, die Verfügbarkeit alternativer bzw. konventioneller Fahrzeuge und deren Kenndaten (z.B. Effizienzentwicklung, Reichweite von elektrischen Pkw).

5.5.1.1 Energiesteuern

Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bleiben die Mineralölsteuern bis 2050 bei den heutigen Sätzen von 65,45 Cent/Liter Benzin und 47,04 Cent/Liter Diesel. Da demnach keine Anpassung an die Inflation erfolgt, kommt es real zu einer sinkenden Steuerbelastung durch die Mineralölsteuer. Durch die steigenden Rohölpreise erhöht

sich der Endkundenpreis an der Tankstelle (siehe Abschnitt 4.2.2) im Zeitraum 2010 bis 2050 dennoch real um 23% (Benzin) bzw. 37% (Diesel).

Im Klimaschutzszenario 80 wird die Bemessungsgrundlage für die Mineralölsteuer zu 30% auf Energiegehalt und zu 70% auf CO_2-Gehalt umgestellt und deutlich angehoben. Der Endkundenpreis je Liter Benzin steigt dadurch in 2030 auf 2,15 $€_{2010}$ und in 2050 auf 2,65 $€_{2010.}$ Gegenüber 2010 entspricht dies einer Erhöhung der Endkundenpreise von Benzin um 90% bis 2050. Die Umstellung der Bemessungsgrundlage auf den Energie- und CO_2 -Gehalt führt dazu, dass der Endkundenpreis für Diesel mit 144% bis 2050 noch stärker ansteigt als der Benzinpreis.

Im Klimaschutzszenario 90 entspricht die Mineralölsteuer bis 2030 derjenigen des Klimaschutzszenario 80s. Nach 2030 wird die Steuer im Klimaschutzszenario 90 nochmals angehoben, so dass der Endkundenpreis für Benzin bis 2050 auf 2,90 $€_{2010}$ steigt.

Für den öffentlichen Verkehr wird im Klimaschutzszenario 80 und im Klimaschutzszenario 90 die Steuererleichterung für Kraftstoffe von derzeit 10% auf 50% (in 2030) erhöht und im Schienenverkehr eine Stromsteuererleichterung von 50% eingeführt.

Auf den nationalen Flugverkehr wird im Klimaschutzszenario 80 und im Klimaschutzszenario 90 ab 2015 eine an die Höhe der bereits geltenden Mineralölsteuern orientierte Kerosinsteuer erhoben. Das für den internationalen Flugverkehr eingesetzte Kerosin wird wie bisher allerdings nicht besteuert.

5.5.1.2 Lkw-Maut

Im Klimaschutzszenario 80 sowie im Klimaschutzszenario 90 wird die Lkw-Maut ab 2015 auf alle Lkw > 3,5 t erweitert. Die Lkw-Maut wird außerdem alle 5 Jahre erhöht. Im Jahr 2030 beträgt die Mauthöhe im Schnitt 0,3 €/km, im Jahr 2050 im Schnitt 0,5 €/km.

5.5.1.3 Motorisierungsrate

Die Verfügbarkeit eines eigenen Pkw beeinflusst wesentlich die Verkehrsmittelwahl. Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) wird davon ausgegangen, dass auch in Zukunft der Trend der zunehmenden Motorisierung anhält. Die Motorisierungsrate (Anzahl der Pkw je Einwohner) nimmt demnach von 51% (2010) auf 59% (2050) zu, wobei der größere Teil des Anstiegs vor 2030 erfolgt. Die Zunahme ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Pkw-Besitz bis ins Alter beibehalten wird und es dadurch zukünftig in älteren Bevölkerungsschichten eine gegenüber heute höhere Motorisierungsrate gibt.

Im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ist im Klimaschutzszenario 80 und im Klimaschutzszenario 90 durch die Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Verkehrs und die gleichzeitig höheren Kosten für den MIV der Pkw-Besitz weniger attraktiv. Die Motorisierungsraten im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 sind mit 54% bzw. 52% in 2050 demnach niedriger als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), wenngleich auch hier noch gegenüber 2010 ein leichter (prozentualer) Anstieg zu verzeichnen ist. In absoluten Zahlen nimmt der Pkw-Bestand in Deutschland jedoch auf Grund des Bevölkerungsrückgangs ab.

5.5.1.4 Reichweiten von elektrischen Pkw

Die Reichweite batterieelektrischer Pkw (BEV) beeinflusst deren Marktpotenzial und hat zudem Auswirkungen auf die Jahresfahrleistungen. Bei Plug-In-Hybridfahrzeugen (PHEV), welche sowohl im elektrischen Modus als auch im konventionellen Modus fahren können, beeinflusst die elektrische Reichweite zudem den Anteil der elektrischen Fahrleistung der Pkw, welche sich im Modell PowerFlex ergibt. Unter dem Begriff „PHEV“ werden dabei alle Fahrzeuge verstanden, welche sowohl im konventionellen als auch im elektrischen Betrieb (und ggf. im kombinierten Betrieb) fahren können und über eine Lademöglichkeit am Stromnetz verfügen. Auch Range-Extender (REEV) werden unter dieser Kategorie subsummiert.

Auf Grund der Fortschritte in der Batterietechnologie, höheren Energiedichten sowie Kostendegressionen wird davon ausgegangen, dass sich die Reichweiten elektrischer Fahrzeuge bis 2050 erhöhen (siehe Tabelle 5-49).

Tabelle 5-49 Entwicklung der elektrische Reichweiten von Elektrofahrzeugen

	2010	2020	2030	2040	2050
	km				
Batterieelektrischer Pkw (BEV)	160	160	170	210	250
Plug-In-Hybrid (PHEV)	50	50	55	65	75

Quelle: Eigene Annahmen Öko-Institut

5.5.1.5 Effizienzentwicklung von Pkw

Bei den Energieverbräuchen der Pkw ist zu unterscheiden zwischen den gemäß dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) gemessenen Werten, auf die sich auch die EU-Emissionsstandards beziehen, und den Realverbräuchen, welche deutlich höher liegen können. Für das Basisjahr 2010 wird der spezifische Energieverbrauch nach NEFZ aus den Verbrauchswerten des KBA zu Pkw-Neuzulassungen (KBA 2011) bestimmt. Pkw-Neuzulassungen in Deutschland liegen zudem derzeit erheblich über dem EU-weiten Schnitt an spezifischen Emissionen (2010: ca. + 11 g CO_2/km). Bei den in Tabelle 5-50[41] dargestellten Energieverbräuchen handelt es sich um Realverbräuche, welche einen Aufschlag für den Realbetrieb von 15 % gegenüber den NEFZ-Werten enthalten. Eine aktuelle Studie zum Vergleich von Testzyklusdaten mit Realverbräuchen (ICCT 2013) legt nahe, dass die Diskrepanz sogar in der Größenordnung von über 20% liegen könnte. Generell wird aber davon ausgegangen, dass die Realemissionen im gesamten untersuchten Zeitraum 15 % über den Testzyklusemissionen liegen.

Bis 2050 kommt es in allen Szenarien zu einer deutlichen Effizienzsteigerung bei den Pkw-Neuzulassungen über alle Antriebsarten. Wesentliche Unterschiede zwischen den

[41] Als Beispiel werden die Energieverbräuche der Größenklasse *mittel* dargestellt.

Szenarien ergeben sich erst durch die unterschiedliche Neuzulassungsstruktur und dem daraus resultierenden unterschiedlichen Flottenmix (siehe Abschnitt 5.5.1.6).

Die Realisierung der Effizienzpotenziale erfolgt über ein Bündel verschiedener Technologien, darunter Leichtbau, Hybridisierung, etc. Die dargestellte Effizienzentwicklung für konventionelle Fahrzeuge enthält dabei bereits die Hybridisierung als eine wesentliche Effizienztechnologie. In den beiden Klimaschutzszenarien sind aus heutiger Sicht maximale Effizienzverbesserungen der Pkw zugrunde gelegt (Smokers et al. 2011).

Tabelle 5-50 Effizienzentwicklung von Pkw-Neuzulassungen (Größenklasse mittel)

	2010	2020	2030	2040	2050
	MJ/km				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Diesel	2,25	1,67	1,49	1,43	1,37
Ottomotor	2,47	1,70	1,48	1,42	1,36
Elektroantrieb	0,97	0,79	0,75	0,70	0,65
Plug-In-Hybrid - elektrischer Modus	1,02	0,84	0,79	0,75	0,70
Plug-In-Hybrid - konv. Modus (Benzin)	2,10	1,70	1,48	1,42	1,36
Klimaschutzszenario 80 und Klimschutzszenario 90					
Diesel	2,25	1,67	1,31	1,26	1,20
Ottomotor	2,47	1,70	1,30	1,25	1,20
Elektroantrieb	0,97	0,79	0,75	0,70	0,65
Plug-In-Hybrid - elektrischer Modus	1,02	0,84	0,79	0,75	0,70
Plug-In-Hybrid - konv. Modus (Benzin)	2,10	1,70	1,48	1,42	1,36
FCEV			1,18	1,12	1,06
Gasfahrzeug	2,47	1,70	1,30	1,25	1,20
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Diesel		-26%	-34%	-37%	-39%
Ottomotor		-31%	-40%	-43%	-45%
Elektroantrieb		-18%	-23%	-28%	-33%
Plug-In-Hybrid - elektrischer Modus		-18%	-23%	-27%	-31%
Plug-In-Hybrid - konv. Modus (Benzin)		-19%	-29%	-32%	-35%
Klimaschutzszenario 80 und Klimschutzszenario 90					
Diesel		-26%	-42%	-44%	-46%
Ottomotor		-31%	-47%	-50%	-52%
Elektroantrieb		-18%	-23%	-28%	-33%
Plug-In-Hybrid - elektrischer Modus		-18%	-23%	-27%	-31%
Plug-In-Hybrid - konv. Modus (Benzin)		-19%	-29%	-32%	-35%
FCEV (Veränderung ggü. 2030)			0%	-5%	-10%
Gasfahrzeug		-31%	-47%	-50%	-52%

Quellen: KBA 2011, TNO 2011, Berechnungen des Öko-Instituts

5.5.1.6 Neuzulassungsstruktur Pkw

Für die Effizienzentwicklung des Fahrzeugbestandes ist neben der spezifischen Effizienzentwicklung je Antriebstyp der Anteil alternativer Antriebe relevant.

Die Ermittlung der Neuzulassungsstruktur alternativer Antriebe basiert auf der in Hacker et al. (2011) entwickelten Methodik, bei der sowohl die Restriktionen für die Nut-

zerpotenziale alternativer Antriebe (wie z.B. Reichweite) als auch die Technologiediffusion (mittels einer Gompertz-Technologiediffusionskurve) berücksichtigt werden.

Die in Tabelle 5-51 dargestellte Neuzulassungsstruktur stellt den Anteil der Antriebsarten an den Neuzulassungen für die Größenklasse *mittel* dar. Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) überwiegen auch bis 2050 konventionelle Antriebe. Im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 werden dagegen ab dem Jahr 2040 keine nur mit Diesel oder Benzin betriebenen Fahrzeuge mehr zugelassen. Vielmehr überwiegen Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge, welche einen Großteil ihrer Fahrleistung elektrisch erbringen können, aber keiner Reichweitenbeschränkung unterliegen. Zudem nimmt der Anteil der Gasfahrzeuge zu, welche an einer wachsenden Anzahl Tankstellen Biogas tanken können. Im Klimaschutzszenario 90 gewinnt ab 2030 zusätzlich die Brennstoffzellentechnologie an Bedeutung.

Treiber für diese Entwicklung können (neben den im Klimaschutzszenario 80 deutlich gestiegenen Kosten für fossile Kraftstoffe) sowohl ambitionierte Emissionsstandards sein, welche nur mit alternativen Antrieben erreicht werden können, sowie die Einführung von Einfahrbeschränkungen für verbrennungsmotorische Pkw (z.B. CO_2-freie Innenstadt) und die Förderung bestimmter Technologien.

Tabelle 5-51 Neuzulassungsstruktur von Pkw (Größenklasse mittel)

	2010	2020	2030	2040	2050
	Anteil an den Neuzulassungen (Pkw mittel)				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Diesel	42%	40%	33%	28%	25%
Ottomotor	58%	55%	45%	37%	34%
Elektroantrieb	0%	1%	3%	5%	6%
Plug-In-Hybride	0%	5%	19%	30%	35%
Klimaschutzszenario 80					
Diesel	42%	33%	10%	0%	0%
Ottomotor	58%	62%	37%	0%	0%
Elektroantrieb	0%	1%	4%	7%	10%
Plug-In-Hybride	0%	3%	35%	78%	75%
Gasfahrzeug	0%	1%	15%	15%	15%
Klimschutzszenario 90					
Diesel	42%	31%	7%	0%	0%
Ottomotor	58%	58%	27%	0%	0%
Elektroantrieb	0%	1%	4%	7%	8%
Plug-In-Hybride	0%	9%	46%	76%	68%
FCEV	0%	0%	0%	2%	10%
Gasfahrzeug	0%	1%	15%	15%	15%

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

5.5.1.7 Effizienzentwicklung im Straßengüterverkehr

Beim Straßengüterverkehr ist die Einsetzbarkeit und Wirksamkeit möglicher Effizienztechnologien abhängig vom Fahrzeugtyp und dem Einsatzprofil. Hybridisierung beispielsweise ist besonders bei hügeligem Profil durch die Rekuperation der Bremsenergie von Vorteil; eine Verbesserung der Aerodynamik entfaltet im Fernverkehr das größ-

te Potenzial. In Tabelle 5-52 und Tabelle 5-53 ist die Effizienzentwicklung für leichte Nutzfahrzeuge und Sattelzüge dargestellt.[42] Der angegebene Energieverbrauch bezieht sich dabei jeweils auf Leerfahrten; in den Szenarien wird im Modell TEMPS in Abhängigkeit der Auslastung der Fahrzeuge der tatsächliche Energieverbrauch berechnet.

Im Vergleich zu den Pkw ist bisher keine CO_2-Emissionsregulierung bei Lkw verankert. Während die Minderungen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bei rund 30% gegenüber 2010 liegen, werden im Klimaschutzszenario 90 und im Klimaschutzszenario 80 Minderungen von rund 50% erreicht (Smokers 2012 und NRC 2010).

Tabelle 5-52 Effizienzentwicklung von leichten Nutzfahrzeugen (Energieverbrauch bei Leerfahrten)

	2010	2020	2030	2040	2050
	MJ/km				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Diesel	2,74	2,06	1,90	1,85	1,80
Elektroantrieb	1,12	1,01	0,92	0,83	0,75
Plug-In-Hybrid - elektrischer Modus	1,20	1,04	0,95	1,77	0,87
Plug-In-Hybrid - konv. Modus	2,33	2,03	1,85	0,91	1,69
Klimaschutzszenario 80 und Klimschutzszenario 90					
Diesel	2,74	2,22	1,80	1,65	1,52
Elektroantrieb	1,12	1,01	0,92	0,83	0,75
Plug-In-Hybrid - elektrischer Modus	1,20	1,04	0,95	0,91	0,87
Plug-In-Hybrid - konv. Modus (Benzin)	2,33	2,03	1,85	1,77	1,69
FCEV			1,53	1,45	1,37
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Diesel		-25%	-31%	-33%	-35%
Elektroantrieb		-10%	-18%	-26%	-33%
Plug-In-Hybrid - elektrischer Modus		-13%	-21%	48%	-27%
Plug-In-Hybrid - konv. Modus (Benzin)		-13%	-21%	-61%	-27%
Klimaschutzszenario 80 und Klimschutzszenario 90					
Diesel		-19%	-35%	-40%	-45%
Elektroantrieb		-10%	-18%	-26%	-33%
Plug-In-Hybrid - elektrischer Modus		-13%	-21%	-24%	-27%
Plug-In-Hybrid - konv. Modus (Benzin)		-13%	-21%	-24%	-27%
FCEV (Veränderung ggü. 2030)			0%	-5%	-10%

Quelle: Smokers 2012, Berechnungen des Öko-Instituts

[42] Auf die Darstellung der Effizienzentwicklung des restlichen Straßengüterverkehrs (Lkw > 3,5 t) wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet, da sie zum einen nur einen vergleichsweise geringen Anteil an den Emissionen des Straßengüterverkehrs haben und sich zum anderen die Effizienzsteigerung in einer ähnlichen Größenordnung bewegt.

Tabelle 5-53 Effizienzentwicklung von Sattelzügen (Energieverbrauch bei Leerfahrten)

	2010	2020	2030	2040	2050
	MJ/km				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Diesel	8,52	7,84	6,82	6,44	6,08
Klimaschutzszenario 80 und Klimschutzszenario 90					
Diesel	8,52	7,20	6,08	5,07	4,22
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Diesel		-8%	-20%	-24%	-29%
Klimaschutzszenario 80 und Klimschutzszenario 90					
Diesel		-16%	-29%	-41%	-51%

Quelle: NRC 2010, Berechnungen des Öko-Instituts

5.5.1.8 Neuzulassungsstruktur Lkw

Die Optionen für alternative Antriebe sind im Gegensatz zu Pkw auf Grund der Anforderungen an Leistung und Reichweite besonders im Bereich der schweren Lkw deutlich beschränkter.

Während bei leichten Nutzfahrzeugen der Anteil von batterieelektrischen und Plug-In-Hybridfahrzeugen im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 deutlich zunimmt, kommen bei den Zugmaschinen in allen Szenarien nur Dieselfahrzeuge zum Einsatz. Diese sind jedoch (zumindest im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90) deutlich effizienter als heute.

Tabelle 5-54 Neuzulassungsstruktur von leichten Nutzfahrzeugen

	2010	2020	2030	2040	2050
	Anteil an den Neuzulassungen (LNF)				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Diesel	100%	95%	81%	70%	65%
Elektroantrieb	0%	1%	3%	5%	6%
Plug-In-Hybride	0%	4%	15%	24%	28%
Klimaschutzszenario 80					
Diesel	100%	94%	75%	60%	54%
Elektroantrieb	0%	1%	5%	7%	8%
Plug-In-Hybride	0%	5%	21%	33%	38%
Klimschutzszenario 90					
Diesel	100%	95%	76%	53%	34%
Elektroantrieb	0%	1%	4%	7%	8%
Plug-In-Hybride	0%	4%	19%	32%	38%
FCEV	0%	0%	0%	8%	20%

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 5-55 Neuzulassungsstruktur kleiner Lkw (<12 t)

	2010	2020	2030	2040	2050
	Anteil an den Neuzulassungen (Lkw 3,5-12 t)				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Diesel	100%	94%	77%	63%	57%
Plug-In-Hybride	1%	6%	23%	37%	43%
Klimaschutzszenario 80					
Diesel	100%	95%	79%	67%	62%
Plug-In-Hybride	0%	5%	21%	33%	38%
Klimschutzszenario 90					
Diesel	100%	96%	80%	60%	43%
Plug-In-Hybride	1%	4%	19%	32%	38%
FCEV	0%	0%	0%	8%	20%

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 5-56 Neuzulassungsstruktur großer Lkw und Sattelzüge

	2010	2020	2030	2040	2050
	Anteil an den Neuzulassungen (Lkw > 12 t und Sattelzüge)				
alle Szenarien					
Diesel	100%	100%	100%	100%	100%

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

5.5.1.9 Effizienzentwicklung übrige Verkehrsträger (System-/Bestandseffizienz)

Für die übrigen Verkehrsträger wird keine Verfügbarkeit alternativer Antriebssysteme angenommen, so dass die Emissionsminderung vor allem über Effizienzsteigerungen erreicht wird. Die Basis der Annahmen bildet TREMOD 5.2. (ifeu 2011), da daraus die spezifischen Energieverbräuche der einzelnen Verkehrsträger bis 2030 übernommen werden. Die relative jährliche Effizienzsteigerung (2010 – 2030) aus TREMOD 5.25 wird konstant gehalten und für die Entwicklung bis 2050 genutzt. Im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 wird für den Luftverkehr eine verstärkte Effizienzsteigerung von 1,5 % pro Jahr angenommen. Diese Effizienzsteigerung entspricht der Selbstverpflichtung der Luftfahrtindustrie.

Für den Seeverkehr wird wie bei der Verkehrsnachfrage auf Buhaug et al. (2009) zurückgegriffen. Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) wird der Mittelwert aus niedriger (*low*) und mittlerer (*medium*) Effizienz angenommen. Im Klimaschutzszenario 90 steigt die Effizienz stärker und es wird der Mittelwert aus mittlerer (*medium*) und starker (*high*) Effizienzentwicklung zugrunde gelegt.

Tabelle 5-57 Effizienzentwicklung relevanter übriger Verkehrsträger (Personenverkehr)

	2010	2020	2030	2040	2050
	MJ/pkm				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Personenfernverkehr (Schiene) - elektrisch	0,26	0,23	0,20	0,17	0,15
Personennahverkehr (Schiene) - elektrisch	0,43	0,38	0,34	0,31	0,28
Linienbus	0,92	0,80	0,69	0,59	0,51
Luftverkehr (5.000 - 10.000 km)	1,11	0,99	0,89	0,81	0,73
Klimaschutzszenario 80 und Klimschutzszenario 90*					
Luftverkehr (5.000 - 10.000 km)	1,11	0,96	0,82	0,71	0,61
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Personenfernverkehr (Schiene) - elektrisch		-13%	-24%	-34%	-42%
Personennahverkehr (Schiene) - elektrisch		-10%	-19%	-27%	-35%
Linienbus		-14%	-25%	-36%	-44%
Luftverkehr (5.000 - 10.000 km)		-11%	-20%	-27%	-34%
Klimaschutzszenario 80 und Klimschutzszenario 90*					
Luftverkehr (5.000 - 10.000 km)		-14%	-26%	-36%	-45%

Quelle: ifeu 2011, Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 5-58 Effizienzentwicklung relevanter übriger Verkehrsträger (Güterverkehr)

	2010	2020	2030	2040	2050
	MJ/tkm				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Schienenverkehr - elektrisch	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07
Binnenschifffahrt	0,37	0,37	0,37	0,36	0,35
Seeschifffahrt	0,22	0,21	0,20	0,19	0,17
Klimaschutzszenario 80*					
Seeschifffahrt	0,22	0,20	0,18	0,16	0,14
Klimschutzszenario 90*					
Seeschifffahrt	0,22	0,18	0,16	0,13	0,10
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario					
Schienenverkehr - elektrisch		-12%	-22%	-31%	-39%
Binnenschifffahrt		0%	0%	-3%	-5%
Seeschifffahrt		-5%	-10%	-15%	-21%
Klimaschutzszenario 80*					
Seeschifffahrt		-11%	-20%	-29%	-38%
Klimschutzszenario 90*					
Seeschifffahrt		-16%	-29%	-41%	-54%

Quelle: Buhaug et al. 2009, ifeu 2011, Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

5.5.1.10 Biokraftstoffe

Die Beimischung von Biokraftstoffen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) orientiert sich an der bestehenden Gesetzgebung: Das Biokraftstoffquotengesetz legt fest, dass ab 2020 7 % der Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr mit dem Einsatz

von Biokraftstoffen gemindert werden sollen. Gemäß Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung muss die Treibhausgasminderung von Biokraftstoffen ab 2017 mindestens 50% (für Neuanlagen 60%) betragen. Das im Nationalen Aktionsplan für erneuerbare Energie (Bundesrepublik Deutschland 2010) genannte Ziel für den Verkehrssektor im Jahr 2020 beträgt 13.2%. Angenommen wird im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) eine Beimischung von 14% im Straßenverkehr ab 2020.

Im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 wird dagegen die Beimischungsquote nach 2020 erhöht und ab 2030 werden auch im Schiffsverkehr und im Luftverkehr Biokraftstoffe eingesetzt. Insgesamt beträgt die Beimischung in 2050 über alle Flüssigkraftstoffe 50%. Zudem kommt Biogas in den Pkw mit Gasantrieb zum Einsatz. Bei der Setzung der Beimischungsquote wurden dabei maximal 700 PJ Biokraftstoffe im Verkehrssektor als Obergrenze definiert.

5.5.1.11 Stromgenerierte Kraftstoffe

Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) und im Klimaschutzszenario 80 kommen keine stromgenerierten Kraftstoffe zum Einsatz. Im Klimaschutzszenario 90 wird über Elektrolyse Wasserstoff für die Versorgung der Brennstoffzellenfahrzeuge hergestellt. Da Brennstoffzellenfahrzeuge jedoch erst ab dem Jahr 2030 in den Markt kommen, bleibt die Nachfrage auf verhältnismäßig niedrigem Niveau.

5.5.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Die Personenverkehrsnachfrage der landgebundenen Verkehrsträger wird im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) im Wesentlichen durch zwei sich verstärkende Effekte bestimmt. Zum einen findet nur eine geringe Verteuerung der realen Benzin- bzw. Dieselpreise statt (vgl. dazu 5.5.1.1). Dies führt bei höherer Effizienz der Fahrzeuge und bei steigenden Wohlstandsgewinnen für die Bevölkerung durch die positive Wirtschaftsentwicklung dazu, dass sich die motorisierte individuelle Mobilität für die Bevölkerung insgesamt verbilligt. Zum anderen nimmt der Anteil der Personen, welche Zugang zu einem eigenen Auto haben, in diesem Szenario weiter zu (vgl. dazu 5.5.1.3), d.h. die Möglichkeit, von dem real verbilligten Mobilitätsangebot Gebrauch zu machen, nimmt ebenfalls zu. Beide Effekte führen dazu, dass bis zum Jahr 2050 der Anteil der täglichen Fahrten mit dem Pkw ansteigt.

Neben diesen beiden Treibern, welche die Modalwahl in diesem Szenario beeinflussen, ist für das Verkehrsaufkommen ein weiterer Effekt bedeutsam. In der Vergangenheit wurde eine Zunahme für Fahrten mit Distanzen unter 100 km beobachtet (Arndt et al., 2012), welche über 90% aller zurückgelegten Wege in Deutschland betrifft. Dies trifft vor allem auf die Verkehrszwecke Freizeit und Beruf zu, deren Wegelängen im Zeitraum 2002 bis 2009 um 5,0% bzw. 4,2% und damit überproportional im Vergleich zum Gesamtwachstum von 3,7% zugenommen haben (Doll et al., 2012). Dieser Trend wird in ASTRA-D für die Zukunft fortgeschrieben, auch unter der Annahme im Prognosezeitraum abnehmender Zeitwerte und damit einer höheren mittleren Geschwindigkeit der Verkehrsträger (die Basisdaten hierzu finden sich in Doll et al. (2012).

Die Annahme einer steigenden Nutzung des Luftverkehrs je Einwohner führt im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) zu einer steigenden Personenverkehrsnachfrage im Flugverkehr. Durch die sinkende Einwohnerzahl und die nachlassende Steigerungsrate verlangsamt sich der Anstieg nach 2030 allerdings erheblich und ist in 2050 annähernd nicht mehr sichtbar.

Abbildung 5-35 und Tabelle 5-59 zeigen die Verkehrsnachfrage im Personenverkehr im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012). Bis 2020 zeigt sich zunächst der Effekt, dass die Zahl der insgesamt zurückgelegten Wege zurückgeht. Die Distanzen pro Weg ändern sich hier noch kaum, allerdings machen sich die veränderten Wegeraten durch die demographische Veränderung bemerkbar. Erst im weiteren Zeitverlauf werden die abnehmenden Gesamtwege von der Distanz überkompensiert. Dies führt in Summe dann zu einer höheren Verkehrsnachfrage.

Abbildung 5-35 Personenverkehrsnachfrage im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-59 Personenverkehrsnachfrage im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	Mrd. pkm				
Personenverkehr	**1.072**	**1.037**	**1.143**	**1.229**	**1.275**
Motorisierter Individualverkehr	885	868	973	1.058	1.111
Schienenverkehr	94	80	77	74	68
Busverkehr	83	76	78	80	80
Flugverkehr (national)	10	13	15	17	16
Veränderungen gegenüber 2010		-3%	7%	15%	19%
inkl. internationale Verkehre	*1.256*	*1.273*	*1.432*	*1.564*	*1.612*
Flugverkehr (international)	*183*	*236*	*290*	*336*	*336*

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Güterverkehr findet ebenfalls eine Zunahme der Gesamtverkehrsnachfrage statt; diese ist in Abbildung 5-36 dargestellt. Es wird von einer weiteren Zunahme des Export- sowie des Transitverkehrs auf der Straße ausgegangen. Erst gegen 2040 wird angenommen, dass sich diese Entwicklung etwas verlangsamen wird. Lediglich der Transport mit der Binnenschifffahrt wird als rückläufig angenommen; Grundlage hierfür ist die Unterstellung, dass sich der Trend zum Transport höherwertiger Güter weiter fortsetzen wird und somit die Wasserwege mit ihrer Dominanz beim Schüttgut nicht mehr so konkurrenzfähig sind im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern.

Entsprechend des weiterhin starken Exports und der Annahme einer weltweiten Zunahme des Seeverkehrs (siehe Abschnitt 4.4.1.2) steigt der über deutsche Häfen abgewickelte Seeverkehr ebenfalls erheblich an. Der Luftfrachtverkehr spielt zwar in Bezug auf die transportierte Tonnage eine untergeordnete Rolle, ist jedoch für den Endenergieverbrauch des Verkehrssektors aufgrund der hohen Energieintensität von nicht unerheblicher Relevanz. Er steigt ebenso wie der Personenluftverkehr bis 2030 erheblich und anschließend mit geringeren Steigerungsraten an.

Abbildung 5-36 Güterverkehrsnachfrage im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-60 Güterverkehrsnachfrage im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	Mrd. tkm				
Güterverkehr	**616**	**722**	**793**	**825**	**797**
Straße	446	514	586	613	595
Schiene	105	146	153	155	144
Binnenschifffahrt	65	62	54	57	58
Veränderungen gegenüber 2010		17%	29%	34%	29%
inkl. internationale Verkehre	*2.369*	*3.067*	*3.686*	*4.404*	*5.347*
Flugverkehr	*11*	*13*	*18*	*23*	*25*
Seeschifffahrt	*1.742*	*2.332*	*2.875*	*3.556*	*4.524*

Quelle: Eigene Berechnungen

Aufgrund der Dominanz des Straßenverkehrs ist dessen Bestands- und Effizienzentwicklung für den Endenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors von entscheidender Bedeutung. Die Bestands- und Effizienzentwicklung wurden mit Hilfe der Verkehrsnachfrage und den Annahmen zur Neuzulassungsstruktur der Pkw und Lkw (siehe Abschnitte 5.5.1.6 und 5.5.1.8) mit dem Modell TEMPS ermittelt.

Tabelle 5-61 Fahrzeugbestand (Pkw und Lkw) im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	Tsd.				
Pkw	**41.737**	**43.289**	**44.519**	**44.355**	**42.352**
Dieselantrieb	27%	34%	32%	28%	25%
Benzinantrieb	73%	65%	57%	47%	40%
Plug-In-Hybridantrieb	0%	1%	9%	21%	30%
Elektroantrieb	0%	0%	2%	4%	6%
Leichte Nutzfahrzeuge	**1.876**	**2.165**	**2.468**	**2.579**	**2.503**
Dieselantrieb	92%	96%	90%	78%	70%
Benzinantrieb	8%	3%	0%	0%	0%
Plug-In-Hybridantrieb	0%	1%	8%	18%	25%
Elektroantrieb	0%	0%	2%	4%	5%
Lkw	**709**	**948**	**1.148**	**1.211**	**1.175**
Dieselantrieb	100%	99%	95%	89%	84%
Plug-In-Hybridantrieb	0%	1%	5%	11%	16%
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Pkw		4%	7%	6%	1%
Leichte Nutzfahrzeuge		15%	32%	37%	33%
Lkw		34%	62%	71%	66%

Quelle: Eigene Berechnungen mit TEMPS

Bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen ist im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) eine Verschiebung zu elektrisch angetriebenen Fahrzeugen erkennbar (Tabelle 5-61). Der Schwerpunkt bei der Verschiebung zu elektrischen Fahrzeugen liegt allerdings bei Plug-In-Hybridfahrzeugen, da diese die Reichweitenbeschränkungen rein elektrischer Fahrzeuge umgehen und keine grundsätzlichen Änderungen des Mobilitätsverhaltens angenommen werden. Klar ist damit zudem auch, dass die Fahrleistung von Plug-In-Hybridfahrzeugen nicht vollständig im elektrischen Modus erbracht wird und diese Fahrzeuge weiterhin fossile Kraftstoffe einsetzen. Aus den Strommarktmodellierungsläufen mit PowerFlex ergibt sich, dass je nach Modellierungsjahr und Reichweite der Batterie zwischen 75 % und 80 % der Fahrleistung im elektrischen Modus zurückgelegt werden.

Im Güterverkehr ist die Verschiebung hin zur direkten Nutzung von Strom deutlich geringer als im Personenverkehr. Dies ist vor allem damit zu erklären, dass angenommen wird, dass diese Technologie nur für Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht unter 12 t zur Verfügung steht. Ein Großteil der Fahrleistung wird allerdings von größeren Lkw erbracht, deren Bestand sich vollständig aus Dieselfahrzeugen zusammensetzt.

Abbildung 5-37 Endenergiebedarf des Verkehrssektors (Bilanzgrenze nach Nationalem Inventarbericht) im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Wird der Endenergiebedarf des Verkehrssektors betrachtet (Abbildung 5-37), ergibt sich bereits im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) eine erhebliche Reduktion des Energiebedarfs (-33 % gegenüber 2005). Dies ist vor allem auf den Personenverkehr zurückzuführen, in dem zwei Effekte zu der Verringerung des Energiebedarfs führen. Einerseits ist eine in den Annahmen eine erhebliche Effizienzsteigerung aller Fahrzeuge hinterlegt, so dass der Anstieg der Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr überkompensiert wird. Gleichzeitig findet eine Verschiebung zu elektrischen Antriebstechnologien (Abbildung 5-38) statt, die sich unter anderem durch eine höhere Effizienz im Betrieb der Fahrzeuge auszeichnet und somit die Effizienzsteigerung des Pkw-Bestands verstärkt.

Tabelle 5-62 Endenergiebedarf des Verkehrssektors nach Kraftstoffen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Personenverkehr	**1.570**	**1.563**	**1.329**	**1.102**	**986**	**903**
Benzin	984	820	531	384	308	259
Diesel	478	596	554	473	398	346
Kerosin	27	26	28	30	30	27
Biokraftstoffe	38	77	177	140	119	106
Strom	42	43	39	75	132	165
Veränderung gegenüber 2005		0%	-15%	-30%	-37%	-42%
nachrichtlich:						
inkl. int. Verkehre	-	*1.801*	*1.602*	*1.404*	*1.303*	*1.190*
int. Flugverkehr (fossil)	-	*238*	*272*	*302*	*316*	*287*
Güterverkehr	**704**	**661**	**735**	**737**	**694**	**628**
Benzin	9	4	1	0	0	0
Diesel	636	595	613	613	573	516
Kerosin	1	1	1	1	1	1
Biokraftstoffe	41	45	100	100	93	84
Strom	16	16	21	23	27	27
Veränderung gegenüber 2005		-6%	4%	5%	-1%	-11%
nachrichtlich:						
inkl. int. Verkehre	-	*875*	*991*	*1.043*	*0*	*1.018*
int. Flugverkehr (fossil)	-	*97*	*108*	*134*	*149*	*151*
int. Seeverkehr (fossil)	-	*116*	*148*	*173*	*201*	*239*
Gesamtverkehr	**2.273**	**2.224**	**2.064**	**1.839**	**1.681**	**1.531**
Veränderung gegenüber 2005	0%	-2%	-9%	-19%	-26%	-33%
nachrichtlich:						
inkl. int. Verkehre	*2.693*	*2.675*	*2.593*	*2.447*	*1.303*	*2.208*
int. Flugverkehr (fossil)	*315*	*335*	*380*	*435*	*465*	*438*
int. Seeverkehr (fossil)	*103*	*116*	*148*	*173*	*201*	*239*

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Güterverkehr steigt der Endenergiebedarf zunächst an. Dies ist auf die steigende Verkehrsnachfrage und im Vergleich zum Personenverkehr geringe Effizienzsteigerung der Fahrzeuge zurückzuführen. Langfristig wird der Nachfrageanstieg allerdings durch eine verstärkte Effizienzentwicklung überkompensiert und der Endenergiebedarf sinkt. Im Vergleich zum Personenverkehr ist die Reduktion der Energienachfrage gering, da die elektrischen Antriebsoptionen mit ihren erheblichen Effizienzvorteilen gegenüber verbrennungsmotorischen Fahrzeugen im Schwerlastverkehr nicht zur Verfügung stehen (siehe auch Abbildung 5-38).

Abbildung 5-38 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

In den Abbildungen nicht dargestellt ist die Entwicklung des Endenergiebedarfs der internationalen Verkehre (Luft- und Seeverkehr), die im Rahmen der Inventarberichterstattung bisher nicht oder nur als Memo-Item erfasst werden. Durch die hinterlegten Annahmen bezüglich der Verkehrsnachfrage steigt der Endenergiebedarf für diese Verkehrsträger erheblich, so dass sich der Endenergiebedarf des gesamten Verkehrssektors bei Einbeziehung dieser beiden Verkehrsträger in 2050 um 17 % gegenüber 2010 reduziert.

Tabelle 5-63 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Straßenpersonenverkehr	**1.484**	**1.261**	**1.037**	**926**	**851**
Dieselantrieb	632	636	529	432	370
Benzinantrieb	852	615	428	324	264
Plug-In-Hybridantrieb	0	10	75	159	202
Elektroantrieb	0	1	5	12	15
Straßengüterverkehr	**629**	**698**	**704**	**663**	**601**
Dieselantrieb	625	696	695	644	577
Benzinantrieb	4	1	0	0	0
Plug-In-Hybridantrieb	0	1	8	18	23
Elektroantrieb	0	0	0	1	1
Straßenverkehr - gesamt	**2.113**	**1.959**	**1.741**	**1.589**	**1.452**
Dieselantrieb	1.257	1.331	1.224	1.076	947
Benzinantrieb	856	616	428	324	264
Plug-In-Hybridantrieb	0	11	83	176	225
Elektroantrieb	0	1	6	13	16
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Straßenpersonenverkehr		-15%	-30%	-38%	-43%
Straßengüterverkehr		11%	12%	5%	-4%
Straßenverkehr - gesamt		-7%	-18%	-25%	-31%

Quelle: Eigene Berechnungen

5.5.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Im Klimaschutzszenario 80 wird einer umfassenderen Änderung des Mobilitätsverhaltens jüngerer Generationen Rechnung getragen, weg vom reinen Besitzen eines Pkws hin zum Benutzen statt Besitzen. Damit verbunden ist auch die Ausweitung der Intermodalität (z.B. durch Einbindung von Fahrradwegen in die gesamte Wegekette). Dies wird momentan bei der Personengruppe zwischen 18 und 25 Jahren beobachtet (TAB, 2012). In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass dieses Verhalten auch im höheren Alter zumindest teilweise beibehalten wird (Kohorteneffekt).

Unterstützt wird diese Entwicklung durch die deutliche Anhebung der Energiesteuersätze (vgl. dazu 5.5.1.1). Es findet zwar ein Wechsel auf andere, in der Nutzung günstigere Antriebsarten statt (siehe dazu die Neuzulassungsstruktur nach 2040 in 5.5.1.6); dennoch wird die motorisierte Individualmobilität im Vergleich zum Basisjahr 2010 teurer.

Abbildung 5-39 und Tabelle 5-64 zeigen die Auswirkungen dieser Veränderungen. Es findet kein Anstieg der durchschnittlichen Distanzen wie im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) statt und die Gesamtverkehrsnachfrage geht zurück. Die Auswirkungen der demographischen Veränderungen zeigen sich in diesem Szenario sehr viel deutlicher als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012).

Abbildung 5-39 Personenverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-64 Personenverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	Mrd. pkm				
Personenverkehr	**1.072**	**940**	**891**	**917**	**923**
Motorisierter Individualverkehr	885	796	754	787	801
Schienenverkehr	94	70	63	58	52
Busverkehr	83	62	59	56	54
Flugverkehr (national)	10	12	15	16	16
Veränderungen gegenüber 2010		-12%	-17%	-14%	-14%
inkl. internationale Verkehre	*1.256*	*1.172*	*1.175*	*1.249*	*1.256*
Flugverkehr (international)	*183*	*232*	*285*	*332*	*333*

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Auswirkungen der Anhebung der Lkw-Maut (vgl. 5.5.1.2) und der höheren Kraftstoffkosten auf den Güterverkehr sind in Abbildung 5-40 sowie Tabelle 5-65 zu sehen. Es findet eine deutliche Verlagerung von der Straße auf die Schiene statt. Allerdings geht dies mit einer Erhöhung der Gesamtverkehrsnachfrage einher. Der Schienenverkehr kann in der Regel nicht so direkt beliefern wie der Straßengüterverkehr, so dass vermehrt Umwegfahrten auftreten. Zudem erhöht sich zusätzlich noch der benötigte Verteilerverkehr.

Im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) wurde für das Klimaschutzszenario 80 eine niedrigere Pkw-Besitzquote angenommen, so dass die Zahl der

sich im Bestand befindlichen Pkw bis 2050 verringert. Im Güterverkehr ist im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ebenfalls ein Rückgang der Bestandzahlen zu erkennen, da sich im Klimaschutzszenario 80 eine Verlagerung zum Schienenverkehr ergibt. Deutlich sichtbar ist zudem die stärkere Elektrifizierung des Pkw-Bestands, so dass im Jahr 2050 nur noch ein geringer Anteil an rein konventionell betriebenen Pkw zum Einsatz kommt. Aufgrund der technologischen Beschränkung auf Lkw < 12 t ist dieser Effekt im Güterverkehr weit weniger stark ausgeprägt. Bei Lkw ist der Anteil von Plug-In-Hybridfahrzeugen sogar geringer als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), da durch die geringere Straßenverkehrsnachfrage weniger neue Fahrzeuge in den Bestand aufgenommen werden. Zudem wird im Klimaschutzszenario 80 die Nutzung von Methanfahrzeugen angenommen, die mit Biogas angetrieben werden, so dass im Jahr 2050 nur noch 6 % der Pkw alleine einen Diesel- oder Benzinantrieb[43] besitzen.

Abbildung 5-40 Güterverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnung

[43] In der Logik der Modellierung gehören Hybridfahrzeuge, d.h. Fahrzeuge mit einem Verbrennungs- und einem Elektromotor, die allerdings nur mit Diesel oder Benzin betankt werden, ebenfalls zu den Fahrzeugen mit Diesel- und Benzinantrieb.

Tabelle 5-65 Güterverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	Mrd. tkm				
Güterverkehr	**616**	**732**	**814**	**848**	**820**
Straße	446	508	571	586	557
Schiene	105	160	187	204	206
Binnenschifffahrt	65	64	56	58	57
Veränderungen gegenüber 2010		19%	32%	38%	33%
inkl. internationale Verkehre	*2.369*	*3.077*	*3.707*	*4.427*	*5.370*
Flugverkehr	*11*	*13*	*18*	*23*	*25*
Seeschifffahrt	*1.742*	*2.332*	*2.875*	*3.556*	*4.524*

Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 5-66 Fahrzeugbestand (Pkw und Lkw) im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	Tsd.				
Pkw	**41.737**	**41.951**	**41.894**	**40.830**	**38.719**
Dieselantrieb	27%	31%	19%	6%	1%
Benzinantrieb	73%	67%	55%	26%	5%
Erdgas-/Methanantrieb	0%	0%	5%	13%	15%
Plug-In-Hybridantrieb	0%	1%	18%	50%	72%
Elektroantrieb	0%	0%	2%	5%	7%
Leichte Nutzfahrzeuge	**1.876**	**2.140**	**2.403**	**2.466**	**2.345**
Dieselantrieb	92%	96%	87%	71%	60%
Benzinantrieb	8%	3%	0%	0%	0%
Plug-In-Hybridantrieb	0%	1%	10%	23%	33%
Elektroantrieb	0%	0%	2%	5%	7%
Lkw	**709**	**937**	**1.117**	**1.158**	**1.101**
Dieselantrieb	100%	99%	95%	90%	86%
Plug-In-Hybridantrieb	0%	1%	5%	10%	14%
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Pkw		1%	0%	-2%	-7%
Leichte Nutzfahrzeuge		14%	28%	31%	25%
Lkw		32%	58%	63%	55%

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) sinkt der Endenergiebedarf des Verkehrssektors erheblich (Abbildung 5-41 und Tabelle 5-67), was mit der niedrigeren Verkehrsnachfrage im Straßenverkehr zusammenhängt. Die höheren Mobilitätskosten haben dabei vor allem eine Auswirkung auf den Personenverkehr, dessen Endenergiebedarf um 65 % gegenüber dem Jahr 2005 absinkt. Die Reduktion des Endenergiebedarfs wird dabei allerdings noch durch eine stärkere Effizienzentwicklung des Fahrzeugbestands im Straßenverkehr verstärkt. Diese geht auf niedrigere spezifische Emissionen bei konventionellen Neuzulassungen und auf den höheren Anteil an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (siehe Abbildung 5-42) zurück.

Abbildung 5-41 Endenergiebedarf des Verkehrssektors (Bilanzgrenze nach Nationalem Inventarbericht) im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Güterverkehr wirkt sich ein weiterer Effekt positiv auf den Endenergiebedarf aus. Durch die veränderte Kostenstruktur werden im Klimaschutzszenario 80 mehr Güter auf der Schiene transportiert, so dass sich die Energieeffizienz des Gütertransports zusätzlich erhöht. Zudem sind für die Neuzulassungen im Straßengüterverkehr niedrigere Energieverbräuche zugrunde gelegt, so dass der Endenergieverbrauch des Güterverkehrs nur noch bis zum Jahr 2030 leicht ansteigt und sich bis zum Jahr 2050 erheblich gegenüber 2010 verringert.

Für die Bereitstellung der Energie wird im Klimaschutzszenario 80 eine maximale Menge an biogenen Kraftstoffen von 700 PJ angenommen. Dies führt dazu, dass im Personenverkehr in 2050 nur noch eine geringe Menge an fossilen Kraftstoffen eingesetzt wird und die Nutzung von biogenen Kraftstoffen und Strom als Antriebsenergie dominieren. Im Güterverkehr wird der Einsatz fossilen Kraftstoffe ebenfalls erheblich reduziert, so dass weniger als die Hälfte der Endenergie des Güterverkehrs aus fossilen Quellen stammt.

Im Klimaschutzszenario 80 kommen biogene Kraftstoffe erheblich auch in den internationalen Verkehren (Flugverkehr und Seeschifffahrt) zum Einsatz, da für 2050 eine Biokraftstoffquote von 50 % angenommen wird. Neben der Erhöhung des Biokraftstoffanteils ergibt sich auch in diesen beiden Transportbereichen trotz der Steigerung der Verkehrsnachfrage eine Verringerung des Endenergiebedarfs im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012). Diese wird durch effizientere Flugzeuge und Schiffe

erreicht, da unter anderem die Einhaltung der Selbstverpflichtung der Luftfahrtindustrie zugrunde gelegt wird. Dennoch ist bei Einbeziehung der internationalen Verkehre die Reduktion des Endenergiebedarfs mit -42 % in 2050 gegenüber dem Jahr 2005 geringer als ohne ihre Berücksichtigung.

Tabelle 5-67 Endenergiebedarf des Verkehrssektors nach Kraftstoffen im Klimaschutzszenario 80, 2010 – 2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Personenverkehr	**1.570**	**1.563**	**1.242**	**843**	**639**	**546**
Benzin	984	820	516	313	141	37
Diesel	478	596	493	241	78	21
Kerosin	27	26	27	26	20	11
Biokerosin	0	0	0	1	7	11
Biokraftstoffe	38	77	164	142	115	125
Biogas	0	0	2	37	75	77
Strom	42	43	39	82	204	264
Veränderung gegenüber 2005	-	0%	-21%	-46%	-59%	-65%
nachrichtlich:						
inkl. int. Verkehre	-	*1.801*	*1.507*	*1.120*	*915*	*784*
int. Flugverkehr (fossil)	-	*238*	*265*	*264*	*207*	*119*
int. Flugverkehr (Biokraftstoff)	-	*0*	*0*	*14*	*69*	*119*
Güterverkehr	**704**	**661**	**698**	**665**	**578**	**468**
Benzin	9	4	1	0	0	0
Diesel	636	595	579	509	381	217
Kerosin	1	1	1	1	1	0
Biokerosin	0	0	0	0	0	0
Biokraftstoffe	41	45	94	127	163	217
Strom	16	16	23	28	32	33
Veränderung gegenüber 2005	-	-6%	-1%	-5%	-18%	-34%
nachrichtlich:						
inkl. int. Verkehre	-	*873*	*942*	*942*	*876*	*780*
int. Flugverkehr (fossil)	-	*97*	*105*	*117*	*98*	*63*
int. Flugverkehr (Biokraftstoff)	-	*0*	*0*	*6*	*33*	*63*
int. Seeverkehr (fossil)	-	*115*	*139*	*146*	*126*	*93*
int. Seeverkehr (Biokraftstoff)	-	*0*	*0*	*8*	*42*	*93*
Gesamtverkehr	**2.273**	**2.224**	**1.940**	**1.508**	**1.216**	**1.014**
Veränderung gegenüber 2005	0%	-2%	-15%	-34%	-47%	-55%
nachrichtlich:						
inkl. int. Verkehre	*2.693*	*2.674*	*2.449*	*2.063*	*1.791*	*1.565*
int. Flugverkehr (fossil)	*315*	*335*	*369*	*381*	*305*	*182*
int. Flugverkehr (Biokraftstoff)	*0*	*0*	*0*	*20*	*102*	*182*
int. Seeverkehr (fossil)	*103*	*115*	*139*	*146*	*126*	*93*
int. Seeverkehr (Biokraftstoff)	*0*	*0*	*0*	*8*	*42*	*93*

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-42 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-68 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Klimaschutzszenario 80, 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Straßenpersonenverkehr	**1.484**	**1.137**	**755**	**437**	**486**
Dieselantrieb	632	532	262	70	9
Benzinantrieb	852	599	370	144	24
Erdgas-/Methanantrieb	0	2	37	75	77
Plug-In-Hybridantrieb	0	4	84	145	363
Elektroantrieb	0	0	3	3	14
Straßengüterverkehr	**629**	**659**	**627**	**540**	**433**
Dieselantrieb	625	656	618	521	409
Benzinantrieb	4	1	0	0	0
Plug-In-Hybridantrieb	0	1	8	18	22
Elektroantrieb	0	0	1	1	2
Straßenverkehr - gesamt	**2.113**	**1.796**	**1.382**	**976**	**919**
Dieselantrieb	1.257	1.189	879	591	418
Benzinantrieb	856	600	370	144	24
Erdgas-/Methanantrieb	0	2	37	75	77
Plug-In-Hybridantrieb	0	5	92	163	385
Elektroantrieb	0	0	4	4	15
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Straßenpersonenverkehr		-23%	-49%	-71%	-67%
Straßengüterverkehr		5%	0%	-14%	-31%
Straßenverkehr - gesamt		-15%	-35%	-54%	-57%

Quelle: Eigene Berechnungen

5.5.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Das Klimaschutzszenario 90 unterscheidet sich in seinen Grundannahmen nicht erheblich vom Klimaschutzszenario 80. Allerdings wird der motorisierte Individualverkehr weiter verteuert und führt somit zu einer insgesamt noch weiter abnehmenden Verkehrsnachfrage. Die Personenverkehrsnachfrage bleibt also, gemessen an der Gesamtbevölkerung, relativ konstant und nimmt nur aufgrund des Bevölkerungsrückganges und der demographischen Veränderungen (geringere Wegeraten bei nicht mehr erwerbstätigen Personen) ab. Auch wenn sich hier der Eindruck aufdrängt, dass die insgesamt abnehmende Personenverkehrsnachfrage (vgl. Abbildung 5-35) eine Mobilitätseinschränkung bedeutet, so stimmt dies nicht. Es findet vielmehr, wie unten beschrieben, eine Verkehrsverlagerung hin zu nicht motorisierten Verkehrsträgern statt, welche sich somit nicht in der Verkehrsnachfrage in Abbildung 5-43 widerspiegelt. Die Forderung des EU-Weißbuchs Verkehr (Europäische Kommission, 2009a) wird damit erfüllt.

Abbildung 5-43 und Tabelle 5-69 zeigen, dass die zusätzlichen Maßnahmen im Klimaschutzszenario 90 im Vergleich zum Klimaschutzszenario 80 ein weiteres Absinken der

gesamten motorisierten Verkehrsnachfrage bewirken. Die Unterschiede zwischen den beiden Szenarien sind allerdings vergleichsweise gering.

Abbildung 5-43 Personenverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-69 Personenverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 90

	2010	2020	2030	2040	2050
	Mrd. pkm				
Personenverkehr	**1.072**	**938**	**884**	**915**	**868**
Motorisierter Individualverkehr	885	794	749	785	753
Schienenverkehr	94	70	63	58	49
Busverkehr	83	62	58	56	50
Flugverkehr (national)	10	12	14	16	16
Veränderungen gegenüber 2010		-13%	-18%	-15%	-19%
inkl. internationale Verkehre	*1.256*	*1.170*	*1.167*	*1.243*	*1.197*
Flugverkehr (international)	*183*	*231*	*283*	*328*	*329*

Quelle: Eigene Berechnungen

In Tabelle 5-70 ist die Aufteilung der zurückgelegten Wege nach Verkehrsträger für das Basisjahr 2010 sowie die drei Projektionen in 2050 nach insgesamt zurückgelegten Wegen dargestellt. Das Auto behält zwar seine dominierende Stellung bei, allerdings zeigt sich zwischen den Szenarien auch eine größere Verschiebung hin zu den nicht motorisierten Verkehrsträgern (höherer Anteil von Rad- und Fußwegen). Die in Abschnitt 5.5.3 beschriebene Änderung des Mobilitätsverhaltens kann somit in moderatem Umfang auch in der Verkehrsträgerwahl beobachtet werden. Das Verkehrsauf-

kommen über alle Fortbewegungsmittel hinweg wird im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) umweltverträglicher. Das Fahrrad wird als Verkehrsträger immer wichtiger; das „Wahrnehmungspotenzial“ steigt demnach (Ahrens et al., 2012). Gemeint ist damit, dass das Fahrrad zunehmend als vollwertiger Verkehrsträger zur Überbrückung von Distanzen wahrgenommen wird und z.B. als Option für Pendler stärker ins Bewusstsein rückt. Angemerkt werden kann bei dieser Verkehrsverhaltensänderung, dass als positiver Nebeneffekt neben den Umweltwirkungen ein größerer Gesundheitsnutzen für die betroffenen Verkehrsteilnehmer entsteht (Doll et al., 2012).

Tabelle 5-70 Szenarienvergleich: Modal Split im Personenverkehr (Wege)

	Motorisierter Individualverkehr	Busverkehr	Schienenverkehr	Fahrrad	Zu Fuß
	%				
Basisjahr 2010	61,7	3,3	3,4	11,9	19,7
Projektion 2050					
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario	62,8	2,4	2,1	12,4	20,3
Klimaschutzszenario 80	60,0	2,4	2,3	13,8	21,4
Klimschutzszenario 90	59,4	2,5	2,3	14,1	21,7

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Güterverkehr findet eine weitere Verschiebung der Verkehrsträger zum Schienenverkehr statt. In Abbildung 5-44 sowie Tabelle 5-71 ist – wie auch schon im Klimaschutzszenario 80– zu sehen, dass dies durch vermehrte Umwegfahrten und stärkere Verteilerverkehre mit einer Erhöhung des Gesamtverkehrsnachfrage einhergeht.

Abbildung 5-44 Güterverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-71 Güterverkehrsnachfrage im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	Mrd. tkm				
Güterverkehr	**616**	**731**	**812**	**847**	**825**
Straße	446	509	571	586	556
Schiene	105	160	187	205	213
Binnenschifffahrt	65	62	54	56	56
Veränderungen gegenüber 2010		19%	32%	38%	34%
inkl. internationale Verkehre	*2.369*	*3.076*	*3.705*	*4.426*	*5.375*
Flugverkehr	*11*	*13*	*18*	*23*	*25*
Seeschifffahrt	*1.742*	*2.332*	*2.875*	*3.556*	*4.524*

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Vergleich zum Klimaschutzszenario 80 verringert sich der Pkw- und Lkw-Bestand geringfügig, was auf die geringere Pkw-Besitzquote und die geringere Nachfrage im Personen- und Güterverkehr zurückzuführen ist. Der Anteil konventioneller, verbrennungsmotorischer Antriebssysteme geht stärker zurück (5 % der Pkw in 2050) als im Klimaschutzszenario 80, da mit der Brennstoffzellentechnologie ab 2030 eine weitere Antriebsoption für große Teile des Verkehrssektors zur Verfügung steht. Die absolute Reduktion der Fahrzeuge und der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen führt allerdings ebenfalls dazu, dass der Anteil am Bestand als auch die absolute Anzahl elektrisch angetriebener Fahrzeuge geringer ist als im Klimaschutzszenario 80 und sich somit die direkte Nutzung von Strom im Verkehrssektor verringert.

Tabelle 5-72 Fahrzeugbestand (Pkw und Lkw) im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	Tsd.				
Pkw	**41.737**	**41.951**	**41.894**	**39.913**	**37.346**
Dieselantrieb	27%	31%	19%	6%	1%
Benzinantrieb	73%	66%	53%	23%	4%
Erdgas-/Methanantrieb	0%	0%	5%	13%	15%
Plug-In-Hybridantrieb	0%	2%	22%	53%	68%
Elektroantrieb	0%	0%	2%	5%	7%
Brennstoffzellenantrieb	0%	0%	0%	0%	5%
Leichte Nutzfahrzeuge	**1.876**	**2.141**	**2.404**	**2.468**	**2.341**
Dieselantrieb	92%	96%	88%	70%	49%
Benzinantrieb	8%	3%	0%	0%	0%
Plug-In-Hybridantrieb	0%	1%	9%	23%	32%
Elektroantrieb	0%	0%	2%	5%	7%
Brennstoffzellenantrieb	0%	0%	0%	3%	11%
Lkw	**709**	**937**	**1.117**	**1.159**	**1.099**
Dieselantrieb	100%	99%	96%	89%	81%
Plug-In-Hybridantrieb	0%	1%	4%	10%	14%
Brennstoffzellenantrieb	0%	0%	0%	1%	5%
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Pkw		1%	0%	-4%	-11%
Leichte Nutzfahrzeuge		14%	28%	32%	25%
Lkw		32%	58%	64%	55%

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Endenergiebedarf des Verkehrssektors liegt im Klimaschutzszenario 90 wie die Verkehrsnachfrage geringfügig unter den Werten des Klimaschutzszenario 80s (-3 %). Dies ist mit der nur leicht veränderten Struktur der Verkehrsnachfrage und den ähnlichen Effizienzentwicklungen der beiden Szenarien zu erklären. Die Einbeziehung der Brennstoffzellenfahrzeuge hat zwei gegenläufige Effekte bei der Bestimmung des Endenergiebedarfs. Ersetzen Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zum Klimaschutzszenario 80 konventionelle Fahrzeuge, erhöht sich die Effizienz des Bestands; werden dadurch allerdings elektrische Fahrzeuge ersetzt, ergibt sich ein leicht höherer Energiebedarf je Kilometer.

Abbildung 5-45 Endenergiebedarf des Verkehrssektors (Bilanzgrenze nach Nationalem Inventarbericht) im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Die im Verkehrssektor eingesetzte Menge nicht-fossiler Energieträger sinkt im Klimaschutzszenario 90 bis 2050 stark ab. Werden nur die in der THG-Berichterstattung erfassten Bereiche des Verkehrssektors betrachtet, liegt der Anteil von fossilen Kraftstoffen[44] im Jahr 2050 bei 28 %. Im Personenverkehr sinkt der Anteil nicht fossiler Energieträger bis zum Jahr 2050 sogar auf 12 %. Durch die geringere Durchdringung alternativer Antriebssysteme (sh. Tabelle 5-72 und Tabelle 5-74) im Güterverkehr liegt der nicht fossile Anteil des Endenergiebedarfs in 2050 dagegen bei 46 %. Die Verringerung des fossilen Kraftstoffeinsatzes kann im Vergleich zum Klimaschutzszenario 80 dabei vor allem auf die gesunkene Verkehrsnachfrage im Straßenverkehr und den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen zurückgeführt werden.

[44] Strom und Wasserstoff werden in dieser Bilanz als alternative Energieträger gezählt, auch wenn Teile des bei der Herstellung eingesetzten Stroms fossilen Ursprungs sein können.

Tabelle 5-73 Endenergiebedarf des Verkehrssektors nach Kraftstoffen im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Personenverkehr	**1.570**	**1.563**	**1.222**	**809**	**621**	**520**
Benzin	984	820	509	285	125	34
Diesel	478	596	485	220	70	19
Kerosin	27	26	27	26	19	11
Biokerosin	0	0	0	1	6	11
Biokraftstoffe	38	77	162	131	106	111
Biogas	0	0	1	32	72	73
Wasserstoff	0	0	0	0	3	23
Strom	42	43	37	114	220	237
Veränderung gegenüber 2005		0%	-22%	-48%	-60%	-67%
nachrichtlich:						
inkl. int. Verkehre	*-*	*1.801*	*1.485*	*1.084*	*895*	*755*
int. Flugverkehr (fossil)	*-*	*238*	*263*	*261*	*205*	*118*
int. Flugverkehr (Biokraftstoff)	*-*	*0*	*0*	*14*	*68*	*118*
Güterverkehr	**704**	**661**	**699**	**666**	**578**	**466**
Benzin	9	4	1	0	0	0
Diesel	636	595	580	510	380	212
Kerosin	1	1	1	1	1	0
Biokerosin	0	0	0	0	0	0
Biokraftstoffe	41	45	95	128	163	212
Wasserstoff	0	0	0	0	2	8
Strom	16	16	22	27	32	33
Veränderung gegenüber 2005		-6%	-1%	-5%	-18%	-34%
nachrichtlich:						
inkl. int. Verkehre	*-*	*873*	*942*	*943*	*876*	*779*
int. Flugverkehr (fossil)	*-*	*97*	*105*	*117*	*98*	*63*
int. Flugverkehr (Biokraftstoff)	*-*	*0*	*0*	*6*	*33*	*63*
int. Seeverkehr (fossil)	*-*	*115*	*139*	*146*	*126*	*93*
int. Seeverkehr (Biokraftstoff)	*-*	*0*	*0*	*8*	*42*	*93*
Gesamtverkehr	**2.273**	**2.224**	**1.920**	**1.475**	**1.199**	**987**
Veränderung gegenüber 2005		-2%	-16%	-35%	-47%	-57%
nachrichtlich:						
inkl. int. Verkehre	*2.692*	*2.674*	*2.427*	*2.027*	*1.771*	*1.535*
int. Flugverkehr (fossil)	*315*	*335*	*368*	*378*	*303*	*181*
int. Flugverkehr (Biokraftstoff)	*0*	*0*	*0*	*20*	*101*	*181*
int. Seeverkehr (fossil)	*103*	*115*	*139*	*146*	*126*	*93*
int. Seeverkehr (Biokraftstoff)	*0*	*0*	*0*	*8*	*42*	*93*

Quelle: Eigene Berechnungen

Allgemein verringert sich der Endenergiebedarf des Verkehrssektors bis zum Jahr 2050 um -57 % gegenüber 2005, wenn nur die nationalen Verkehre in die Bilanz mit einbezogen werden. Wie im Klimaschutzszenario 80 wird im Jahr 2050 eine Biokraftstoffquote von mindestens 50 % in allen Verkehrsbereichen erreicht, so dass auch im Flug- und Seeverkehr THG-Emissionen verringert werden. Unter Berücksichtigung der internationalen Verkehre liegt die Reduktion des Endenergiebedarfs allerdings nur bei -

43 % gegenüber 2005 und der Anteil fossiler Energieträger verringert sich bis 2050 bei denselben Bilanzgrenzen auf 36 %.

Abbildung 5-46 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Klimaschutzszenario 90, 2010 – 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-74 Endenergiebedarf des Straßenverkehrs im Klimaschutzszenario 90, 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Straßenpersonenverkehr	**1.484**	**1.153**	**722**	**552**	**483**
Dieselantrieb	632	555	259	79	24
Benzinantrieb	852	588	323	112	18
Erdgas-/Methanantrieb	0	1	32	72	73
Plug-In-Hybridantrieb	0	8	105	281	354
Elektroantrieb	0	0	3	8	14
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	3	23
Straßengüterverkehr	**629**	**659**	**627**	**537**	**423**
Dieselantrieb	625	657	619	519	399
Benzinantrieb	4	1	0	0	0
Plug-In-Hybridantrieb	0	1	7	17	22
Elektroantrieb	0	0	1	1	2
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	2	8
Straßenverkehr - gesamt	**2.113**	**1.813**	**1.349**	**1.090**	**905**
Dieselantrieb	1.257	1.212	878	598	423
Benzinantrieb	856	589	323	112	18
Erdgas-/Methanantrieb	0	1	32	72	73
Plug-In-Hybridantrieb	0	9	112	298	376
Elektroantrieb	0	0	4	9	15
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	5	32
	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2010				
Straßenpersonenverkehr		-22%	-51%	-63%	-67%
Straßengüterverkehr		5%	0%	-15%	-33%
Straßenverkehr - gesamt		-14%	-36%	-48%	-57%

Quelle: Eigene Berechnungen

5.5.5 Vergleich der Szenarien

In diesem Abschnitt werden die drei entwickelten Szenarien für den Verkehrssektor gegenüber gestellt und miteinander verglichen. Dabei wird vor allem auf den Endenergiebedarf und die THG-Emission eingegangen.

Der Endenergiebedarf der drei Szenarien ist in Abbildung 5-47 und Tabelle 5-75 dargestellt; Tabelle 5-76 zeigt die Emissionsentwicklungen für CO_2, CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050.

Bei Betrachtung des Endenergiebedarfs ist dabei zu erwähnen, dass die Erzeugung der Kraftstoffe nicht in der Energiebilanz mit aufgeführt sind und diese in den übrigen Sektoren mit einberechnet ist. Bei der Darstellung der THG-Emissionen wird dabei nach der Sektoraufteilung der THG-Inventarberichterstattung bilanziert, so dass im Verkehrssektor nur die direkten Emissionen der fossilen Kraftstoffe ausgewiesen werden. Die alternativen Kraftstoffe wie beispielsweise Biokraftstoffe, Wasserstoff und Strom weisen in ihrer Vorkette THG-Emissionen auf, die den jeweiligen Umwandlungs-

prozessen und dem Stromsektor zugeordnet werden und in diesen Berichtsteilen aufgeführt sind. In diesem Kapitel beziehen sich daher alle Emissionswerte auf den Einsatz fossiler Kraftstoffe; ein Gesamtüberblick über die vom Verkehrssektor verursachten Emissionen, in dem die Umwandlungssektoren in die Bilanz mit einbezogen sind, ist dagegen in der Verursacherbilanz im Anhang dargestellt.

Abbildung 5-47 Endenergiebedarf im Verkehrsektor im Vergleich der Szenarien, 1990 - 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Endenergiebedarf im Verkehrssektor (nur nationale Verkehre) sinkt im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bis 2050 um 33 % gegenüber 2005. Dies ist dabei vor allem auf die verbesserte Effizienz der Fahrzeuge und die Integration der Elektromobilität in den Verkehrssektor zurückzuführen. Dem entgegen steht eine weiter ansteigende Verkehrsleistung sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr. Werden die internationalen Verkehre in die Betrachtung mit einbezogen, ergibt sich ein geringerer Rückgang des Endenergieverbrauchs (18 %), da die Verkehrsleistung im Flugverkehr und in der Seeschifffahrt erheblich bis 2050 ansteigt.

Die Emissionen der Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O (inkl. internationaler Verkehre) gehen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) in der Periode 2005 bis 2050 von 189 Mio. t CO_2-Äqu. auf 136 Mio. t CO_2-Äqu., also um insgesamt etwa 53 Mio. t CO_2-Äqu. zurück. Dies entspricht einem Rückgang um 28 % der Emissionen im Zeitraum von 2005 bis 2050, da sich durch den Einsatz von Strom und Biokraftstoffen eine zusätzliche Verringerung der fossilen Kraftstoffe einstellt. Im Zeitraum bis 2020 werden die Emissionen des Verkehrssektors um 11 % gegenüber 2005 gemindert.

Tabelle 5-75 Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Vergleich der Szenarien, 1990 - 2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Endenergiebedarf						
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario	2.273	2.224	2.064	1.839	1.681	1.531
Klimaschutzszenario 80	2.273	2.224	1.940	1.508	1.216	1.014
Klimschutzszenario 90	2.273	2.224	1.920	1.475	1.199	987
Endenergiebedarf inkl. int.Verkehr						
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario	2.693	2.675	2.593	2.447	1.303	2.208
Klimaschutzszenario 80	2.693	2.675	2.449	2.063	1.791	1.565
Klimschutzszenario 90	2.693	2.675	2.427	2.027	1.771	1.535
	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	Veränderung gegenüber 2005					
Endenergiebedarf						
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario		-2%	-9%	-19%	-26%	-33%
Klimaschutzszenario 80		-2%	-15%	-34%	-47%	-55%
Klimschutzszenario 90		-2%	-16%	-35%	-47%	-57%
Endenergiebedarf inkl. int.Verkehr						
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario		-1%	-4%	-9%	-52%	-18%
Klimaschutzszenario 80		-1%	-9%	-23%	-33%	-42%
Klimschutzszenario 90		-1%	-10%	-25%	-34%	-43%

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Verkehrsleistung verringert sich im Klimaschutzszenario 80 erheblich im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012). Zudem wird in den meisten Teilbereichen des Verkehrssektors von einer stärkeren Effizienzentwicklung als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario ausgegangen, so dass Endenergiebedarf gegenüber 2005 um 55 % bzw. bei Einbeziehung der internationalen Verkehre um 42 % zurückgeht. Die Treibhausgasemissionen liegen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 42 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 147 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Dies bedeutet eine Emissionsreduktion um 78 % innerhalb der Periode 2005 bis 2050; bis zum Jahr 2020 werden die Emissionen in diesem Szenario bereits um 16 % im Vergleich zu 2005 reduziert.

Der Rückgang der Emissionen ist neben der verringerten Verkehrsleistung und der gesteigerten Effizienz der Fahrzeuge auf die Verlagerung von Güterverkehr auf die Schiene und den Einsatz alternativer Technologien zurückzuführen, womit sich der Einsatz fossiler Kraftstoffe deutlich reduziert. Beim Einsatz alternativer Technologien und alternativer Energieträger werden die Emissionen nicht bei der Nutzung der Fahrzeuge erzeugt, sondern bei der Herstellung der Kraftstoffe, so dass sie in anderen Sektoren bilanziell einfließen. Rechnet man die Emissionen der Stromproduktion für Elektrofahrzeuge und die Emissionen der Biokraftstoffherstellung dem Verkehrssektor zu, würde sich daher eine geringere Treibhausgasminderung als 78 % ergeben.

Das Klimaschutzszenario 90 ist ähnlich ausgestaltet wie das Klimaschutzszenario 80, so dass die Endenergiebedarfsentwicklung und die Emissionsänderung im Klimaschutzszenario 90 im Jahr 2050 in derselben Größenordnung wie im Klimaschutzszenario 80 liegen. Der Endenergiebedarf des Klimaschutzszenario 90s für das Jahr 2050

liegt auf Grund einer zusätzlichen Reduktion der Verkehrsleistung 28 PJ unter dem des Klimaschutzszenario 80s. Im Vergleich zum Klimaschutzszenario 80 sinken die THG-Emissionen vor 2050 etwas schneller als im Klimaschutzszenario 90, so dass sich bis 2020 eine Emissionsreduktion um 17 % gegenüber 2005 einstellt. Durch den Einsatz von Wasserstoff geht der Anteil fossiler Energieträger dabei leicht stärker zurück als im Klimaschutzszenario 80.

Tabelle 5-76 Emissionsentwicklungen für den Verkehrssektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CO_2-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	177.553	187.159	182.564				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				165.742	154.982	145.226	134.293
Klimaschutzszenario 80				156.098	118.823	77.256	41.386
Klimaschutzszenario 90				154.907	115.073	75.206	40.581
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	1.116	276	177				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				157	158	182	183
Klimaschutzszenario 80				133	100	69	48
Klimaschutzszenario 90				248	167	106	70
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	1.390	1.331	1.589				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				1.702	1.735	1.783	1.693
Klimaschutzszenario 80				1.520	1.272	1.042	870
Klimaschutzszenario 90				1.510	1.232	988	776
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	180.059	188.766	184.330				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				167.602	156.875	147.190	136.168
Klimaschutzszenario 80				157.752	120.195	78.366	42.304
Klimaschutzszenario 90				156.664	116.472	76.300	41.428
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-6,9	-12,9	-18,3	-24,4
Klimaschutzszenario 80				-12,4	-33,2	-56,5	-76,5
Klimaschutzszenario 90				-13,0	-35,3	-57,6	-77,0
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-11,2	-16,9	-22,0	-27,9
Klimaschutzszenario 80				-16,4	-36,3	-58,5	-77,6
Klimaschutzszenario 90				-17,0	-38,3	-59,6	-78,1
Anmerkungen: hier ohne bauwirtschaftlichen Verkehr und Pipeline-Transport sowie mit internationalem Flugverkehr und Hochseeschifffahrt							

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

5.6 Erneuerbare und fossile Stromerzeugung

5.6.1 Annahmen und Parameter

Im Folgenden werden wesentliche Modellannahmen beschrieben, sofern sie über die in Kapitel 4 vorgegebenen Rahmendaten hinausgehen.

Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen

Die Lebensdauer legt den Stilllegungszeitpunkt der Kraftwerke fest. Es handelt sich dabei um die technische Lebensdauer der Kraftwerke. Dabei können Investitionen, die die Lebensdauer verlängern, berücksichtigt werden, sofern sie einen signifikanten Teil der Kraftwerke eines Typs betreffen. So wurde beispielsweise die Lebensdauer von Braunkohle- und Steinkohlekraftwerken mit 45 Jahren angegeben, da im Zuge der Einführung der Großfeuerungsanlagenverordnung (13. BImSchV) in den 80er und 90er Jahren viele Kraftwerke Nachrüstungsmaßnahmen unterzogen wurden. Kraftwerke, die überwiegend strommarktbetrieben erzeugen (fossile Kondensationskraftwerke), orientieren sich an der Wirtschaftlichkeit des Kraftwerksbetriebs. Decken die Stromerlöse die jährlichen Fixkosten (v.a. Personal, Wartung und Instandhaltung), so kann das Kraftwerk Retrofitmaßnahmen durchführen und so über die technische Lebensdauer hinaus Strom erzeugen. Sofern der Kraftwerksbetrieb unwirtschaftlich ist, so kann das Kraftwerk vor Erreichen der technischen Lebensdauer in Kaltreserve gehen (und wird am Ende der technischen Lebensdauer stillgelegt). Tabelle 5-77 zeigt die bei der Modellierung angesetzten technischen Lebensdauern.

Tabelle 5-77 Technische Lebensdauer der Bestandskraftwerke

Kraftwerkstyp	Lebensdauer der Kraftwerke in Jahren
Steinkohle	45
Steinkohle (KWK)	45
Braunkohle	45
Braunkohle (KWK)	45
Erdgas	30 (Gasturbinen), 35 (andere)
Erdgas (KWK)	20 (BHKW), 30 (Gasturbinen), 40 (andere)
Kernenergie	nach AtG 2011
Öl	20 (BHKW), 30 (Gasturbinen), 35 (andere)
Erneuerbare (Wind, Geothermie, Photovoltaik, Biogas)	20
Abfall und Biomasse	35
Wasser	100
Sonstige	30-35

Quelle: ELIAS, Öko-Institut

Zubauoptionen

Nach Ermittlung des Investitionsbedarfs, der sich aus dem Ausscheiden alter Kraftwerke sowie aus der Entwicklung der Stromnachfrage ergibt, wird dieser durch den Zubau neuer Kraftwerke gedeckt. Dabei werden zunächst die Technologien mit einem Mindestzubau berücksichtigt und die verbleibende Lücke in Abhängigkeit von der Höhe der jeweiligen finanzmathematischen Durchschnittskosten der einzelnen Kraftwerkstypen geschlossen. Hierfür werden die finanzmathematischen Durchschnittskosten verschiedener neuer Kondensationskraftwerke und Heizkraftwerke (KWK-Anlagen) ermittelt. In die Berechnung fließen die Investitionskosten mit Bauherreneigenleistung, die Zinsen

während der Bauzeit, die fixen Betriebskosten (Personalkosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten, Versicherungskosten) sowie die variablen Betriebskosten[45] ein. Tabelle 5-78 und Tabelle 5-79 zeigen ausgewählte technische Daten und Kostenpositionen in der Übersicht.[46] Weitere Kosten bzw. Erträge ergeben sich aus den Brennstoff- und CO_2-Preisen (Abschnitte 4.2 und 4.3) sowie den politischen Maßnahmen im Kraftwerksbereich (siehe unten). Alle Kosten- und Preisdaten werden in realen Preisen ($€_{2010}$) angegeben.

Tabelle 5-78 Ausgewählte Daten von Neubaukraftwerken

	Einheit	Steinkohle	Braunkohle	Erdgas GuD	Erdgas GuD	Gasturbine
Elektrische Leistung	MW	750	950	800	400	250
Elektrischer Wirkungsgrad	%	45	43	60	60	40
Investitionskosten	$€_{2010}/kW_{el}$	1.300	1.900	950	950	450
Abschreibungsdauer	a	30	30	20	20	20
Personalstärke	Angestellte	82	98	41	25	15
Wartung und Instandhaltung	$€_{2010}/(kW_{el} \cdot a)$	27,8	38,9	12,2	12,2	6,7
Versicherung	% der Investitionskosten	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Variable Betriebskosten	$€_{2010}/MWh_{el}$	2,0	2,3	0,5	0,5	0,5
Spezifische CO_2-Emissionen	gCO_2/kWh_{el}	752	938	336	336	504

Quelle: ELIAS, Öko-Institut

Tabelle 5-79 Ausgewählte Daten von Neubaukraftwerken (KWK-Anlagen)

	Einheit	Erdgas GuD	Erdgas GuD	Erdgas GuD	Steinkohle (Industrie)	Steinkohle (Fernwärme)
Elektrische Leistung	MW	30	100	407	320	320
Thermische Leistung	MW	40	110	426	550	550
Elektrischer Wirkungsgrad	%	41,1	45,7	49,1	33,7	42,5
Investitionskosten	$€_{2010}/kW_{el}$	1.250	1.150	1.000	2.050	2.050
Abschreibungsdauer	a	15	15	15	15	15
Personalstärke	Angestellte	6	20	33	164	164
Wartung und Instandhaltung	$€_{2010}/(kW_{el} \cdot a)$	50,0	32,5	27,5	70,0	70,0
Versicherung	% der Investitionskosten	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Variable Betriebskosten	$€_{2010}/MWh_{el}$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Spezifische CO_2-Emissionen	gCO_2/kWh_{el}	490	441	410	1.005	796

Quelle: ELIAS, Öko-Institut

Für die Berechnungen wird ein kalkulatorischer Zinssatz von 9 % zu Grunde gelegt.

[45] Die variablen Kosten schließen beispielsweise die Kosten der Rauchgasentschwefelung sowie verwendete Hilfsstoffe ein.

[46] Alle Angaben beziehen sich auf das Jahr 2020.

Mindestzubau sowie Zubaubeschränkungen

Für eine Reihe von Zubauoptionen sind obere beziehungsweise untere Begrenzungen zu berücksichtigen, die im Modell durch Bounds abgebildet werden:

- Die Braunkohlenverstromung in Deutschland ist durch die Erschließbarkeit von Braunkohlenvorkommen eingeschränkt. Im Rahmen der Modellierung wurde der Zubau von neuen Braunkohlekraftwerken deshalb auf rund 110 TWh bis 2030 (170 TWh im Jahr 2050) begrenzt. Zusammen mit den Bestandskraftwerken entspricht dies etwa der oberen Begrenzung, die in DIW et al. (1999) in Ansatz gebracht wurde.
- Die verfügbaren Wärmesenken für große KWK-Anlagen (vor allem der Größenklasse mit elektrischen Leistungen über 200 MW) sind in Deutschland begrenzt. Der Ausbau von KWK-Anlagen der oberen Leistungsklassen wurde deshalb – bei einem stetigen Anstieg dieser Bounds – bis zum Jahr 2030 auf eine maximale Stromerzeugung von insgesamt 64 TWh (für Heizkraftwerke sowie industrielle KWK-Anlagen) begrenzt[47].
- Die installierte Leistung aus erneuerbaren Energien im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) und im Klimaschutzszenario 80 wird aus der Leitstudie 2011 (Szenario A) übernommen (Tabelle 5-80)[48] (DLR, IWES, IfnE 2012). Um die Erreichung des 2-Grad-Ziels sicherzustellen, wurde angenommen, dass der EE-Ausbau noch verstärkt werden wird. Die tatsächliche Stromerzeugung in inländischen EE-Anlagen wird im Kraftwerkseinsatzmodell PowerFlex ermittelt.
- Die Stromerzeugung in ausländischen EE-Anlagen, der nach Deutschland importiert wird (EE-Import), wird direkt aus den Ergebnissen des PowerACE-Modells übernommen. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Stroms ist eine Aufteilung in konventionellen und erneuerbaren Strom jedoch nicht möglich. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Verteilung des Imports bezüglich EE und konventionellem Strom derjenigen des in diesem Jahr resultierenden europäischen Durchschnitts (ohne Deutschland) entspricht. Dabei wird für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (AMS (2012)) wird von einer überwiegend inländischen Bedarfsdeckung ausgegangen. Für das Klimaschutzszenario 80 (KS 80) und das Klimaschutzszenario 90 (KS 90) wird davon ausgegangen, dass 2030 5%, 2040 10% und 2050 15% des deutschen Strombedarfs aus Importen bestehen darf.

Es wird davon ausgegangen, dass diejenigen Kraftwerke, die sich in einem vorgeschrittenen Planungs- oder Baustadium befinden, auch tatsächlich gebaut werden, unabhängig davon, welche Politiken und Maßnahmen umgesetzt werden. Diese Kraft-

[47] Keine Erschließung weiterer Wärmesenken nach 2030.

[48] Die einzige Ausnahme bildet die installierte Leistung von Photovoltaik im Jahr 2015, die auf Basis jüngster Hochrechnungen nach oben korrigiert wurde.

werke werden der Modellierung vorgegeben. Insgesamt werden so bis 2016 13 GW an neuer Kraftwerkskapazität zugebaut (Tabelle 5-81). Ihre tatsächliche Stromerzeugung wird im Kraftwerkseinsatzmodell PowerFlex ermittelt.

Tabelle 5-80 Installierte Nettoleistung erneuerbarer Energien im Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80

	2010	2020	2030	2040	2050
			GW		
Wasserkraft	4,3	4,6	4,9	5,0	5,1
Windenergie	27,0	48,7	66,8	77,0	82,3
Onshore	26,9	38,8	43,5	47,7	50,5
Offshore	0,1	9,9	23,4	29,3	31,8
Fotovoltaik	17,3	53,5	61,0	63,3	67,2
Biomasse	5,8	8,2	9,2	9,5	9,5
Biogas, Klärgas u.a.	2,8	3,5	3,9	4,1	4,1
Feste Biomasse	1,9	3,3	3,9	3,9	3,9
Biogener Abfall	1,1	1,4	1,4	1,4	1,4
Erdwärme	0,0	0,2	0,6	1,2	1,9
EU-Stromverbund	0,0	0,3	3,6	8,1	10,4
Solarthermische KW	0,0	0,0	1,2	5,2	6,6
Wind, andere EE	0,0	0,3	2,4	3,0	3,9

Quelle: DLR, IWES, IfnE (2012), Öko-Institut

Tabelle 5-81 Kumulierte elektrische Nettoleistung von Kraftwerken, die sich in Planung bzw. Bau befinden

Kraftwerkstyp	2012	2013	2014	2015	2016
			GW		
Braunkohle	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Steinkohle	0,0	4,4	6,0	6,9	6,9
Erdgas	0,3	1,5	1,5	1,7	1,7
Erdgas - KWK klein (30 MW)	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Erdgas - KWK mittel (100 MW)	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4
Erdgas - KWK groß (400 MW)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
Erdgas - Gasturbine	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Summe	3,2	9,3	10,9	11,9	13,2

Quellen: Zusammenstellung und Annahmen des Öko-Instituts

Anlegbarer Wärmepreis

Neben den Brennstoffpreisen (Abschnitt 4.2) für den Verstromungseinsatz ist für die Bewertung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen der anlegbare Wärmepreis von besonderer Bedeutung. Da die Wärme aus KWK-Anlagen einerseits im Regelfall über kapitalintensive Wärmenetze verteilt werden muss (dadurch sinken die erzielbaren Wärmeerlöse frei Kraftwerk) und andererseits die konkurrierende, ungekoppelte Wärmeerzeugung beim Wärmeabnehmer nicht mit den günstigen Brennstoff-

Einstandspreisen für die Stromerzeugung rechnen kann (dies erhöht in der Tendenz die frei Kraftwerk erzielbaren Wärmeerlöse), wurde für KWK-Anlagen, die für die Fernwärmeversorgung eingesetzt werden, angenommen, dass sich der Wärmepreis aus dem Gaspreis unter Berücksichtigung eines Haushaltszuschlags sowie von Verteilkosten und Netzverlusten ableiten lässt. Für industrielle KWK-Anlagen wurde angenommen, dass die Wärme in Erdgas-Brennwertkesseln erzeugt wird (Annahme Wärmepreis gleich Gaspreis).

Maßnahmenbezogene Parameter

Neben den technisch bedingten Kostenparametern (s.o.) wirken sich verschiedene Politikmaßnahmen (wie der Emissionshandel oder das KWKG) auf die Wirtschaftlichkeit von Kraftwerksinvestitionen aus. Die im Modell implementierten Parameter werden im Folgenden dargestellt.

Für den *Emissionshandel* wird derjenige Anteil der CO_2-Zertifikate ermittelt, der von den einzelnen (Neubau-)Kraftwerken effektiv erworben werden muss. Die zu erwerbenden Emissionsberechtigungen werden in der Investitionsrechnung mit dem jeweiligen CO_2-Preis bewertet und gehen somit in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein. Für die dritte Phase des Emissionshandelssystems (ab 2013) werden die Emissionsberechtigungen für die Stromproduktion vollständig auktioniert. Für KWK-Anlagen werden zusätzlich kostenlos Emissionsberechtigungen für die Wärmeproduktion in Höhe von rund 225 g CO_2/kWh_{th} (62,3 EUA/TJ) zugeteilt. Der Anteil der kostenlosen Zuteilung reduziert sich von 80 % im Jahr 2013 auf 0 % im Jahr 2027 (EC 2011). Darüber hinaus wird jährlich ein linearer Kürzungsfaktor von 1,74 % angewendet. Basierend auf der Wärmeeinspeisung der KWK-Anlagen berechnet sich daraus der Auktionierungsanteil für KWK-Anlagen. Der resultierende Anteil beträgt ca. 90 % im Jahr 2020 und erhöht sich schrittweise bis zur Vollauktionierung (100 %) im Jahr 2027. Die so ermittelte Zuteilungsmenge für jedes Kraftwerk wird in Bezug zur emittierten CO_2-Menge gesetzt, die sich aus dem Wirkungsgrad, dem Brennstoff sowie den in PowerFlex ermittelten Benutzungsstunden ergibt. Damit kann ermittelt werden, welcher Anteil der tatsächlichen CO_2-Emissionen auf dem Zertifikatemarkt erworben werden muss.

Die Entwicklung der CO_2-Preise in den einzelnen Szenarien ist Abschnitt 4.3 zu entnehmen.

In allen Szenarien wird eine *Vergütung für vermiedene Netznutzung* für dezentrale Erzeuger berücksichtigt. Für die Modellierung wurde für große KWK-Anlagen, die in die Mittelspannungsebene einspeisen, eine Vergütung von 3 €/MWh_{el} angenommen, für Blockheizkraftwerke (BHKW), die in das Niederspannungsnetz einspeisen, von 10 €/MWh_{el}.

Die *Förderung für neue KWK-Anlagen* umfasst in allen Szenarien gemäß dem novellierten KWKG 2012 kleine (z. B. BHKW) und große KWK-Anlagen bei spätester Inbetriebnahme im Jahr 2020. Kleine BHKW bis 50 kW installierter Leistung erhalten dabei einen Zuschlagsatz von 54,1 €/MWh, größere BHKW bis 250 kW 40 €/MWh und BHKW bis 2 MW 24 €/MWh für 30.000 Betriebsstunden. Für große KWK-Anlagen gilt

ein Fördersatz von 21 €/MWh[49] ebenfalls für 30.000 Betriebsstunden. Darüber hinaus werden BHKW über Investitionszuschüsse im Rahmen der „Richtlinien zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW_{el}“ gefördert. Die Abbildung des Zubaus großer KWK-Anlagen erfolgt modellendogen unter Berücksichtigung der Zuschlagssätze. Für BHKW wird angenommen, dass sich das Absatzvolumen fossiler BHKW im Jahr 2011 (62 MW im Bereich kleiner BHKW, 376 MW im Bereich größerer BHKW) (Gores, Emele 2012) bis zum Jahr 2020 fortsetzt. Der Einsatz und damit die tatsächliche Stromerzeugung der KWK-Anlagen werden im Kraftwerkseinsatzmodell PowerFlex ermittelt.

Die Laufzeit der Kernkraftwerke wird in allen Szenarien gemäß AtG 2011 dem Modell vorgegeben.

Die Entwicklung der Stromnachfrage (und entsprechend der Stromerzeugung) in allen Szenarien wird direkt aus der Aggregation der Modellierungsergebnisse der Nachfragesektoren der Modellierung der Stromsektors vorgegeben.

Für die Modellierung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird angenommen, dass sich die installierte Leistung im Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 gemäß Leitstudie 2011 (Tabelle 5-80) entwickelt. Im Klimaschutzszenario 90 wird angenommen, dass sich der Zubau von Wind und Photovoltaik ab dem Jahr 2020 verstärkt und im Jahr 2050 105 GW bzw. 120 GW erreicht (UBA 2010b) (Tabelle 5-82). Sofern das Dargebot erneuerbarer Energien größer ist als die Nachfrage (Residuallast) inklusive der Nachfrage aller zeitlich flexiblen Verbraucher (Pumpspeicherkraftwerke, Elektrofahrzeuge, je nach Szenario Wärmespeicher und Power-to-Gas), kann der Strom inländisch nicht genutzt werden. Diese nicht genutzte Stromproduktion aus dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien kann als Export oder als Abregelung interpretiert werden.

[49] Annahme, dass Anlage emissionshandelspflichtig.

Tabelle 5-82 Installierte Nettoleistung erneuerbarer Energien im Klimaschutzszenario 90

	2010	2020	2030	2040	2050
			- GW -		
Wasserkraft	4,3	4,6	4,9	5,0	5,1
Windenergie	27,0	48,7	67,5	86,2	105,0
Onshore	26,9	38,8	45,8	52,9	60,0
Offshore	0,1	9,9	21,6	33,3	45,0
Fotovoltaik	17,3	53,5	75,7	97,8	120,0
Biomasse	5,8	8,2	9,2	9,5	9,5
Biogas, Klärgas u.a.	2,8	3,5	3,9	4,1	4,1
Feste Biomasse	1,9	3,3	3,9	3,9	3,9
Biogener Abfall	1,1	1,4	1,4	1,4	1,4
Erdwärme	0,0	0,2	0,6	1,2	1,9
EU-Stromverbund	0,0	0,3	3,6	8,1	10,4
Solarthermische KW	0,0	0,0	1,2	5,2	6,6
Wind, andere EE	0,0	0,3	2,4	3,0	3,9

Quelle: DLR, IWES, IfnE (2012), (UBA 2010b), Öko-Institut

Es wird angenommen, dass im Rahmen der Weiterentwicklung der Förderung erneuerbarer Energien die Förderung von Flexibilität zur Integration erneuerbarer Energien verstärkt gefördert wird. Im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 wird sowohl eine weitgehende Einführung von Wärmespeichern zur Flexibilisierung von KWK-Anlagen bis zum Jahr 2030 angenommen, als auch der Einstieg in „Power-to-Gas“, also die Wasserstoff- und Methanproduktion durch Elektrolyse, wobei die Elektrolyseanlagen ihre Stromnachfrage zeitlich verschieben können. Hier wird ein Wachstumspfad angenommen, mit dem im Jahr 2030 eine Leistung von knapp 260 MW_{el} für die reine Wasserstoff-Herstellung und knapp 50 MW_{el} für die Herstellung von Methan installiert sein werden. Jenseits des hier relevanten Berichtszeitraums (2030) führt dieser Pfad zu höheren installierten Elektrolyseleistungen, so dass im Jahr 2050 eine elektrische Leistung von gut 20 GW_{el} für Wasserstoff-Herstellung und knapp 4 GW_{el} für die Herstellung von Methan angenommen werden.

Im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 wird von einem Ausbau der Pumpspeicherkapazität um 4,0 GW bis 2020 bzw. 4,2 GW (2030) ausgegangen, was den Annahmen für den Netzentwicklungsplan 2013 im Szenario B entspricht (50Hertz Transmission, Amprion, TenneT, & TransnetBW, 2013).

Darüber hinaus wird in allen Szenarien davon ausgegangen, dass bis 2020 eine Stromleitung nach Norwegen mit einer Leistung von 1,4 GW installiert ist. Im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 wird davon ausgegangen, dass 2030, 2040 und 2050 jeweils weitere 1,4 GW hinzukommen.

Im Klimaschutzszenario 80 wird angenommen, dass 2030 0,5 GW, 2040 1,5 GW und 2050 2,1 GW an regelbaren Lasten zur Verfügung stehen. Verschiedene Industrieprozesse ermöglichen die Speicherung von Zwischenerzeugnissen oder Endprodukten. Hier wurden die Chlorelektrolyse sowie die Papier- und Zementherstellung als mögliche Prozesse identifiziert (Paulus and Borggrefe 2011; Hartkopf, Scheven, and Prelle

2012). Große Speicherpotentiale werden auch in der Luftzerlegung für industrielle CCS-Prozesse erwartet.

Den genannten Prozessen ist gemein, dass in Zeiten niedriger Strompreise eine kurzzeitige Erhöhung der Produktion und eine Speicherung des erzeugten Stoffes erfolgen kann. Eine spätere, entsprechend niedrige Produktion kann so ausgeglichen werden. Im Modell PowerFlex werden diese Prozesse abgebildet und erlauben somit eine teilweise Verschiebung der Stromerzeugung von Zeiten mit niedrigem Angebot erneuerbarer Energien in Zeiten, in denen ansonsten Abregelungen nötig gewesen wären.

Als neuer relevanter Verbraucher kommt in allen drei Szenarien die Elektromobilität hinzu, allerdings in verschieden großem Umfang (vgl. Abschnitt 5.5 zum Verkehr). Dabei wird davon ausgegangen, dass die Einführung der Elektromobilität in einem relevanten Umfang aus Gründen der Netzstabilität, der Versorgungssicherheit und der Kosteneffizienz des Stromerzeugungssystems nur realistisch ist, wenn das Laden der Fahrzeuge durch ein Lademanagement gesteuert wird. Das PowerFlex-Modell bildet dieses Lademanagement ab, indem es den Ladezeitraum für die Elektrofahrzeuge im Modell in Stunden mit möglichst kostengünstiger Stromerzeugung schiebt, wobei gleichzeitig berücksichtigt wird, dass die exogen vorgegebenen Fahrten der Elektro-Pkw stattfinden müssen, und dass Lademöglichkeiten je nach Uhrzeit in unterschiedlichem Umfang zur Verfügung stehen.

5.6.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Abbildung 5-48 und Tabelle 5-83 stellen die Stromerzeugung für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bis 2050 dar[50]. Basierend auf der installierten Leistung erneuerbarer Energien (Abschnitt 5.6.1) und der Nutzung des entsprechenden Dargebots nimmt die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 109 TWh im Jahr 2010 auf 399 TWh im Jahr 2050 zu[51]. Die Stromerzeugung in Kernkraftwerken sinkt entsprechend der Vorgaben des Atomgesetzes (AtG) von 133 TWh im Jahr 2010 auf 0 TWh im Jahr 2030[52]. Die Braunkohleverstromung nimmt mit 42 TWh im Jahr 2050 um gut 90 TWh gegenüber 2010 (134 TWh) ab. Dies bedeutet aufgrund der Stilllegung alter Braunkohle-Kraftwerke eine Stromerzeugung von 16 TWh in neuen Braunkohlekraftwerken. Die Stromerzeugung in Steinkohlekraftwerken nimmt von 107 TWh (2010) auf 44 TWh (2050) ab, wobei 33 TWh davon in neuen Kondensationskraftwerken erzeugt wird. Die Erdgasverstromung nimmt von 84 TWh auf 62 TWh ab, wobei ein Großteil (50 TWh) der Erdgas-Stromerzeugung im Jahr 2050 durch neue Kraftwerke ohne Wärmeauskopplung erzeugt wird. Die fossile KWK-Stromerzeugung nimmt von

[50] Die Bezeichnung „alt“ bedeutet hierbei, dass ein Kraftwerk bereits 2010 in Betrieb war. Die Bezeichnung „neu“ weist auf ein im Szenarienhorizont zugebautes Kraftwerk hin.

[51] Jeweils einschließlich der Stromerzeugung in Pumpspeicherkraftwerken.

[52] Stilllegung des letzten Kernkraftwerks im Jahr 2022.

76 TWh (2010) auf 6 TWh (2050) ab. Die KWK-Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien steigt von rund 10 TWh (2010) auf 31 TWh (2050). Das KWK-Ziel (Anteil von 25% an der Gesamtstromerzeugung im Jahr 2020) wird in keinem Szenarienjahr erreicht.

Der Zubau neuer Groß-Kraftwerke im Szenarienhorizont entspricht überwiegend den sich bereits im Bau befindlichen Kraftwerken. Darüber hinaus wird signifikante Kapazität an Gasturbinen zur Systemstabilisierung zugebaut, welche jedoch auch zur generellen Stromerzeugung genutzt werden.

Aufgrund der Annahme einer überwiegend inländischen Deckung der Stromnachfrage (Abschnitt 3.2.6.1) beträgt der Import von Strom aus dem europäischen Ausland im Jahr 2050 lediglich 23 TWh.

Abbildung 5-48 Nettostromerzeugung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Tabelle 5-83 Nettostromerzeugung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

	2010	2020	2030	2040	2050
		TWh			
Kernenergie	133	54	0	0	0
Braunkohle	134	107	78	66	42
davon neue Kondensations-KW	0	19	17	16	16
Steinkohle	107	87	62	43	44
davon neue Kondensations-KW	0	27	28	32	33
davon neue KWK	0	0	0	0	9
Erdgas	84	69	71	67	62
davon neue Kondensations-KW	0	1	4	27	50
davon neue KWK	0	17	20	5	1
Erneuerbare	109	231	315	364	399
davon Wasser	27	29	31	31	31
davon Wind	38	114	179	220	247
davon Biogas	18	15	17	17	18
davon Biomasse	15	27	28	29	27
davon Solar	12	45	55	59	64
davon sonstige Erneuerbare	0	1	4	8	12
Sonstige	24	25	24	19	19
Import	0	0	3	13	23
Summe	591	573	554	571	588
nachrichtlich: KWK-Stromerzeugung nach FW 308	87	89	90	51	37
davon fossile KWK	76	72	61	21	6
davon biogene KWK	10	17	29	31	31

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Die CO_2-Emissionen der Stromerzeugung sinken im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) von rund 373 Mio. t CO_2 (2010) auf 156 Mio. t CO_2 im Jahr 2050 (Tabelle 5-91).

Tabelle 5-84 Strompreisentwicklung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

2020	2030	2040	2050
	$€_{2010}$ / MWh		
41,24	66,32	84,97	102,33

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) steigen die Strompreise am Energy-Only-Markt von 41,24 €/MWh in 2020 auf 102,33 €/MWh in 2050 an (Tabelle 5-84). Die Bandbreite der stündlichen Preise erstreckt sich von 0 €/MWh bis 126 €/MWh bzw. 155 €/MWh in 2020 bzw. 2050. Die Anzahl der Stunden mit einem Strompreis von 0 €/MWh steigt von ca. 20 Stunden in 2020 auf ca. 100 Stunden in 2050 an.

5.6.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Abbildung 5-49 und Tabelle 5-85 stellen die Berechnungsergebnisse für das Klimaschutzszenario 80 dar. Basierend auf der installierten Leistung erneuerbarer Energien (Abschnitt 5.6.1) und der Nutzung des entsprechenden Dargebots nimmt die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 103 TWh im Jahr 2010 auf 403 TWh im Jahr

2050 zu. Die gesamte Stromerzeugung nimmt zunächst von 591 TWh (2010) auf 502 TWh (2030) ab und dann auf 540 TWh (2050) zu.

Wie im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) wird davon ausgegangen, dass die Beschlüsse des AtG umgesetzt werden. Die Stromerzeugung in Kernkraftwerken geht bis zum Jahr 2030 ebenfalls auf 0 TWh zurück. Der Zubau von Braunkohlekraftwerken (10 TWh im Jahr 2050) entspricht im Wesentlichen den sich bereits in Planung oder Bau befindlichen Kraftwerken. Dementsprechend sinkt die Braunkohleverstromung aufgrund der Außerbetriebnahme alter Kraftwerke sowie aufgrund kürzerer Betriebszeiten von 134 TWh (2010) auf 16 TWh (2050). Der Neubau von Steinkohlekraftwerken wird ebenfalls im Wesentlichen durch bereits sich im Bau befindliche Kraftwerke bestimmt. Die entsprechende Stromerzeugung sinkt von 107 TWh auf 17 TWh. Die Erdgasverstromung nimmt von 84 TWh (2010) auf 7 TWh (2050) ab. Die fossile KWK-Stromerzeugung kommt vollständig zum Erliegen (76 TWh (2010) auf 0 TWh (2050)). Die KWK-Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien steigt von rund 10 TWh (2010) auf 30 TWh (2050). Das KWK-Ziel (25 % KWK-Stromerzeugung bis 2020) wird in allen Szenarienjahren nicht erreicht.

Aufgrund der Annahme der Möglichkeit einer kostengünstigen Deckung eines Teils der deutschen Stromnachfrage durch ausländische Kraftwerke (Abschnitt 3.2.6.1) beträgt der Import von Strom aus dem europäischen Ausland im Jahr 2050 76 TWh.

Abbildung 5-49 Entwicklung der Nettostromerzeugung im Klimaschutzszenario 80

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI

Tabelle 5-85 Entwicklung der Nettostromerzeugung im Klimaschutzszenario 80

	2010	2020	2030	2040	2050
		TWh			
Kernenergie	133	56	0	0	0
Braunkohle	134	95	61	44	16
davon neue Kondensations-KW	0	19	14	13	10
Steinkohle	107	52	35	22	17
davon neue Kondensations-KW	0	17	16	20	17
davon neue KWK	0	0	0	1	1
Erdgas	84	62	49	24	7
davon neue Kondensations-KW	0	1	0	3	7
davon neue KWK	0	24	24	7	0
Erneuerbare	103	223	303	359	403
davon Wasser	21	22	23	24	25
davon Wind	38	114	178	225	258
davon Biogas	18	14	16	16	16
davon Biomasse	15	26	27	27	28
davon Solar	12	45	55	59	64
davon sonstige Erneuerbare	0	1	4	8	12
Sonstige	24	25	20	15	12
Pumpspeicher	6	6	8	7	5
Backup-Kraftwerke	0	0	1	2	5
Import	0	0	25	51	76
Summe	591	520	502	523	540
nachrichtlich: KWK-Stromerzeugung nach FW 308	87	82	77	43	30
davon fossile KWK	76	66	49	14	0
davon biogene KWK	10	16	27	28	30

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI

Die CO_2-Emissionen der Stromerzeugung sinken im Klimaschutzszenario 80 von rund 373 Mio. t CO_2 (2010) auf 42 Mio. t CO_2 im Jahr 2050 (Tabelle 5-91).

Tabelle 5-86 Strompreisentwicklung im Klimaschutzszenario 80

2020	2030	2040	2050
	$€_{2010}$ / MWh		
55,13	64,39	91,15	115,40

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Im Klimaschutzszenario 80 steigen die Strompreise am Energy-Only-Markt von 55,13 €/MWh in 2020 auf 115,40 €/MWh in 2050 an (Tabelle 5-86). Die Bandbreite der Preise erstreckt sich von 0 €/MWh bis 337 €/MWh bzw. 192 €/MWh in 2020 bzw. 2050. Die Anzahl der Stunden mit einem Strompreis von 0 €/MWh liegt sowohl in 2020 als auch in 2050 bei ca. 20 Stunden.

5.6.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Abbildung 5-50 und Tabelle 5-87 stellen die Berechnungsergebnisse für das Klimaschutzszenario 90 dar. Basierend auf der installierten Leistung erneuerbarer Energien (Tabelle 5-82) und dem der Nutzung des entsprechenden Dargebots nimmt die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 103 TWh im Jahr 2010 auf 507 TWh im Jahr 2050 zu. Die gesamte Stromerzeugung nimmt zunächst von 591 TWh (2010) auf 479 TWh (2030) ab und dann auf 612 TWh (2050) zu.

Wie im Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 wird davon ausgegangen, dass die Beschlüsse des AtG umgesetzt werden. Die Stromerzeugung in Kernkraftwerken geht bis zum Jahr 2030 ebenfalls auf 0 TWh zurück. Der Zubau von Braunkohlekraftwerken (17 TWh im Jahr 2020) entspricht im Wesentlichen den sich bereits in Planung oder Bau befindlichen Kraftwerken. Die Stromerzeugung in Braunkohlekraftwerken (einschließlich der Neubaukraftwerke) kommt jedoch insgesamt fast zum Erliegen (2 TWh im Jahr 2050 von 134 TWh im Jahr 2010). Der Neubau von Steinkohlekraftwerken wird ebenfalls im Wesentlichen durch bereits sich im Bau befindliche Kraftwerke bestimmt (10 TWh im Jahr 2020). Die Steinkohleverstromung kommt jedoch ebenfalls vollständig zum Erliegen (von 107 TWh im Jahr 2010). Die Erdgasverstromung nimmt von 84 TWh (2010) auf 2 TWh (2050) ab. Es kommt jedoch zu einem signifikanten Einsatz von Pumpspeicherkraftwerken (12 TWh im Jahr 2050) und Backup-Kraftwerken (4 TWh im Jahr 2050)). Die fossile KWK-Stromerzeugung kommt ebenfalls vollständig zum Erliegen (von 76 TWh (2010) auf 0 TWh (2050)). Die KWK-Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien steigt von rund 10 TWh (2010) auf 21 TWh (2050). Das KWK-Ziel (25 % KWK-Stromerzeugung bis 2020) wird in allen Szenarienjahren nicht erreicht.

Aufgrund der Annahme der Möglichkeit einer kostengünstigen Deckung eines Teils der deutschen Stromnachfrage durch ausländische Kraftwerke (Abschnitt 3.2.6.1) beträgt der Import von Strom aus dem europäischen Ausland im Jahr 2050 74 TWh.

Abbildung 5-50 Entwicklung der Nettostromerzeugung im Klimaschutzszenario 90

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI

Tabelle 5-87 Entwicklung der Nettostromerzeugung im Klimaschutzszenario 90

	2010	2020	2030	2040	2050
		TWh			
Kernenergie	133	55	0	0	0
Braunkohle	134	85	46	23	2
davon neue Kondensations-KW	0	17	10	5	0
Steinkohle	107	44	20	1	0
davon neue Kondensations-KW	0	10	0	0	0
Erdgas	84	57	49	17	2
davon neue Kondensations-KW	0	0	0	3	0
davon neue KWK	0	22	27	7	2
Erneuerbare	103	222	309	389	507
davon Wasser	21	22	23	24	25
davon Wind	38	114	172	231	324
davon Biogas	18	14	15	12	11
davon Biomasse	15	26	26	23	21
davon Solar	12	45	68	91	114
davon sonstige Erneuerbare	0	1	4	8	12
Sonstige	24	25	20	14	11
Pumpspeicher	6	6	9	13	12
Backup-Kraftwerke	0	0	2	4	4
Import	0	0	23	48	74
Summe	591	494	479	510	612
nachrichtlich: KWK-Stromerzeugung nach FW 308	87	78	76	33	21
davon fossile KWK	76	62	50	11	0
davon biogene KWK	10	16	26	22	21

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI

Die CO_2-Emissionen der Stromerzeugung sinken im Klimaschutzszenario 90 von rund 373 Mio. t CO_2 (2010) auf 12 Mio. t CO_2 im Jahr 2050 (Tabelle 5-91).

Tabelle 5-88 Strompreisentwicklung im Klimaschutzszenario 90

2020	2030	2040	2050
	$€_{2010}$ / MWh		
46,88	88,93	77,65	70,84

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Im Klimaschutzszenario 90 steigen der Strompreis am Energy-Only-Markt von 46,88 €/MWh in 2020 auf 88,93 €/MWh in 2030 an und sinkt dann auf 70,84 €/MWh in 2050 (Tabelle 5-88). Die Bandbreite der Preise erstreckt sich von 0 €/MWh bis 156 €/MWh und 254 €/MWh in 2020 bzw. 2050. Die Anzahl der Stunden mit einem Strompreis von 0 €/MWh steigt von ca. 40 Stunden in 2020 auf ca. 1.400 Stunden in 2050 an.

5.6.5 Vergleich der Szenarien

Tabelle 5-89 zeigt die Entwicklung der Stromerzeugung im Szenarienvergleich. Zunächst wird deutlich, dass die absolute Stromerzeugung im Jahr 2050 im KS 80 am niedrigsten ist, während sie im KS 90 am höchsten ist. Zwar nimmt die Stromnachfrage der Endverbrauchssektoren und die damit verbundene Stromerzeugung (einschließlich Netzverluste) vom AMS (2012) über das KS 80 zum KS 90 stetig ab (Tabelle 5-90). Jedoch nimmt insgesamt der Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge deutlich zu. Darüber hinaus kommt es im KS 90 zu einem starken Einsatz von Power-to-Gas, was wiederum dazu führt, dass die gesamte Stromnachfrage hier am höchsten ist.

Durch den Kernenergieausstieg sind in allen Szenarien im Jahr 2050 keine Kernkraftwerke mehr im Betrieb. Die Verstromung mit allen fossilen Energieträgern (Braunkohle, Steinkohle, Erdgas) nimmt jeweils vom AMS (2012) über das KS 80 zum KS 90 ab, sodass im KS 90 fast keine fossile Stromerzeugung mehr vorliegt. Dies liegt an drei verschiedenen sich überlagernden Effekten, die in den Szenarien unterschiedlich gewichtet sind: eine sinkende gesamte Stromerzeugung (insbesondere im KS 80), eine stark steigende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (stark im AMS (2012) und KS 80, sehr stark im KS 90) sowie der Import von Strom (vor allem im KS 80 und KS 90). Die im KS 80 und KS 90 gegenüber dem AMS (2012) höheren CO_2-Preise bewirken Veränderungen bei der Einlastung im Szenarienverlauf (nicht dargestellt), sind jedoch im Jahr 2050 aufgrund der weitgehenden Durchdringung mit erneuerbaren Energien nicht mehr von großer Relevanz.

Tabelle 5-89 Stromerzeugung im Vergleich der Szenarien, 2010 und 2050

		2050		
	2010	AMS (2012)	KS 80	KS 90
Energieträger	TWh			
Kernenergie	133	0	0	0
Braunkohle	134	42	16	2
Steinkohle	107	44	17	0
Erdgas	84	62	7	2
Erneuerbare	103	411	403	507
Sonstige	24	19	12	11
Pumpspeicher	6	9	5	12
Backup-Kraftwerke	0	-	5	4
Import	0	11	76	74
Summe	591	588	540	612

Quelle: Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 5-90 Komponenten der Stromerzeugung im Vergleich der Szenarien, 2010 und 2050

		2050		
	2010	AMS (2012)	KS 80	KS 90
Energieträger	TWh			
Stromerzeugung (Endverbrauch inkl. Netzverluste)	583	535	451	421
Stromverbrauch Pumpspeicherkraftwerke	9	13	8	18
Stromverbrauch Elektrolyseure (P2G)	0	0	13	111
Stromverbrauch Elektrofahrzeuge	0	40	69	62
Gesamte inländische Stromerzeugung	591	588	540	612

Quelle: Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 5-91 zeigt die Emissionsentwicklungen für CO_2, CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick.

Die Emissionen der Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O gehen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) in der Periode 2005 bis 2050 von 389 Mio. t CO_2-Äqu. auf 160 Mio. t CO_2-Äqu., also um insgesamt etwa 229 Mio. t CO_2-Äqu. zurück. Im Klimaschutzszenario 80 liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 44 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 345 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Im Klimaschutzszenario 90 sinken die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 376 Mio. t CO_2-Äqu. auf 13 Mio. t CO_2-Äqu.

Für die Periode 2005 bis 2020 ergibt sich damit im AMS (2012) eine Emissionsminderung für den Stromerzeugungssektor von 23 % und für den Zeitraum von 2005 bis 2050 von 59 %. Die entsprechenden Vergleichswerte für das KS 80 belaufen sich auf 40 % bzw. 89 % und für das KS 90 auf 45 % bzw. 97 %.

Bezogen auf die Ausgangswerte des Jahres 1990 betragen die entsprechenden Reduktionsraten bis 2050 im AMS (2012), KS 80 und KS 90 65%, 90% bzw. 97%.

Tabelle 5-91 Emissionsentwicklungen für den Stromerzeugungssektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CO_2-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	455.568	383.881	373.041				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				292.426	231.978	182.107	156.397
Klimaschutzszenario 80				230.148	154.751	91.335	42.040
Klimaschutzszenario 90				210.185	128.751	50.570	12.382
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	251	995	1.636				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				2.040	2.091	1.921	1.911
Klimaschutzszenario 80				1.695	1.674	1.298	1.196
Klimaschutzszenario 90				1.914	1.712	839	622
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	4.803	4.086	3.975				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				3.288	2.650	2.139	1.864
Klimaschutzszenario 80				2.565	1.914	1.369	989
Klimaschutzszenario 90				2.359	1.580	831	496
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	460.622	388.962	378.652				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				297.755	236.719	186.167	160.172
Klimaschutzszenario 80				234.408	158.338	94.003	44.226
Klimaschutzszenario 90				214.459	132.043	52.240	13.500
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-35,4	-48,6	-59,6	-65,2
Klimaschutzszenario 80				-49,1	-65,6	-79,6	-90,4
Klimaschutzszenario 90				-53,4	-71,3	-88,7	-97,1
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-23,4	-39,1	-52,1	-58,8
Klimaschutzszenario 80				-39,7	-59,3	-75,8	-88,6
Klimaschutzszenario 90				-44,9	-66,1	-86,6	-96,5
Anmerkungen: nur energiebedingte Emissionen in der Abgrenzung des NIR, mit CO_2-Emissionen aus der Rauchgasentschwefelung							

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

5.7 Andere Umwandlungssektoren

5.7.1 Annahmen und Parameter

Neben der Stromerzeugung müssen für den Umwandlungssektor noch eine Reihe weiterer Verursacherbereiche berücksichtigt werden:

- Heizwerke der Fernwärmeversorgung,
- Raffinerien (inkl. Anlage zur Biokraftstoffherstellung = Bio-Raffinerien),

- übrige Anlagen des Umwandlungssektors (Braunkohlengruben, Steinkohlenzechen, Brikettfabriken, Kokereien, andere Umwandlungs- und Veredelungsanlagen).

Im für die Modellierung gewählten Ansatz werden für diese Bereiche die Wärmeerzeugungsanlagen getrennt von den (Industrie-) Kraftwerken des Umwandlungssektors analysiert, da die Entwicklung der industriellen Stromerzeugungsanlagen im Umwandlungssektor nur im Kontext der Entwicklung des gesamten Stromerzeugungssektors bzw. des gesamten Strommarktes sinnvoll untersucht werden kann.

Zur Bereitstellung der Fernwärme werden (wie im Kapitel 5.6 beschrieben) neben KWK-Anlagen auch Heizwerke modelliert. Die Entwicklung der Brennstoffeinsätze dieser Heizwerke orientiert sich an den Brennstoffeinsätzen in den Kraftwerken des Stromsektors. Zusätzlich wird im Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 eine schrittweise Einführung von solarthermischen Anlagen und Großwärmepumpen zur Deckung eines Teils des Fernwärmebedarfs angenommen.

Die hier betrachteten Umwandlungsanlagen werden bei der Integration der Sektorergebnisse für die Endverbrauchssektoren sowie den Stromerzeugungssektor modelliert.

Alle Nachfragegrößen für die übrigen Umwandlungssektoren ergeben sich aus den in den Sektoranalysen ermittelten Energienachfragen, wobei Leitungs- und (stoffliche) Umwandlungsverluste wie auch der nicht-energetische Verbrauch von Primärenergieträgern bei der Integration vollständig berücksichtigt werden.[53]

[53] An dieser Stelle muss auf ein Spezifikum der Brennstoffeinsatz-Bilanzierung für die Biokraftstoffherstellung hingewiesen werden: Für die historischen Daten wird in den deutschen Energiebilanzen (bisher) bei der Biokraftstoffherstellung eine Umsetzung der eingesetzten Biomasse ohne jegliche Umwandlungsverluste unterstellt. Für die Projektion wird dagegen die (einheimische) Biokraftstoffherstellung mit einem eigenen Modul abgebildet, das neben dem Hilfsenergieeinsatz von Strom und Erdgas auch die Umwandlungsverluste bei der Biomasse berücksichtigt. Die historischen Zeitreihen wurden einer entsprechenden Korrektur nicht unterzogen, so dass für die Zeitreihe im Bereich der übrigen Umwandlungsanlagen zwischen historischen und Projektionsdaten ein methodischer Bruch entsteht. Dieser Effekt ist jedoch nur für die Energiebilanzen von Bedeutung, hinsichtlich der Treibhausgasemissionen entstehen durch diese Situation vernachlässigbare Effekte.

5.7.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Tabelle 5-92 Entwicklung der Energieverbräuche der anderen Umwandlungssektoren im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010–2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Öffentliche Heizwerke	199	248	339	623	713
Wärmeerzeuger in Raffinerien	238	217	184	168	158
Andere Wärmeerzeuger im Energiesektor	55	260	225	201	184
Gesamt	**492**	**726**	**748**	**993**	**1.055**
Braunkohlen	13	12	12	12	11
Steinkohlen	29	22	16	10	10
Öl	74	69	62	58	56
Raffineriegas	155	142	120	110	103
Erdgas	134	227	313	596	682
Gichtgas	14	13	12	11	9
Kokerei-/Stadtgas	15	14	14	14	13
Müll	26	26	26	26	26
Biogas	1	1	1	1	1
Biomasse	28	190	166	149	137
Abwärme	3	0	0	0	0
Fernwärme	2	0	0	0	0
Strom	0	8	6	5	5
Solarthermie	0	0	0	0	0
Gesamt	**494**	**726**	**748**	**993**	**1.055**

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Bedingt durch den Ausbau der Fernwärmenutzung in den Endverbrauchssektoren steigt der Energieeinsatz der öffentlichen Heizwerke bis 2050 deutlich an und zwar auf das 3,6-fache des Wertes von 2010. Damit setzt sich der historische Trend fort. Die größte Steigerung des Verbrauchs der öffentlichen Heizkraftwerke findet dabei in der Dekade von 2030 bis 2040. Da der Verbrauch von Braun- und Steinkohlen sowie Mineralöl bis 2050 stetig zurückgeht, sinkt der Energiebedarf der Wärmeerzeuger in Raffinerien und des übrigen Energiesektors. Insgesamt steigt der Energieverbrauch der anderen Umwandlungssektoren auf mehr als das doppelte. Der zusätzliche Energiebedarf wird hauptsächlich durch zusätzliches Erdgas und im kleineren Maße durch Biomasse gedeckt. Der Verbrauch an anderen fossilen und sonstigen Energieträgern ist konstant oder leicht rückläufig.

5.7.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Tabelle 5-93 Entwicklung der Energieverbräuche der anderen Umwandlungssektoren im Klimaschutzszenario 80, 2010–2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Öffentliche Heizwerke	199	185	228	509	567
Wärmeerzeuger in Raffinerien	238	204	162	137	123
Andere Wärmeerzeuger im Energiesektor	55	248	267	344	473
Gesamt	**492**	**637**	**656**	**990**	**1.163**
Braunkohlen	13	12	11	11	11
Steinkohlen	29	13	8	4	3
Öl	74	67	57	51	48
Raffineriegas	155	133	106	89	80
Erdgas	134	170	211	371	280
Gichtgas	14	13	9	7	4
Kokerei-/Stadtgas	15	14	13	13	13
Müll	26	26	26	26	26
Biogas	1	1	1	1	1
Biomasse	28	180	200	268	376
Abwärme	3	0	0	0	0
Fernwärme	2	0	0	0	0
Strom	0	8	8	56	131
Solarthermie	0	0	5	93	189
Gesamt	**494**	**637**	**656**	**990**	**1.163**

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Auch im Klimaschutzszenario 80 steigt durch den Ausbau der Fernwärmenutzung in den Endverbrauchssektoren der Energieeinsatz der öffentlichen Heizwerke bis 2050 deutlich, auf das 2,8-fache des Wertes von 2010, an, jedoch nicht so stark wie im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012),. Auch hier setzt sich der historische Trend zur stärkeren Fernwärmenutzung fort. Da der Verbrauch an Mineralöl im KS 80 stärker als im AMS (2012) zurückgeht, sinkt der Energiebedarf der Wärmeerzeuger in Raffinerien deutlicher. Gleichzeitig werden verstärkt Biokraftstoffe genutzt, was zu einem Anstieg des Energieverbrauchs der anderen Wärmeerzeuger des übrigen Energiesektors führt.[54] Insgesamt steigt der Energieverbrauch der anderen Umwandlungssektoren im KS 80 etwas stärker als im AMS (2012). Der zusätzliche Energiebedarf gegenüber 2010 wird mittelfristig hauptsächlich durch zusätzliche Biomasse und im kleineren Maße durch Erdgas gedeckt. Da längerfristig zur Fernwärmeerzeugung auch Solarthermie und Wärmepumpen zum Einsatz kommen, sinkt der Erdgasverbrauch nach 2040 wieder. Der Verbrauch an anderen fossilen und sonstigen Energieträgern ist konstant oder leicht rückläufig.

[54] Anlagen zur Herstellung von Biodiesel und Bioethanol sind diesem Sektor zugeordnet.

5.7.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Tabelle 5-94 Entwicklung der Energieverbräuche der anderen Umwandlungssektoren im Klimaschutzszenario 90, 2010–2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Öffentliche Heizwerke	199	159	146	324	380
Wärmeerzeuger in Raffinerien	238	176	121	77	39
Andere Wärmeerzeuger im Energiesektor	55	245	258	334	455
Gesamt	**492**	**580**	**525**	**736**	**874**
Braunkohlen	13	12	11	11	10
Steinkohlen	29	11	5	0	0
Öl	74	60	48	38	21
Raffineriegas	155	115	79	50	25
Erdgas	134	142	133	177	82
Gichtgas	14	12	7	2	0
Kokerei-/Stadtgas	15	14	13	12	12
Müll	26	26	26	26	26
Biogas	1	1	1	1	1
Biomasse	28	179	194	262	363
Abwärme	3	0	0	0	0
Fernwärme	2	0	0	0	0
Strom	0	7	8	39	92
Solarthermie	0	0	0	118	241
Gesamt	**494**	**580**	**525**	**736**	**874**

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Von den Grundtendenzen entwickelt sich das Klimaschutzszenario 90 ähnlich wie das Klimaschutzszenario 80, allerdings sind die Entwicklungen deutlich verstärkt. Der Energieeinsatz der öffentlichen Heizwerke steigt bis zum Jahr 2050 zwar auch an, allerdings nur noch auf das 1,9-fache des Wertes von 2010. Da der Endenergieverbrauch an Mineralöl im KS 90 noch deutlicher als im KS 80 zurückgeht, sinkt auch der Energiebedarf der Wärmeerzeuger in Raffinerien stärker. Durch den Anstieg der Effizienz in den Endverbrauchssektoren werden weniger Biokraftstoffe genutzt, wodurch der Energieverbrauch der Wärmeerzeuger des übrigen Energiesektors zwar gegenüber 2010 deutlich ansteigen, jedoch fällt die Steigerung des Energieverbrauchs dieser Wärmeerzeuger deutlich weniger stark aus als im KS 80. Diese beiden gegenläufigen Trends zusammengenommen steigt der Energieverbrauch der anderen Umwandlungssektoren im KS 90 weniger stark als im KS 80 und im AMS (2012). Der zusätzliche Energiebedarf gegenüber 2010 wird mittelfristig hauptsächlich durch zusätzliche Biomasse und im kleineren Maße durch Erdgas gedeckt. Da auch im KS 90 längerfristig zur Fernwärmeerzeugung auch Solarthermie und Wärmepumpen zum Einsatz kommen, sinkt der Erdgasverbrauch auch hier nach 2040 wieder. Der Verbrauch an anderen fossilen und sonstigen Energieträgern ist konstant oder leicht rückläufig.

In Biomasseumwandlungsanlagen fällt CO_2 in hoher Konzentration an. Bei einem Teil dieser Anlagen wird in diesem Szenario CCS eingeführt, was zu negativen Emissionen führt, da in die Atmosphäre freigesetztes biogenes CO_2 als treibhausgasneutral betrachtet wird.

5.7.5 Vergleich der Szenarien

Tabelle 5-95 zeigt die Emissionsentwicklungen für CO_2, CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick. Im KS 90 ist dabei berücksichtigt, dass dort teilweise CCS zum Einsatz kommt.

Die Emissionen der Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O steigen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) in der Periode 2005 bis 2050 von 32 Mio. t CO_2-Äqu. auf 57 Mio. t CO_2-Äqu., erhöhen sich damit um insgesamt etwa 25 Mio. t CO_2-Äqu.. Da die Zunahme des Energieverbrauchs vor allem durch Erdgas mit einem vergleichsweise niedrigen Emissionsfaktor gedeckt wird, nehmen die Emissionen weniger stark zu als der Energieverbrauch. Im Klimaschutzszenario 80 liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 30 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 2 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Der deutlich höhere Energieverbrauch des übrigen Umwandlungssektors im KS 80 führt also nicht zu höheren Emissionen. Im Klimaschutzszenario 90 sinken die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 29 Mio. t CO_2-Äqu. auf 3 Mio. t CO_2-Äqu., ein Effekt des verstärkten Energieträgerwechsels und des gleichzeitig weniger starken Energieverbrauchsanstiegs.

Für die Periode 2005 bis 2020 ergibt sich damit im AMS (2012) eine Emissionssteigerung von 13 % und für den Zeitraum von 2005 bis 2050 von 74 %. Die Minderungen für das KS 80 belaufen sich auf 3 % bzw. 8 % und für das KS 90 auf 14 % bzw. 90 %.

Bezogen auf die Ausgangswerte des Jahres 1990 betragen die entsprechenden Reduktionsraten bis 2050 im AMS (2012), KS 80 und KS 90 -55 % (Steigerung), 18 % bzw. 91 %.

Tabelle 5-95 Emissionsentwicklungen für die übrigen Umwandlungssektoren im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CO_2-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	36.117	32.286	33.535				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				36.250	38.121	52.181	56.083
Klimaschutzszenario 80				31.261	29.668	36.097	29.357
Klimaschutzszenario 90				27.733	22.150	17.081	2.923
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	86	31	24				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				41	45	64	69
Klimaschutzszenario 80				35	39	55	56
Klimaschutzszenario 90				33	32	40	39
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	229	146	190				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				290	284	337	350
Klimaschutzszenario 80				256	263	333	365
Klimaschutzszenario 90				241	229	263	285
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	36.432	32.464	33.749				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				36.581	38.450	52.582	56.503
Klimaschutzszenario 80				31.552	29.971	36.485	29.778
Klimaschutzszenario 90				28.007	22.411	17.384	3.247
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				0,4	5,5	44,3	55,1
Klimaschutzszenario 80				-13,4	-17,7	0,1	-18,3
Klimaschutzszenario 90				-23,1	-38,5	-52,3	-91,1
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				12,7	18,4	62,0	74,0
Klimaschutzszenario 80				-2,8	-7,7	12,4	-8,3
Klimaschutzszenario 90				-13,7	-31,0	-46,5	-90,0
Anmerkungen: nur energiebedingte Emissionen in der Abgrenzung des NIR, ohne Kraftwerke der Raffinerien und des übrigen Umwandlungssektors							

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

5.8 Flüchtige Emissionen des Energiesektors

Flüchtige Emissionen des Energiesektors entstehen während und nach dem Abbau, bei der Aufbereitung, beim Transport und bei der Verteilung, sowie durch Leckagen und bei der Abfackelung fossile Energieträger (Kohle, Mineralöl und Erdgas). Daher sind ist die Entwicklung der flüchtigen Emissionen des Energiesektors eng mit dem Verbrauch dieser Energieträger in den Umwandlungs- und Endverbrauchssektoren verbunden.

5.8.1 Annahmen und Parameter

Neben dem nachfragegetriebenen Aufkommen für die verschiedenen Energieträger wurden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Für den Emissionsbeitrag aus dem aktiven Steinkohlenbergbau ist die Entwicklung der Fördermenge entscheidend. Hier wurde in allen drei Szenarien davon ausgegangen, dass sich die Förderung in deutschen Bergwerken bis 2012 auf 12 Mio. t verringert und dann bis zum Jahr 2018 vollständig eingestellt wird.
- Die CH_4-Emissionen aus den stillgelegten Steinkohlenbergwerken werden für die (Ex post-) Inventarisierung anlagenspezifisch gemessen bzw. ermittelt. In den letzten Jahren sind hier erhebliche Emissionsminderungen erfolgt. Für den Projektionszeitraum wurden die Emissionen auf dem aktuellen (niedrigen) Niveau fortgeschrieben.
- Bei der Berechnung der flüchtigen Emissionen der Braunkohletagebaue wird die unterschiedliche Entwicklung des Braunkohlebedarfs in den unterschiedlichen Szenarien berücksichtigt.
- Für die Förderung von Erdöl und Erdgas in Deutschland wurden die bei EWI/Prognos (2006) zu Grunde gelegten Mengengerüste verwendet und damit implizit unterstellt, dass Veränderungen in den Verbrauchsniveaus ausschließlich Veränderungen bei den Erdöl- und Erdgasimporten zur Folge haben.

Darüber hinaus bilden vor allem die Mengengerüste für die Öl- und Gasnachfrage die zentralen Bestimmungsgrößen für die flüchtigen Emissionen des Energiesektors.

5.8.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Tabelle 5-96 Entwicklung der flüchtigen Emissionen des Energiesektors im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2005–2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt					
CH_4-Emissionen						
Aktiver Kohlenbergbau						
Steinkohlen-Tiefbau	*254,5*	*122,6*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
Steinkohlen-Aufbereitung	*14,3*	*7,4*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
Braunkohlen-Tagebau	*2,0*	*1,9*	*1,4*	*1,0*	*0,8*	*0,5*
Umwandlung von Kohle	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
Stillgelegte Zechen	2,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Ölförderung und -bereitstellung						
Exploration	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	0,0
Produktion	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
Transport	*0,4*	*0,3*	*0,2*	*0,2*	*0,2*	*0,1*
Lagerung	*11,0*	*10,5*	*8,5*	*7,0*	*5,9*	*5,3*
Verteilung von Ölprodukten	*2,8*	*2,2*	*1,7*	*1,2*	*1,0*	*0,8*
Erdgas						
Produktion	*5,0*	*2,2*	*2,0*	*1,2*	*0,3*	*0,0*
Transport	*41,3*	*40,4*	*41,1*	*40,6*	*40,1*	*38,1*
Verteilung	*190,9*	*192,4*	*210,2*	*196,2*	*165,6*	*130,6*
Andere Leckagen	*64,0*	*59,0*	*64,5*	*60,2*	*50,8*	*40,1*
Fackeln	10,2	6,6	7,4	7,4	7,4	7,4
Zwischensumme CH_4	600	447	338	316	273	224
CO_2-Emissionen						
Stillgelegte Zechen	0	0	0	0	0	0
Ölförderung und -bereitstellung	1	1	1	0	0	0
Erdgas						
Produktion	*1.735*	*1.166*	*1.045*	*610*	*145*	*0*
Fackeln	327	284	319	319	319	319
Zwischensumme CO_2	2.063	1.451	1.365	929	464	319
N_2O-Emissionen						
Fackeln	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Zwischensumme N_2O	0	0	0	0	0	0
Summe (kt CO_2-Äqu.)	14.657	10.830	8.463	7.564	6.197	5.021
ggü. 2005	*-*	*-26,1%*	*-42,3%*	*-48,4%*	*-57,7%*	*-65,7%*

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Tabelle 5-96 zeigt die Entwicklung der flüchtigen Emissionen aus den Energiesektoren für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012). Der gesamte Emissionsrückgang von ca. 9,6 Mio. t CO_2-Äqu. im Zeitraum 2005 bis 2050 ist dabei geprägt von der Rückführung des deutschen Steinkohlenbergbaus, für den sich als Nettoeffekt (aus rückläufigen Emissionen im aktiven Bergbau und konstanten Emissionen aus den stillgelegten Bergwerken) eine Minderung von ca. 5,3 Mio. t CO_2-Äqu. ergibt. Weitere deutliche Emissionsreduktionen von 1,3 Mio t. CO2-Äqu. ergeben sich für die Emissionen aus der Erdgasverteilung, die aus dem Rückgang des Erdgaseinsatzes in den privaten Haushalten und im GHD-Sektor resultiert. Insgesamt gehen die flüchtigen Emissionen des Energiesektors im Zeitraum 2010 bis 2050 um ca. 66 % zurück.

5.8.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Tabelle 5-97 Entwicklung der flüchtigen Emissionen des Energiesektors im Klimaschutzszenario 80, 2005–2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt					
CH_4-Emissionen						
Aktiver Kohlenbergbau						
Steinkohlen-Tiefbau	*254,5*	*122,6*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
Steinkohlen-Aufbereitung	*14,3*	*7,4*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
Braunkohlen-Tagebau	*2,0*	*1,9*	*1,2*	*0,7*	*0,5*	*0,2*
Umwandlung von Kohle	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
Stillgelegte Zechen	2,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Ölförderung und -bereitstellung						
Exploration	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	0,0
Produktion	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
Transport	*0,4*	*0,3*	*0,2*	*0,1*	*0,1*	*0,1*
Lagerung	*11,0*	*10,5*	*7,9*	*5,4*	*3,3*	*1,9*
Verteilung von Ölprodukten	*2,8*	*2,2*	*1,6*	*1,1*	*0,6*	*0,3*
Erdgas						
Produktion	*5,0*	*2,2*	*2,0*	*1,2*	*0,3*	*0,0*
Transport	*41,3*	*40,4*	*34,1*	*28,2*	*20,9*	*13,7*
Verteilung	*190,9*	*192,4*	*182,6*	*139,4*	*91,9*	*62,4*
Andere Leckagen	*64,0*	*59,0*	*56,0*	*42,8*	*28,2*	*19,1*
Fackeln	10,2	6,6	7,4	7,4	7,4	7,4
Zwischensumme CH_4	600	447	294	227	154	106
CO_2-Emissionen						
Stillgelegte Zechen	0	0	0	0	0	0
Ölförderung und -bereitstellung	1	1	1	0	0	0
Erdgas						
Produktion	*1.735*	*1.166*	*1.045*	*610*	*145*	*0*
Fackeln	327	284	319	319	319	319
Zwischensumme CO_2	2.063	1.451	1.365	929	464	319
N_2O-Emissionen						
Fackeln	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Zwischensumme N_2O	0	0	0	0	0	0
Summe (kt CO_2-Äqu.)	14.657	10.830	7.541	5.701	3.701	2.548
ggü. 2005	*-*	*-26,1%*	*-48,6%*	*-61,1%*	*-74,8%*	*-82,6%*

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Obwohl sich das Energieaufkommen im Klimaschutzszenario 80 deutlich ändert, bleiben die Auswirkungen auf die flüchtigen Emissionen des Energiesektors eher gering (Tabelle 5-97). Dies begründet sich vor allem aus der in der Gegenwart dominierenden Rolle der Steinkohlenförderungen für diesen Quellbereich. Angesichts der im Vergleich zum AMS (2012) unveränderten Trajektorie für die deutsche Steinkohleförderung ergeben sich hier im KS 80 keine Änderungen. Die deutlichste Änderung der Emissionen gegenüber dem AMS (2012) ergibt sich hier aus der verminderten Freisetzung von CH_4 im Erdgas-Verteilungssystem, die Reduktion beträgt hier 2,7 Mio. t CO_2-Äqu. Insge-

samt gehen die flüchtigen Emissionen des Energiesektors im Zeitraum 2005 bis 2050 um 12,1 Mio. t CO_2-Äqu. bzw. ca. 83 % zurück.

5.8.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Tabelle 5-98 Entwicklung der flüchtigen Emissionen des Energiesektors im Klimaschutzszenario 90, 2005–2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt					
CH_4-Emissionen						
Aktiver Kohlenbergbau						
Steinkohlen-Tiefbau	*254,5*	*122,6*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
Steinkohlen-Aufbereitung	*14,3*	*7,4*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
Braunkohlen-Tagebau	*2,0*	*1,9*	*1,0*	*0,5*	*0,3*	*0,0*
Umwandlung von Kohle	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
Stillgelegte Zechen	2,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Ölförderung und -bereitstellung						
Exploration	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	0,0
Produktion	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
Transport	*0,4*	*0,3*	*0,2*	*0,1*	*0,1*	*0,0*
Lagerung	*11,0*	*10,5*	*7,8*	*5,1*	*3,0*	*1,6*
Verteilung von Ölprodukten	*2,8*	*2,2*	*1,6*	*1,0*	*0,5*	*0,3*
Erdgas						
Produktion	*5,0*	*2,2*	*2,0*	*1,2*	*0,3*	*0,0*
Transport	*41,3*	*40,4*	*33,1*	*27,1*	*17,5*	*8,0*
Verteilung	*190,9*	*192,4*	*174,8*	*132,4*	*80,8*	*50,6*
Andere Leckagen	*64,0*	*59,0*	*53,6*	*40,6*	*24,8*	*15,5*
Fackeln	10,2	6,6	7,4	7,4	7,4	7,4
Zwischensumme CH_4	600	447	282	216	136	84
CO_2-Emissionen						
Stillgelegte Zechen	0	0	0	0	0	0
Ölförderung und -bereitstellung	1	1	1	0	0	0
Erdgas						
Produktion	*1.735*	*1.166*	*1.045*	*610*	*145*	*0*
Fackeln	327	284	319	319	319	319
Zwischensumme CO_2	2.063	1.451	1.365	929	464	319
N_2O-Emissionen						
Fackeln	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Zwischensumme N_2O	0	0	0	0	0	0
Summe (kt CO_2-Äqu.)	14.657	10.830	7.297	5.473	3.311	2.090
ggü. 2005	*-*	*-26,1%*	*-50,2%*	*-62,7%*	*-77,4%*	*-85,7%*

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Auch im Klimaschutzszenario 90 (Tabelle 5-98) ist die Entwicklung der mit Kohleförderung und Nutzung verbundenen flüchtigen Emissionen sehr ähnlich wie im AMS (2012) und im KS 80. Die verminderte Freisetzung von CH_4 im Erdgas-Verteilungssystem führt zur Reduktion von ca. 2,9 Mio. t CO_2-Äqu. Insgesamt gehen die flüchtigen Emissionen des Energiesektors im Zeitraum 2005 bis 2050 um 12,6 Mio t CO_2-Äqu. bzw. um etwa 86 % zurück.

5.8.5 Vergleich der Szenarien

Tabelle 5-99 zeigt die Emissionsentwicklungen für CO_2, CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick.

In allen drei Szenarien sinken die CO_2-Emissionen gleich stark. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in allen drei Szenarien der Ausstieg aus dem Steinkohlenabbau im Jahr 2018 zugrunde gelegt ist. Die Emissionen an CH_4 sinken in allen drei Szenarien, am stärksten im KS 90 und am schwächsten im AMS (2012), sodass 2050 diese Emissionen im AMS (2012) etwa das 2,6fache des KS 90 betragen. Da der größte Anteil CH_4-Emissionen sind, verlaufen die gesamten flüchtigen Emissionen des Energiesektors ähnlich wie CH_4: Sie sinken insgesamt, besonders deutlich im KS 90. Im KS 90 liegen die gesamten Emissionen bei etwa der Hälfte des AMS (2012).

Tabelle 5-99 Emissionsentwicklungen für die flüchtigen Emissionen im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CO_2-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	1.691	2.063	1.451				
AMS (2012)				1.365	929	464	319
Klimaschutzszenario 80				1.365	929	464	319
Klimaschutzszenario 90				1.365	929	464	319
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	28.766	12.593	9.378				
AMS (2012)				7.097	6.634	5.733	4.701
Klimaschutzszenario 80				6.175	4.772	3.236	2.229
Klimaschutzszenario 90				5.931	4.543	2.847	1.771
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	1	0	0				
AMS (2012)				0	0	0	0
Klimaschutzszenario 80				0	0	0	0
Klimaschutzszenario 90				0	0	0	0
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	30.458	14.657	10.830				
AMS (2012)				8.463	7.564	6.197	5.021
Klimaschutzszenario 80				7.541	5.701	3.701	2.548
Klimaschutzszenario 90				7.297	5.473	3.311	2.090
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
AMS (2012)				-72,2	-75,2	-79,7	-83,5
Klimaschutzszenario 80				-75,2	-81,3	-87,8	-91,6
Klimaschutzszenario 90				-76,0	-82,0	-89,1	-93,1
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
AMS (2012)				-42,3	-48,4	-57,7	-65,7
Klimaschutzszenario 80				-48,6	-61,1	-74,8	-82,6
Klimaschutzszenario 90				-50,2	-62,7	-77,4	-85,7

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

5.9 Primärenergiebedarf

Die im Folgenden dargestellten Bilanzen des Primärenergiebedarfs wurden mit Hilfe eines Modells generiert, an einigen Stellen durch Zusatz- und Anpassungsrechnungen ergänzt und folgen insgesamt dem Schema der Energiebilanzen.[55]

In diesem Kontext ist anzumerken, dass hinsichtlich der Entwicklung des Primärenergieverbrauchs eine systematische Verzerrung durch die verschiedenen Konventionen der Energiestatistik zu berücksichtigen ist.[56] So wird die Kernenergie nach der verwendeten Wirkungsgradmethode per Konvention primärenergieseitig mit einem Faktor 3 bewertet, wohingegen v.a. erneuerbare Energieträger, abgesehen von Geothermie (hier erfolgt die primärenergieseitige Bewertung mit dem Faktor 10) und Biomasse, mit einem hypothetischen Wirkungsgrad von 100 % in die Primärenergiebilanz eingehen.[57] Tendenziell sinkt somit der PEV aufgrund der unterschiedlichen primärenergieseitigen Bewertung der nicht-fossilen Energieträger.

---

[55] Um die Vergleichbarkeit mit dem Mengengerüst für die Emissionsermittlung zu ermöglichen, ist auf die folgenden Unterschiede zwischen der Systematik der Emissionsinventarisierung und der Systematik der Energiebilanzen hinzuweisen. Erstens wird in der Systematik der Energiebilanz beim Endenergieeinsatz der gesamte Energiebedarf des Flugverkehrs, also auch des internationalen Flugverkehrs bilanziert. Dagegen wird der internationale Seeverkehr weder beim Endenergieeinsatz noch beim Primärenergieverbrauch (im Inland), sondern bei den Hochseebunkerungen erfasst. Bei der Emissionsinventarisierung werden dagegen der internationale Luft- und Seeverkehr nur nachrichtlich ausgewiesen. Zweitens errechnet sich in der Systematik der Energiebilanz der Endenergiebedarf des Verarbeitenden Gewerbes und des Übrigen Bergbaus (im Folgenden: Industrie) aus dem direkten Endenergieeinsatz in der Industrie sowie dem der Wärmeerzeugung zuzurechnenden Brennstoffeinsatz in den industriellen Heizkraftwerken. Für die Emissionsermittlung werden dem Sektor Industrie aber die gesamten Energieeinsätze in Industriekraftwerken zugerechnet.

Um eine möglichst umfassende Vergleichbarkeit der Energiedaten zu gewährleisten wurden für die Ermittlung der Energiebedarfsdaten die nachstehenden Konventionen getroffen:

Der Energieverbrauch des internationalen Seeverkehrs wird bei der Primärenergiebetrachtung nicht berücksichtigt. Der Energieverbrauch sowohl des nationalen als auch des internationalen Luftverkehrs wird dagegen bei der Primärenergieermittlung voll berücksichtigt. Der Energieverbrauch des gesamten internationalen (See- und Luft-) Verkehrs wird weiterhin bei den Endenergiedaten zunächst voll ausgewiesen (im Folgenden: weite Abgrenzung des Endenergiebedarfs. Der Energieeinsatz in den Industriekraftwerken wird zunächst ebenfalls dem Endverbrauchssektor Industrie zugerechnet (im Folgenden: weite Abgrenzung des Endenergiebedarfs). Um neben der Vergleichbarkeit mit den Emissionsdaten auch eine Vergleichbarkeit mit den Energiebilanzen zu ermöglichen, erfolgt zusätzlich eine Endenergieermittlung, die näherungsweise der Systematik der Energiebilanzen entspricht (im Folgenden: enge Abgrenzung des Endenergiebedarfs): Energieeinsatz in der Industrie ohne Brennstoffeinsatz in den Industriekraftwerken sowie gesamter Energieeinsatz im Verkehr, inklusive internationalem Luftverkehr, aber ohne internationalen Seeverkehr.

[56] Eine ähnliche Verzerrung entsteht im Vergleich zur normbedingten Primärenergieberechnung im Kapitel 5.1.6.

[57] Auch der Stromaußenhandel wird primärenergieseitig mit einem Wirkungsgrad von 100 % bewertet.

5.9.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Abbildung 5-51 Primärenergiebedarf nach Energieträgern im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 5-100 Entwicklung des gesamten Primärenergieverbrauchs im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Kernenergie	1.623	1.533	624	0	0	0
Braunkohle	1.566	1.517	1.118	792	650	409
Steinkohle	1.817	1.753	1.453	1.133	870	828
Öl	3.935	3.782	3.062	2.521	2.133	1.910
Erdgas	3.019	3.045	3.094	3.060	3.022	2.868
Müll und sonstige	189	206	224	263	242	245
Biomasse[a]	883	1.018	1.592	1.544	1.463	1.388
Wasser	74	74	81	85	89	91
Wind	146	131	410	647	795	891
Solar	16	43	197	247	259	269
Geothermie	0	0	68	206	386	568
Primärenergie[b]	13.269	13.103	11.924	10.498	9.910	9.467
Nachr.:						
Veränderung gegenüber 2008	*0,0%*	*-1,2%*	*-10,1%*	*-20,9%*	*-25,3%*	*-28,7%*
Anteil erneuerbare Energien	*8,4%*	*9,7%*	*19,7%*	*26,0%*	*30,2%*	*33,9%*

Anmerkungen: [a] einschließlich organische Anteile des Mülls. [b] ohne Brennstoffeinsatz des internationalen Seeverkehrs (Hochseebunkerungen).

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Der Primärenergiebedarf sinkt im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) von 13.269 PJ im Jahr 2008 auf ca. 9.500 PJ im Jahr 2050 (-29 %). Damit einher geht eine Verschiebung der Struktur des Primärenergiebedarfs, wie Abbildung 5-51 zeigt.

Der Verbrauch von Mineralölen, Erdgas und Kohlen nimmt zwischen 2008 und 2050 deutlich ab. So sinkt der Primärenergiebedarf von Mineralölprodukten um etwa 2.000 PJ über den Betrachtungszeitraum und der Verbrauch von Kohlen geht um etwa 2.200 PJ zurück. Der Einsatz der Kernenergie geht aufgrund der zwischen Bundesregierung und den Betreibern von Kernkraftwerken geschlossenen Ausstiegsvereinbarung nach 2020 auf null zurück. Der Erdgasverbrauch sinkt über den gesamten Zeitraum um etwa 150 PJ. Ein starker Zuwachs ist vor allem bei den erneuerbaren Energieträgern festzustellen, wo sich zwischen dem Basisjahr 2008 und dem Ende der Analyse im Jahr 2050 ein Anstieg des Verbrauchs auf das 2,9fache einstellt. In hohem Maße tragen hierzu Wind und vor allem Biomasse bei. Mit knapp 1.400 PJ im Jahr 2050 trägt die Biomasse mit etwa 43 % zum Einsatz erneuerbarer Energieträger von insgesamt ca. 3.200 PJ bei. Wind ist im Jahr 2050 mit knapp 900 PJ der zweitwichtigste erneuerbare Energieträger. Die verbleibenden gut 900 PJ verteilen sich im Wesentlichen auf Wasserkraft, Solarenergie sowie Umgebungs- und Erdwärme.

5.9.2 Klimaschutzszenario 80

Abbildung 5-52 Primärenergiebedarf nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 80, 2010–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 5-101 Entwicklung des gesamten Primärenergieverbrauchs im Klimaschutzszenario 80 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Kernenergie	1.623	1.533	649	0	0	0
Braunkohle	1.566	1.517	954	587	409	146
Steinkohle	1.817	1.753	1.076	796	561	441
Öl	3.935	3.782	2.858	1.960	1.190	698
Erdgas	3.019	3.045	2.571	2.121	1.576	1.033
Müll und sonstige	189	206	226	243	253	262
Biomasse[a]	883	1.018	1.535	1.672	1.865	2.179
Wasser	74	74	59	56	63	71
Wind	146	131	411	641	812	932
Solar	16	43	199	258	367	476
Geothermie	0	0	70	209	395	575
Primärenergie[b]	13.269	13.103	10.610	8.544	7.492	6.813
Nachr.:						
Veränderung gegenüber 2008	*0,0%*	*-1,2%*	*-20,0%*	*-35,6%*	*-43,5%*	*-48,6%*
Anteil erneuerbare Energien	*8,4%*	*9,7%*	*21,4%*	*33,2%*	*46,7%*	*62,1%*

Anmerkungen: [a] einschließlich organische Anteile des Mülls. [b] ohne Brennstoffeinsatz des internationalen Seeverkehrs (Hochseebunkerungen).

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Der Primärenergiebedarf geht im Klimaschutzszenario 80 (KS 80) erwartungsgemäß deutlich stärker als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) zurück und zwar von 13.269 PJ im Jahr 2008 auf ca. 6.700 PJ im Jahr 2050, was einer Minderung um über 6.500 PJ bzw. 49 % entspricht. Damit wird das Ziel aus dem Energiekonzept der Bundesregierung der Reduzierung des Primärenergieverbrauchs um 50 % nur ganz knapp verfehlt.

Es werden im Jahr 2050 dabei vor allem weniger Mineralölprodukte (-3.200 PJ) und weniger Kohlen (-2.800 PJ) gegenüber 2008 eingesetzt. Der Primärenergieverbrauch von fossilen Gasen sinkt um knapp 2.000 PJ. Ein deutlicher Zuwachs findet bei den erneuerbaren Energieträgern statt, wobei im Jahr 2050 der Anteil der Erneuerbaren auf 62 % bzw. knapp 4.200 PJ ansteigt, was dem 3,7fachen des regenerativen Primärenergieeinsatzes des Jahres 2008 entspricht. Vor allem Biomasse trägt mit 2.100 PJ – dies entspricht gut der Hälfte des gesamten Einsatzes erneuerbarer Energien – zu diesem Anstieg bei. Unter den erneuerbaren Energieträgern folgt Wind mit über 900 PJ (Anteil etwa 22 %) auf dem zweiten Rang. Die Energieträger Wasserkraft, Solarenergie und Umweltwärme bzw. Geothermie tragen zusammen mit ca. 1.100 PJ bei.

5.9.3 Klimaschutzszenario 90

Abbildung 5-53 Primärenergiebedarf nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 90, 2010–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 5-102 Entwicklung des gesamten Primärenergieverbrauchs im Klimaschutzszenario 90 2010–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Kernenergie	1.623	1.533	638	0	0	0
Braunkohle	1.566	1.517	861	447	228	19
Steinkohle	1.817	1.753	978	636	331	240
Öl	3.935	3.782	2.795	1.840	1.076	561
Erdgas	3.019	3.045	2.491	2.039	1.318	600
Müll und sonstige	189	206	221	231	231	231
Biomasse[a]	883	1.018	1.498	1.601	1.682	1.873
Wasser	74	74	81	85	89	91
Wind	146	131	411	621	832	1.170
Solar	16	43	199	300	504	701
Geothermie	0	0	67	203	377	551
Primärenergie[b]	13.269	13.103	10.240	8.002	6.668	6.038
Nachr.:						
Veränderung gegenüber 2008	*0,0%*	*-1,2%*	*-22,8%*	*-39,7%*	*-49,7%*	*-54,5%*
Anteil erneuerbare Energien	*8,4%*	*9,7%*	*22,0%*	*35,1%*	*52,2%*	*72,6%*

Anmerkungen: [a] einschließlich organische Anteile des Mülls. [b] ohne Brennstoffeinsatz des internationalen Seeverkehrs (Hochseebunkerungen).

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Im Klimaschutzszenario 90 sinkt der Primärenergieverbrauch bis 2050 auf knapp 5.900 PJ, was einer Reduktion um 56 % gegenüber dem Jahr 2008 entspricht. Das Ziel aus dem Energiekonzept der Bundesregierung der Reduzierung des Primärenergieverbrauchs um 50 % wird also deutlich erreicht.

Der Verbrauch an Mineralölprodukten kann um knapp 3.400 PJ, der Verbrauch an Kohlen um gut 3.100 PJ sowie der Verbrauch an Erdgas um 2.400 PJ gesenkt werden. Der Anteil der fossilen Energieträger liegt damit 2050 bei nur noch etwa 1.400 PJ, was einem Anteil von knapp 24 % entspricht. Der Anteil der erneuerbaren Energien liegt dahin gehen mit 4.200 PJ dreimal so hoch. Von diesen entfallen mit gut 1.700 PJ etwa 41 % auf Biomasse, knapp 1.200 PJ auf Wind (28 %), 700 PJ auf Solarenergie (17 %) und der Rest auf Wasserkraft, Umgebungs- und Erdwärme.

5.9.4 Vergleich Szenarien

Abbildung 5-54 Differenzen des Primärenergiebedarfs zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 bzw. zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 90, 2020–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Den Mehr- und Minderbedarf der einzelnen Formen von Primärenergie zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 einerseits und zwischen Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) und Klimaschutzszenario 90 andererseits zeigt Abbildung 5-54. Die Reduktion des Primärenergieverbrauchs der fossilen Energieträger Kohle, Mineralöl und Erdgas ist im KS 90 deutlich stärker ausgeprägt als im KS 80, wohingegen die Nutzung von erneuerbaren Energien im KS 80 und im KS 90 ähnlich

verläuft. Bemerkenswert ist, dass 2020 sowohl im KS 80 als auch im KS 90 weniger erneuerbare Energien als im AMS (2012). Dies ist darauf zurückzuführen, dass Energiesparmaßnahmen und Effizienzsteigerungen auch den Bedarf an erneuerbaren Energien senken können.

5.10 Endenergiebedarf

Der Endenergieverbrauch kann in einer engen und in einer weiten Abgrenzung betrachtet werden. In der engen Abgrenzung sind anders als in der weiten Abgrenzung der Energieverbrauch des internationalen Seeverkehrs sowie der Energieeinsatz der Industriekraftwerke nicht enthalten.

5.10.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

In der weiten Abgrenzung sinkt der Endenergieverbrauch des Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) in der weiten Abgrenzung von etwa 9.180 PJ im Jahr 2008 auf etwa 7.130 PJ im Jahr 2050, was einem Rückgang von 22 % entspricht. In der engen Abgrenzung ohne internationalen Seeverkehr und Industriekraftwerke sinkt der EEV von 8.440 PJ auf 6.160 PJ, also um 27 %.

Wie auch beim Primärenergiebedarf ist im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) die Entwicklung für die einzelnen Energieträgergruppen sehr unterschiedlich. Der Verbrauch von Kohlen, der im Wesentlichen auf den Sektor Industrie entfällt – GHD und Haushalte tragen hierzu nur in geringem Umfang bei – geht über den Betrachtungszeitraum um etwa 39 % zurück. Bei den Mineralölprodukten ist über den Zeitraum 2008 bis 2050 ein deutlicher Rückgang des Verbrauchs um etwa 59 % zu beobachten. Bei den fossilen Gasen ist ein Rückgang des Endenergiebedarfs um 29 % zwischen 2008 und 2050 zu verzeichnen. Die Nachfrage nach Fernwärme steigt bis 2030 und sinkt dann wieder bis 2050 auf etwa das Niveau von 2008. Der Stromverbrauch steigt insgesamt um 7 %. Entgegen den Trends bei den fossilen Energieträgern nimmt der Endenergiebedarf erneuerbarer Energieträger zu, zwischen 2008 und 2050 steigt der Endenergieverbrauch an erneuerbaren Energien um 58 %. Die übrigen Energieträger spielen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) keine große Rolle.

Abbildung 5-55 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (ohne internat. Luft- und Seeverkehr), 2010–2050

Quellen: Fraunhofer ISI, Öko-Institut

Tabelle 5-103 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Braunkohle	76	76	65	37	19	11
Steinkohle	334	351	332	300	267	240
Mineralölprodukte	3.227	3.091	2.292	1.785	1.496	1.308
Gase (fossil)	2.041	2.029	2.128	1.983	1.727	1.448
Müll und sonstige	28	29	39	47	53	60
Biomasse[a] & Biogas	384	436	625	566	525	489
Solarenergie und Umweltwärme	0	0	60	88	111	116
Wasserstoff	0	0	0	0	0	0
Strom	1.887	1.859	1.861	1.867	1.979	2.013
Fern- und Nahwärme	766	674	754	793	791	772
Summe	8.743	8.546	8.155	7.466	6.967	6.458
Nachr.:						
Mineralöl- & Biokraftstoffprodukte im Internationalen Verkehr[b]	*437*	*471*	*529*	*608*	*666*	*677*
dav. Internationaler Luftverkehr	*331*	*348*	*380*	*435*	*465*	*438*
dav. Internationaler Seeverkehr	*107*	*123*	*148*	*173*	*201*	*239*
Energieeinsatz Industriekraftwerke[c]	*635*	*658*	*723*	*735*	*740*	*739*

Anmerkung: [a] einschließlich organische Anteile des Mülls. [b] in den Summenwerten für die jeweiligen Energieträger nicht enthalten. [c] in den Summenwerten für die jeweiligen Energieträger enthalten.

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Abbildung 5-56 und Tabelle 5-104 zeigen die Entwicklung der sektoralen Aufteilung der Endenergie bis 2050. Der Endenergiebedarf der privaten Haushalte geht von 2008 bis 2050 um ca. 900 PJ bzw. 36 % zurück, für den GHD-Sektor beläuft sich der Rückgang auf über 30 %. Der Endenergieverbrauch in der Industrie weist mit einem Rückgang von etwa 340 PJ bzw. 13 % den geringsten Rückgang aller nationalen Sektoren auf. Dies liegt unter anderem daran, dass der Verbrauch der Industriekraftwerke um gut 100 PJ bzw. 16 % zunimmt. Der Energieverbrauch des nationalen Verkehrs sinkt um etwa 620 PJ bzw. 27 % während der Endenergieverbrauch des internationale Luft- und Seeverkehr um 240 PJ bzw. 55 % steigt.

Abbildung 5-56 Sektorale Aufteilung des Endenergieverbrauchs im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (mit internationalem Luft- und Seeverkehr), 2010–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 5-104 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Sektoren im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Private Haushalte	2.531	2.550	2.262	2.036	1.831	1.627
GHD[a]	1.427	1.358	1.316	1.161	1.085	1.003
Industrie[b]	2.838	2.838	3.003	2.891	2.786	2.728
Nationaler Verkehr[c]	2.266	2.264	2.104	1.920	1.811	1.646
Internationaler Luft- und Seeverkehr	437	471	529	608	666	677
Endenergieverbrauch (weite Abgrenzung)	9.501	9.481	9.213	8.616	8.179	7.680
Nachr.:						
Internationaler Luftverkehr	*331*	*348*	*380*	*435*	*465*	*438*
Internationaler Seeverkehr	*107*	*123*	*148*	*173*	*201*	*239*
Verkehr Bauwirtschaft	*38*	*40*	*37*	*37*	*36*	*36*
Energieeinsatz Industriekraftwerke	*635*	*658*	*723*	*735*	*740*	*739*
Endenergieverbrauch (enge Abgrenzung)[d]	*8.759*	*8.700*	*8.342*	*7.708*	*7.238*	*6.702*

Anmerkungen: [a] ohne Energiebedarf des Verkehrs der Bauwirtschaft. [b] mit Industriekraftwerken des Verarbeitenden Gewerbes und des Übrigen Bergbaus. [c] mit Verkehr der Bauwirtschaft, ohne Pipelines. [d] Endenergieverbrauch (weite Abgrenzung) ohne Internationalen Seeverkehr und ohne Brennstoffeineinsatz der Industriekraftwerke.

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Da sich im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) der Mix der Endenergieträger deutlich zu Strom verschiebt, ist in Tabelle 5-105 die Entwicklung nach Sektoren und Verbrauchern detaillierter dargestellt. In der Industrie als größtem Stromendnachfrager steigt der Strombedarf bis 2020 zunächst an, sinkt aber bis 2050 wieder auf das Niveau von 2010. Im GHD-Sektor ist eine deutliche Steigerung der Stromendnachfrage zu verzeichnen, während sie im Haushaltssektor deutlich sinkt. In allen drei Sektoren wird durch neue Wärmepumpen Wärme unter Nutzung von Strom bereitgestellt. Im Verkehrssektor sinkt zum einen der Stromendverbrauch des Schienenverkehrs, gleichzeitig kommt es aber zu zusätzlichen Stromverbräuchen durch elektrischen Straßenverkehr. Sonstige neue Stromanwendungen spielen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) keine Rolle. In Summe sinkt der Stromendverbrauch zunächst, um dann – bedingt durch die neuen Verbraucher – ab 2030 wieder anzusteigen. Unter ausschließlicher Betrachtung klassischer Verbraucher, die 2050 knapp 90 % des gesamten Stromendverbrauchs ausmachen, sinkt der Stromverbrauch bis 2040 und bleibt anschließend konstant.

Der Bruttostromverbrauch im Jahr 2050 des AMS (2012) insgesamt quasi konstant gegenüber dem Jahr 2008, da der Rückgang des Bruttostromverbrauchs der klassischen Verbraucher um 9 % durch die neuen Stromverbraucher in etwa kompensiert wird. Die neuen Stromverbraucher haben im Jahr 2050 des AMS (2012) einen Anteil von 10 % am gesamten Bruttostromverbrauch.

Tabelle 5-105 Entwicklung der Stromverbräuche im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	TWh					
Industrie		219	233	224	219	220
*davon Wärmepumpen **		*0*	*0*	*1*	*1*	*1*
GHD		140	139	134	149	161
*davon Wärmepumpen **		*1*	*0*	*1*	*1*	*2*
Haushalte		141	128	122	113	104
*davon Wärmepumpen **		*2*	*3*	*4*	*6*	*8*
Schienenverkehr		17	15	14	12	10
Elektro-Pkw *		0	2	13	29	40
Straßengüterverkehr *		0	0	1	3	4
Luftzerlegung *			gibt es im AMS nicht			
Power-to-Gas H2 für Industrie *			gibt es im AMS nicht			
Großwärmepumpen/Elektroheizer Nahwärme *			gibt es im AMS nicht			
Kalibierung auf Energiebilanz		11	12	11	12	12
Summe Endenergie	524	527	529	518	536	551
zu 2010		*0%*	*0%*	*-2%*	*2%*	*4%*
Summe Endenergie klassische Verbraucher	524	525	524	499	496	496
zu 2010		*0%*	*0%*	*-5%*	*-6%*	*-5%*
Summe Endenergie neue Verbraucher		2	5	19	40	54
Anteil am gesamten Bruttostromverbrauch	*0*	*0%*	*1%*	*3%*	*7%*	*9%*
Umwandlungsverbrauch	14	14	11	9	9	7
Leitungsverluste	30	24	24	23	24	25
Verbrauch Einspeicherung Stromspeicher	8	9	12	16	14	13
Eigenbedarf Kraftwerke	40	40	30	23	20	18
Bruttostromverbrauch	616	613	606	590	603	614
zu 2008		*0%*	*-2%*	*-4%*	*-2%*	*0%*
Bruttostromverbrauch klassische Verbraucher	616	611	600	569	558	554
zu 2010		*0%*	*-2%*	*-7%*	*-9%*	*-9%*
Anteil		*100%*	*99%*	*96%*	*93%*	*90%*
Bruttostromverbrauch neue Verbraucher	0	3	6	21	45	60
zu 2010		*0%*	*122%*	*695%*	*1581%*	*2139%*
Anteil		*0%*	*1%*	*4%*	*7%*	*10%*
Export-Import-Saldo (Import positiv)	-22	-17	0	3	13	23
Importanteil am Bruttostromverbrauch	*-4%*	*-3%*	*0%*	*1%*	*2%*	*4%*
Bruttostromerzeugung	638	630	606	587	590	591
zu 2008		*-1%*	*-5%*	*-8%*	*-8%*	*-7%*

Die mit Sternchen (*) markierten Stromverbräuche sind den neuen Verbrauchern zugeordnet, die restlichen Verbraucher den klassischen Verbrauchern

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, ISI

5.10.2 Klimaschutzszenario 80

In der weiten Abgrenzung sinkt der Endenergieverbrauch des Klimaschutzszenario 80s in der weiten Abgrenzung von etwa 9.180 PJ im Jahr 2008 auf etwa 5.400 PJ im Jahr 2050, was einem Rückgang von 41 % entspricht. In der engen Abgrenzung ohne internationalen Seeverkehr und Industriekraftwerke sinkt der EEV von 8.440 PJ auf 4.640 PJ, also um 45 %.

Im Klimaschutzszenario 80 liegt im Zeitraum von 2008 bis 2050 der größte Rückgang an Endenergieträgern mit etwa 88 % bei den Mineralölprodukten. Gleichzeitig steigen die erneuerbaren Energien bis 2005 auf das 2,4fach des Wertes von 2008. Der Endenergiebedarf an fossilen Gasen sinkt um 63 % und der ohnehin schon niedrige Endenergieverbrauch an Kohlen sinkt um 43 %. Ebenso sinkt der Stromverbrauch. Fern- und Nahwärme steigt bis 2030 an und sinkt danach unter das Niveau von 2008. Sonstige Energieträger verzeichnen einen deutlichen Zuwachs, darin enthalten ist unter anderem der Wasserstoff, der aus Stromüberschüssen generiert wurde.

Abbildung 5-57 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 80 (ohne internat. Luft- und Seeverkehr), 2010–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 5-106 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 80, 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Braunkohle	76	76	44	16	5	2
Steinkohle	334	351	342	305	267	234
Mineralölprodukte	3.227	3.091	2.107	1.298	741	383
Gase (fossil)	2.041	2.029	1.826	1.461	1.039	754
Müll und sonstige	28	29	51	69	78	87
Biomasse[a] & Biogas	384	436	605	672	758	867
Solarenergie und Umweltwärme	0	0	63	97	134	140
Wasserstoff	0	0	0	1	5	30
Strom	1.887	1.859	1.690	1.616	1.670	1.701
Fern- und Nahwärme	766	674	761	801	775	737
Summe	8.743	8.546	7.490	6.335	5.471	4.936
Nachr.: Mineralöl- & Biokraftstoffprodukte im Internationalen Verkehr[b]	*437*	*471*	*508*	*554*	*575*	*551*
dav. Internationaler Luftverkehr	*331*	*348*	*369*	*401*	*406*	*364*
dav. Internationaler Seeverkehr	*107*	*123*	*139*	*154*	*169*	*187*
Energieeinsatz Industriekraftwerke[c]	*315*	*194*	*245*	*186*	*174*	*150*

Anmerkung: [a] einschließlich organische Anteile des Mülls. [b] in den Summenwerten für die jeweiligen Energieträger nicht enthalten. [c] in den Summenwerten für die jeweiligen Energieträger enthalten.

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, ISI

Abbildung 5-58 und Tabelle 5-107 zeigen die Entwicklung der sektoralen Aufteilung der Endenergie bis 2050. Der Endenergiebedarf der privaten Haushalte geht von 2008 bis 2050 um ca. 1250 PJ bzw. 50 % zurück, für den GHD-Sektor beläuft sich der Rückgang auf etwa 54 % (ca. 780 PJ). Der Endenergieverbrauch in der Industrie weist mit einem Rückgang von etwa 460 PJ bzw. 16 % den geringsten Rückgang aller nationalen Sektoren auf. Anders als im AMS (2012) tragen im KS 80 die Industriekraftwerke knapp 70 PJ (entsprechend −10 %) zur Reduktion des industriellen Energiebedarfs bei. Der Energieverbrauch des nationalen Verkehrs sinkt um etwa 1200 PJ bzw. 54 % während der Endenergieverbrauch des internationale Luft- und Seeverkehr um etwa 110 PJ bzw. 26 % steigt. Bemerkenswert ist, dass der Endenergiebedarf des internationalen Verkehrs 2040 ein Maximum erreicht und anschließend wieder sinkt.

Abbildung 5-58 Sektorale Aufteilung des Endenergiebedarfs im Klimaschutzszenario 80 (mit internationalem Luft- und Seeverkehr), 2010–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 5-107 Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs nach Sektoren im Klimaschutzszenario 80, 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Private Haushalte	2.531	2.550	2.052	1.691	1.454	1.283
GHD[a]	1.427	1.358	1.159	909	739	650
Industrie[b]	2.838	2.838	2.933	2.763	2.532	2.374
Nationaler Verkehr[c]	2.266	2.264	1.978	1.545	1.252	1.049
Internationaler Luft- und Seeverkehr	437	471	508	554	575	551
Endenergieverbrauch (weite Abgrenzung)	9.501	9.481	8.630	7.462	6.552	5.907
Nachr.:						
Internationaler Luftverkehr	*331*	*348*	*369*	*401*	*406*	*364*
Internationaler Seeverkehr	*107*	*123*	*139*	*154*	*169*	*187*
Verkehr Bauwirtschaft	*38*	*40*	*37*	*37*	*36*	*36*
Energieeinsatz Industriekraftwerke	*635*	*658*	*877*	*759*	*679*	*569*
Endenergieverbrauch (enge Abgrenzung)[d]	*8.759*	*8.700*	*7.614*	*6.550*	*5.704*	*5.151*

Anmerkungen: [a] ohne Energiebedarf des Verkehrs der Bauwirtschaft. [b] mit Industriekraftwerken des Verarbeitenden Gewerbes und des Übrigen Bergbaus. [c] mit Verkehr der Bauwirtschaft, ohne Pipelines. [d] Endenergieverbrauch (weite Abgrenzung) ohne Internationalen Seeverkehr und ohne Brennstoffeineinsatz der Industriekraftwerke.

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Noch deutlicher als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) verschiebt sich der Mix der Endenergieträger hin zu Strom. In Tabelle 5-108 ist die Entwicklung nach Sektoren

und Verbrauchern detaillierter dargestellt. In der Industrie als größtem Stromnachfrager sinkt der Stromendverbrauch bis 2050 um etwa 14 % gegenüber 2010. Im GHD-Sektor sinkt die Stromendnachfrage bis 2030 um 29 % und bleibt anschließend konstant. Ebenso sinkt der Stromendverbrauch des Haushaltssektors bis 2050 um 28 %. In allen drei Sektoren wird durch neue Wärmepumpen Wärme unter Nutzung von Strom bereitgestellt. Im Verkehrssektor sinkt zum einen der Stromendverbrauch des Schienenverkehrs, gleichzeitig kommt es aber zu zusätzlichen Stromendverbräuchen durch elektrischen Straßenverkehr, deutlich mehr als im AMS (2012). An neuen Verbrauchern werden Luftzerlegung für CCS, Wasserstoffproduktion für Industrieanwendungen und Großwärmepumpen zur Wärmebereitstellung in Nahwärmenetzen wichtig. In Summe sinkt der Stromendverbrauch zunächst, um dann – bedingt durch die neuen Verbraucher – ab 2030 wieder anzusteigen. Unter ausschließlicher Betrachtung klassischer Verbraucher, die 2050 etwa 73 % des gesamten Stromendverbrauchs ausmachen, sinkt der Stromverbrauch im gesamten betrachteten Zeitraum.

Der Bruttostromverbrauch im KS 80 sinkt bis zum Jahr 2050 insgesamt um 5 %. Der Rückgang des Bruttostromverbrauchs der klassischen Verbraucher ist mit 29 % deutlich größer als die Zunahme durch die neuen Stromverbraucher. Die neuen Stromverbraucher haben im Jahr 2050 des KS 80 einen Anteil von 26 % am gesamten Bruttostromverbrauch.

Tabelle 5-108 Entwicklung der Stromverbräuche im Klimaschutzszenario 80, 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	TWh					
Industrie		219	215	208	193	189
*davon Wärmepumpen **		*0*	*1*	*2*	*3*	*4*
GHD		140	112	100	100	100
*davon Wärmepumpen **		*1*	*1*	*1*	*2*	*2*
Haushalte		140	125	111	105	101
*davon Wärmepumpen **		*2*	*3*	*5*	*7*	*9*
Schienenverkehr		17	14	13	12	10
Elektro-Pkw *		0	1	15	51	69
Straßengüterverkehr *		0	0	1	3	4
Luftzerlegung *		0	0	2	6	9
Power-to-Gas H2 für Industrie *		0	0	0	2	12
Großwärmepumpen/Elektroheizer Nahwärme *		0	0	0	13	33
Kalibierung auf Energiebilanz		12	10	9	9	9
Summe Endenergie	524	527	478	460	494	536
zu 2008		*0%*	*-9%*	*-13%*	*-6%*	*2%*
Summe Endenergie klassische Verbraucher	524	525	472	433	407	394
zu 2010		*0%*	*-10%*	*-18%*	*-23%*	*-25%*
Summe neue Verbraucher		2	6	27	88	142
Anteil am gesamten Bruttostromverbrauch		*0%*	*1%*	*5%*	*16%*	*24%*
Umwandlungsverbrauch	14	14	11	9	8	6
Leitungsverluste	30	24	22	21	22	22
Verbrauch Einspeicherung Stromspeicher	8	9	8	11	12	9
Eigenbedarf Kraftwerke	40	40	26	18	14	11
Bruttostromverbrauch	616	613	544	518	549	584
zu 2010		*0%*	*-11%*	*-15%*	*-10%*	*-5%*
Bruttostromverbrauch klassische Verbraucher	616	611	538	488	453	431
zu 2010		*0%*	*-12%*	*-20%*	*-26%*	*-29%*
Anteil		*100%*	*99%*	*94%*	*83%*	*74%*
Bruttostromverbrauch neue Verbraucher	0	3	6	30	96	153
zu 2010		*0%*	*137%*	*1055%*	*3568%*	*5750%*
Anteil		*0%*	*1%*	*6%*	*17%*	*26%*
Export-Import-Saldo (Import positiv)	-22	-17	0	25	51	76
Importanteil am Bruttostromverbrauch	*-4%*	*-3%*	*0%*	*5%*	*9%*	*13%*
Bruttostromerzeugung	638	630	544	494	499	509
zu 2010		*0%*	*-14%*	*-22%*	*-21%*	*-19%*
Die mit Sternchen (*) markierten Stromverbräuche sind den neuen Verbrauchern zugeordnet, die restlichen Verbraucher den klassischen Verbrauchern						

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, ISI

5.10.3 Klimaschutzszenario 90

In der weiten Abgrenzung sinkt der Endenergieverbrauch des Klimaschutzszenario 80s in der weiten Abgrenzung von etwa 9.180 PJ im Jahr 2008 auf etwa 4.960 PJ im Jahr 2050, was einem Rückgang von 46 % entspricht. In der engen Abgrenzung ohne internationalen Seeverkehr und Industriekraftwerke sinkt der EEV von 8.440 PJ auf 4.220 PJ, also um 50 %.

Im Klimaschutzszenario 80 liegt im Zeitraum von 2008 bis 2050 der größte Rückgang an Endenergieträgern mit etwa 90 % bei den Mineralölprodukten. Gleichzeitig steigen die erneuerbaren Energien bis 2005 auf das 2,1fach des Wertes von 2008. Der Endenergiebedarf an Gasen sinkt um 73 % und der ohnehin schon niedrige Endenergieverbrauch an Kohlen sinkt um 54 %. Ebenso sinkt der Stromverbrauch. Fern- und Nahwärme steigt bis 2030 an und sinkt danach unter das Niveau von 2008. Sonstige Energieträger verzeichnen einen deutlichen Zuwachs, darin enthalten ist unter anderem der Wasserstoff, der aus Stromüberschüssen generiert wurde.

Abbildung 5-59 Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 90 (ohne internat. Luft- und Seeverkehr), 2010–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 5-109 Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Klimaschutzszenario 90, 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Braunkohle	76	76	41	15	4	2
Steinkohle	334	351	326	273	226	186
Mineralölprodukte	3.227	3.091	2.072	1.230	684	335
Gase (fossil)	2.041	2.029	1.824	1.448	1.028	546
Müll und sonstige	28	29	46	56	57	56
Biomasse[a] & Biogas	384	436	584	636	699	774
Solarenergie und Umweltwärme	0	0	60	90	112	110
Wasserstoff	0	0	0	1	13	167
Strom	1.887	1.859	1.604	1.534	1.577	1.580
Fern- und Nahwärme	766	674	866	870	852	732
Summe	8.743	8.546	7.423	6.152	5.252	4.487
Nachr.:						
Mineralöl- & Biokraftstoffprodukte im Internationalen Verkehr[b]	*437*	*471*	*507*	*552*	*572*	*548*
dav. Internationaler Luftverkehr	*331*	*348*	*368*	*398*	*403*	*361*
dav. Internationaler Seeverkehr	*107*	*123*	*139*	*154*	*169*	*187*
Energieeinsatz Industriekraftwerke[c]	*635*	*658*	*502*	*631*	*699*	*558*

Anmerkung: [a] einschließlich organische Anteile des Mülls. [b] in den Summenwerten für die jeweiligen Energieträger nicht enthalten. [c] in den Summenwerten für die jeweiligen Energieträger enthalten.

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, ISI

Abbildung 5-60 und Tabelle 5-110 zeigen die Entwicklung der sektoralen Aufteilung der Endenergie bis 2050. Der Endenergiebedarf der privaten Haushalte geht von 2008 bis 2050 um ca. 1390 PJ bzw. 55 % zurück, für den GHD-Sektor beläuft sich der Rückgang auf etwa 62 % (890 PJ). Der Endenergieverbrauch in der Industrie weist mit einem Rückgang von etwa 740 PJ bzw. 29 % den geringsten Rückgang aller nationalen Sektoren auf. Wie auch schon im KS 80 und anders als im AMS (2012) tragen die Industriekraftwerke zur Reduktion des industriellen Energiebedarfs bei und zwar um etwa 50 PJ, was einem Rückgang von 7 % entspricht. Der Energieverbrauch des nationalen Verkehrs sinkt um etwa 1320 PJ bzw. 58 % während der Endenergieverbrauch des internationale Luft- und Seeverkehr um etwa 110 PJ bzw. 12 % steigt. Wie auch schon im KS 80 erreicht Endenergiebedarf des internationalen Verkehrs 2040 ein Maximum erreicht und sinkt anschließend wieder.

Abbildung 5-60 Sektorale Aufteilung des gesamten Endenergiebedarfs im Klimaschutzszenario 90 (mit internationalem Luft- und Seeverkehr), 2010–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 5-110 Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs nach Sektoren im Klimaschutzszenario 90, 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ					
Private Haushalte	2.531	2.550	1.922	1.577	1.305	1.147
GHD[a]	1.427	1.358	1.141	854	648	541
Industrie[b]	2.838	2.838	2.629	2.638	2.569	2.140
Nationaler Verkehr[c]	2.266	2.264	1.958	1.512	1.235	1.023
Internationaler Luft- und Seeverkehr	437	471	507	552	572	548
Endenergieverbrauch (weite Abgrenzung)	9.501	9.481	8.156	7.133	6.329	5.398
Nachr.:						
Internationaler Luftverkehr	*331*	*348*	*368*	*398*	*403*	*361*
Internationaler Seeverkehr	*107*	*123*	*139*	*154*	*169*	*187*
Verkehr Bauwirtschaft	*38*	*40*	*37*	*37*	*36*	*36*
Energieeinsatz Industriekraftwerke	*635*	*658*	*502*	*631*	*699*	*558*
Endenergieverbrauch (enge Abgrenzung)[d]	*8.759*	*8.700*	*7.515*	*6.348*	*5.462*	*4.654*

Anmerkungen: [a] ohne Energiebedarf des Verkehrs der Bauwirtschaft. [b] mit Industriekraftwerken des Verarbeitenden Gewerbes und des Übrigen Bergbaus. [c] mit Verkehr der Bauwirtschaft, ohne Pipelines. [d] Endenergieverbrauch (weite Abgrenzung) ohne Internationalen Seeverkehr und ohne Brennstoffeineinsatz der Industriekraftwerke.

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Im Klimaschutzszenario 90 deckt elektrischer Strom mehr als ein Drittel des Endenergiebedarfs und wird damit zum dominierenden Endenergieträger. Die Entwicklung des

Stromverbrauchs nach Sektoren und Verbrauchern ist in Tabelle 5-111. In der Industrie als größtem Stromnachfrager sinkt der Stromendverbrauch bis 2050 um etwa 15 % gegenüber 2010. Im GHD-Sektor sinkt die Stromendnachfrage bis 2030 um 34 % und bleibt anschließend quasi konstant. Ebenso sinkt der Stromendverbrauch des Haushaltssektors bis 2050 um 39 %. In allen drei Sektoren wird durch neue Wärmepumpen Wärme unter Nutzung von Strom bereitgestellt. Im Verkehrssektor sinkt zum einen der Stromendverbrauch des Schienenverkehrs, gleichzeitig kommt es aber zu zusätzlichen Stromendverbräuchen durch elektrischen Straßenverkehr, deutlich mehr als im AMS (2012), aber weniger als im KS 80. An neuen Verbrauchern werden – wie auch schon im KS 80 – Luftzerlegung für CCS, Wasserstoffproduktion für Industrieanwendungen und Großwärmepumpen zur Wärmebereitstellung in Nahwärmenetzen wichtig. In Summe sinkt der Stromendverbrauch zunächst, um dann – bedingt durch die neuen Verbraucher – ab 2030 wieder anzusteigen. Unter ausschließlicher Betrachtung klassischer Verbraucher, die 2050 nur noch 65 % des gesamten Stromendverbrauchs ausmachen, sinkt der Stromendverbrauch im gesamten betrachteten Zeitraum.

Der Bruttostromverbrauch sinkt insgesamt bis 2050 nur um 1 %. Der Rückgang des Bruttostromverbrauchs der klassischen Verbraucher im KS 90 ist mit 34 % noch einmal deutlich größer als im KS 80 und auch größer als die Zunahme durch die neuen Stromverbraucher. Die neuen Stromverbraucher haben im Jahr 2050 des KS 90 einen Anteil von 34 % am gesamten Bruttostromverbrauch.

Tabelle 5-111 Entwicklung der Stromverbräuche Klimaschutzszenario 90, 2008–2050

	2008	2010	2020	2030	2040	2050
	TWh					
Industrie		219	212	204	189	186
*davon Wärmepumpen **		*0*	*5*	*8*	*10*	*12*
GHD		140	109	93	93	94
*davon Wärmepumpen **		*1*	*1*	*1*	*2*	*3*
Haushalte		140	108	91	86	85
*davon Wärmepumpen **		*2*	*3*	*4*	*6*	*7*
Schienenverkehr		0	0	0	0	0
Elektro-Pkw *		0	2	24	56	66
Verkehr (Rest = Kalibrierung auf Energiebilanz)		17	17	17	17	17
Straßengüterverkehr *		0	0	1	3	4
Luftzerlegung *		0	0	2	6	9
Power-to-Gas H2 für Industrie *		0	0	0	5	66
Großwärmepumpen/Elektroheizer Nahwärme *		0	0	0	8	22
Kalibierung auf Energiebilanz		12	10	9	8	8
Summe Endenergie	524	527	458	441	472	557
zu 2010		*0%*	*-13%*	*-16%*	*-10%*	*6%*
Summe Endenergie klassische Verbraucher	524	525	448	400	375	368
zu 2010		*0%*	*-15%*	*-24%*	*-29%*	*-30%*
Summe neue Verbraucher		2	11	41	97	188
Anteil am gesamten Bruttostromverbrauch	*0*	*0%*	*2%*	*8%*	*18%*	*31%*
Umwandlungsverbrauch	14	14	10	7	6	5
Leitungsverluste	30	24	21	20	21	21
Verbrauch Einspeicherung Stromspeicher	8	9	8	13	24	19
Eigenbedarf Kraftwerke	40	40	24	15	10	8
Bruttostromverbrauch	616	613	521	497	534	609
zu 2010		*0%*	*-15%*	*-19%*	*-13%*	*-1%*
Bruttostromverbrauch klassische Verbraucher	616	611	509	451	425	405
zu 2010		*0%*	*-17%*	*-26%*	*-30%*	*-34%*
Anteil		*100%*	*98%*	*91%*	*80%*	*66%*
Bruttostromverbrauch neue Verbraucher	0	3	12	46	108	205
zu 2010		*0%*	*349%*	*1631%*	*3981%*	*7608%*
Anteil		*0%*	*2%*	*9%*	*20%*	*34%*
Export-Import-Saldo (Import positiv)	-22	-17	0	23	48	74
Importanteil am Bruttostromverbrauch	*-4%*	*-3%*	*0%*	*5%*	*9%*	*12%*
Bruttostromerzeugung	638	630	521	474	485	536
zu 2010		*0%*	*-17%*	*-25%*	*-23%*	*-15%*
Die mit Sternchen (*) markierten Stromverbräuche sind den neuen Verbrauchern zugeordnet, die restlichen Verbraucher den klassischen Verbrauchern						

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

5.10.4 Vergleich Szenarien

Wie Abbildung 5-61 zeigt, ergeben sich in den Endenergiesektoren im Klimaschutzszenario 80- und Klimaschutzszenario 90 im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) zwei unterschiedliche Trends. Langfristig ersetzen die erneuerbaren Energien und sonstige Energieträger (worunter vor allem Wasserstoff fällt) relevante Anteile an fossilen Energieträgern. Zum anderen sinkt langfristig der

Endenergiebedarf, das bedeutet, dass der Endenergieverbrauch an fossilen Energieträgern deutlich stärker sinkt als der Endenergieverbrauch an erneuerbaren und sonstigen Energieträgern steigt.

Im Vergleich zwischen Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 fällt auf, dass der Endenergieverbrauch an fossilen Energieträgern (und hier besonders an Erdgas) im Klimaschutzszenario 90 deutlich stärker sinkt, gleichzeitig aber der Endenergiebedarf an elektrischem Strom, erneuerbaren und sonstigen Energieträgern weniger stark steigt. Dies ist auf insgesamt höhere Endenergieeinsparungen im Klimaschutzszenario 90 als im Klimaschutzszenario 80 zurückzuführen.

Abbildung 5-61 Differenzen des Endenergiebedarf zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 bzw. zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 90 nach Energieträger, 2020–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Wie die vergleichende Darstellungen der sektoralen Endenergienachfrage von Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90 gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) zeigt (Abbildung 5-62), liegt der Endenergiebedarf im Jahr 2030 im KS 80 und im KS 90 deutlich niedriger als im AMS (2012). Kurzfristig bis 2020 können die privaten Haushalte den Endenergieverbrauch im KS 80 und im KS 90 am deutlichsten senken. Sie haben im KS 90 auch ein deutlicheres Reduktionspotential gegenüber dem KS 80. Langfristig kann der Verkehrssektor gegenüber dem AMS (2012) noch deutliche Endenergieeinsparungen bringen.

Abbildung 5-62 Sektorale Differenzen des Endenergiebedarfs zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 80 bzw. zwischen Aktuelle-Maßnahmen- und Klimaschutzszenario 90, 2020–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Einen detaillierten Vergleich der Stromverbräuche der drei Szenarien bietet Abbildung 5-63. Sofern nur die klassischen Stromverbräuche in den Endverbrauchssektoren verglichen werden, ergeben sich in allen drei Szenarien Stromverbrauchsreduktionen, wobei die Stromverbräuche im KS 80 und insbesondere im KS 90 deutlich stärker sinken als im AMS (2012). Unter Berücksichtigung der neuen Stromanwendungen lassen sich in allen drei Szenarien zwei unterschiedliche Phasen ausmachen. In der ersten Phase von 2010 bis 2030 ist der Stromverbrauch quasi konstant (AMS (2012)) bzw. sinkt deutlich (KS 80 und KS 90). Anschließend folgt in allen drei Szenarien eine Trendumkehr und die Stromverbräuche steigen in allen drei Szenarien wieder, bis sie im Jahr 2050 auf einem ähnlichen Niveau wie im Jahr 2008 liegen.

Abbildung 5-63 Entwicklung des Stromverbrauchs in den Endenergiesektoren, 2010–2050

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Der erneuerbare Anteil am Bruttoendenergieverbrauch (EE-Anteil am BEV, Tabelle 5-112) entwickelt sich zunächst in allen drei Szenarien etwa gleich und steigt von gut 10 % im Jahr 2010 auf etwa 18 bis 20 %. Damit wird das Ziel des Energiekonzepts von 18 % erreicht. In den folgenden Jahren zeigen sich dann aber deutlich unterschiedliche Entwicklungen: Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) verlangsamt sich – bedingt durch nur vergleichsweise geringe Energieeinsparungen und nur langsames Wachstum der Erneuerbaren Energien – die Zunahme des EE-Anteils am BEV und steigt daher nur auf gut 28 % im Jahr 2050. Damit werden im AMS (2012) die Ziele für den EE-Anteil am BEV ab 2030 verfehlt. Anders ist die Entwicklung im Klimaschutzszenario 80 und 90. In beiden Fällen kann der Energieverbrauch deutlich gesenkt und die Nutzung erneuerbarer Energien gesteigert werden, sodass der EE-Anteil im Jahr 2050 bei 63 % im Klimaschutzszenario 80 und sogar bei 76 % im Klimaschutzszenario 90 liegt – also deutlich über dem Ziel von 60 %.

Tabelle 5-112 Entwicklung des erneuerbaren Anteils am Bruttoendenergieverbrauch (2010–2050)

	2010	2020	2030	2040	2050
	PJ				
Gesamter Bruttoendenergiebedarf					
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario	9.867	9.558	8.901	8.389	7.853
Klimaschutzszenario 80	9.867	8.939	7.790	6.821	6.168
Klimaschutzszenario 90	9.867	8.523	7.487	6.618	5.572
Erneuerbarer Beitrag zum Bruttoendenergiebedarf					
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario	1.013	1.732	1.994	2.151	2.229
Klimaschutzszenario 80	1.013	1.752	2.140	2.976	3.902
Klimaschutzszenario 90	1.013	1.637	2.082	3.113	4.254
Erneuerbarer Anteil am Bruttoendenergiebedarf					
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario	10,3%	18,1%	22,4%	25,6%	28,4%
Klimaschutzszenario 80	10,3%	19,6%	27,5%	43,6%	63,3%
Klimaschutzszenario 90	10,3%	19,2%	27,8%	47,0%	76,3%
Zielpfad Energiekonzept		*18,0%*	*30,0%*	*45,0%*	*60,0%*

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, ISI

5.11 Gesamte verbrennungsbedingte Treibhausgasemissionen

Die gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen, also alle Emissionen die auf Verbrennungsprozesse zurückzuführen sind, entwickeln sich deutlich unterschiedlich im Vergleich der drei Szenarien. Tabelle 5-113 zeigt die Emissionsentwicklungen für CO_2, CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien (einschließlich der dem internationalen Flug- und Seeverkehr zuzurechnenden Emissionen) sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick.

Die Emissionen der Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O sinken im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (AMS (2012)) in der Periode 2005 bis 2050 von 844 Mio. t CO_2-Äqu. auf 461 Mio. t CO_2-Äqu., also um insgesamt etwa 383 Mio. t CO_2-Äqu. Im Klimaschutzszenario 80 (KS 80) liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 167 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 677 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Im Klimaschutzszenario 90 (KS 90) sinken die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 749 Mio. t CO_2-Äqu. auf 95 Mio. t CO_2-Äqu. Das bedeutet, dass die energiebedingten THG-Emissionen im KS 80 bis 2050 um 64 % und im KS 90 um 79 % niedriger als im AMS (2012) sind.

Für die Periode 2005 bis 2020 ergibt sich damit im AMS (2012) eine Emissionssenkung von 18 % und für den Zeitraum von 2005 bis 2050 von 45 %. Die Minderungen für das KS 80 belaufen sich auf 31% bzw. 80 % und für das KS 90 auf 34 % bzw. 89 %. Bezogen auf die Ausgangswerte des Jahres 1990 betragen die entsprechenden Reduktionsraten bis 2050 im AMS (2012), KS 80 und KS 90 45 %, 84 % bzw. 89 %.

In allen drei Szenarien werden fossile Energieträger zumindest teilweise durch biogene Energieträger ersetzt. Biogene Energieträger können bezüglich ihrer CO_2-Emissionen als klimaneutral betrachtet werden. Da bei der Verbrennung von Biomasse dennoch in der Treibhausgasbilanz zu berücksichtigende CH_4- und N_2O-Emissionen entstehen,

ergibt sich daraus, dass in allen drei Szenarien die CH_4- und N_2O-Emissionen weniger schnell sinken als die CO_2-Emissionen. So ergeben sich CO_2-Emissionsminderungen von 46 % (AMS (2012)) bzw. 81 % (KS 80) bzw. 89 % (KS 90) für das Jahr 2050 gegenüber 2005, jedoch für CH_4 nur −32 %[58] (AMS (2012)) bzw. 17 % (KS 80) bzw. 48 % (KS 90) und für 32 % (AMS (2012)) bzw. 60 % (KS 80) bzw. 72 % (KS 90) N_2O. Dennoch dominieren auch noch im Jahr 2050 die CO_2-Emissionen gegenüber den CH_4- und N_2O-Emissionen.

Tabelle 5-113 Emissionsentwicklungen der gesamten energiebedingten Treibhausgase im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CO_2-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	997.652	835.300	795.715				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				678.835	576.431	505.893	453.694
Klimaschutzszenario 80				578.511	414.536	277.233	162.344
Klimaschutzszenario 90				550.837	373.842	212.735	92.226
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	4.475	1.968	2.899				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				2.967	2.920	2.697	2.594
Klimaschutzszenario 80				2.540	2.368	1.860	1.642
Klimaschutzszenario 90				2.833	2.426	1.366	1.016
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	8.310	6.473	6.601				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				6.074	5.327	4.820	4.400
Klimaschutzszenario 80				5.057	3.995	3.157	2.561
Klimaschutzszenario 90				4.801	3.547	2.449	1.802
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	1.010.436	843.741	805.215				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				687.876	584.678	513.409	460.687
Klimaschutzszenario 80				586.109	420.899	282.250	166.547
Klimaschutzszenario 90				558.471	379.815	216.549	95.044
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-31,9	-42,1	-49,2	-54,4
Klimaschutzszenario 80				-42,0	-58,3	-72,1	-83,5
Klimaschutzszenario 90				-44,7	-62,4	-78,6	-90,6
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-18,5	-30,7	-39,2	-45,4
Klimaschutzszenario 80				-30,5	-50,1	-66,5	-80,3
Klimaschutzszenario 90				-33,8	-55,0	-74,3	-88,7

Anmerkungen: nur energiebedingte Emissionen in der Abgrenzung des NIR; mit CO2-Emissionen aus der Rauchgasentschwefelung sowie mit internationalem Flugverkehr und Hochseeschifffahrt

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

[58] Der Wert von −32 % bedeutet hier, dass die CH_4-Emissionen gegenüber 2005 nicht sinken oder steigen. Diese Emissionssteigerung ist größtenteils bereits in den Jahren von 2005 erfolgt, in diesem Zeitraum sind die Emissionen um beinahe die Hälfte gestiegen. Bis 2020 werden die CH_4-Emissionen noch weiter leicht steigen um anschließend bis 2050 zu sinken – aber dennoch oberhalb des Wertes von 2005 zu liegen.

6 Projektion für die nicht-energiebedingten Treibhausgasemissionen

6.1 Industrieprozesse (CO_2-, CH_4- und N_2O-Emissionen)

6.1.1 Annahmen und Parameter

Die zentrale Vermeidungsmaßnahme für die prozessbedingten CO_2-Emissionen ist CCS und wird ab 2030 berücksichtigt. Definitionsgemäß erfolgt die Einführung von CCS maßnahmengetrieben. Dabei wird CCS im Klimaschutzszenario 80 nur in Sektoren mit hohen absoluten Emissionen (> 2 Mio. t CO_2 pro Jahr) berücksichtigt, sofern das CO_2 in erhöhter Konzentration anfällt.[59] Eine hohe CO_2-Konzentration im Abgasstrom ist eine vorteilhafte Voraussetzung für CCS in Industrieprozessen, wie beispielsweise der Herstellung von Kalkstein, Zement sowie Eisen und Stahl, weil dies den Energiebedarf für die Abtrennung und die Investitionskosten deutlich senkt (Öko-Institut 2012). Im Klimaschutzszenario 90 kommt CCS auch in Sektoren mit niedrigeren absoluten Emissionen und mittlerer CO_2-Konzentration zum Einsatz.

Aufgrund der langen Vorlaufzeiten für die Genehmigung von Speichern wird angenommen, dass der Einsatz von CCS im Jahr 2030 beginnt. Es wird davon ausgegangen, dass 20% der Emissionen gleichmäßig in allen Sektoren in 2030 abgeschieden werden und 2050 die Abscheidung 100% beträgt.

Hinsichtlich der Projektionen für die prozessbedingten N_2O- und CH_4-Emissionen werden folgenden Annahmen getroffen:

- Für die Adipin- und Salpetersäureproduktion wird dem zukünftigen Produktionsniveaus eine moderate Produktionszunahme unterstellt.
- Mit der Einbeziehung der Adipin- und Salpetersäureproduktion in das EU-Emissionshandelssystem ab 2013 – und der Möglichkeit, in diesem Bereich bereits ab 2008 Joint-Implementation-Projekte durchzuführen – werden erhebliche wirtschaftliche Anreize zur Aufrüstung der entsprechenden Produktionsanlagen mit Einrichtungen zur N_2O-Emissionsminderung wirksam. Im Vergleich zu den deutlichen (Opportunitäts-)Kosten für EU-Emissionsberechtigungen werden Maßnahmen zur N_2O-Emissionsminderung bei der Adipin- und Salpetersäureproduktion wirtschaftlich hoch attraktiv.
- Die übrigen erfassten Quellgruppen haben einen so geringen Beitrag zu den Emissionen, dass die Emissionsniveaus für den Projektionszeitraum konstant gehalten werden.

[59] Unter erhöhten Konzentrationen werden dabei CO_2-Gehalte im Bereich von etwa 20-30 % verstanden, die damit etwa doppelt so hoch sind wie die von Kohlekraftwerken.

6.1.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (CO_2-Emissionen)

Mit Blick auf die besonders relevanten prozessbedingten CO_2–Emissionen können im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) insbesondere durch einen stärkeren Einsatz der Elektrostahlproduktion (siehe Tabelle 5-19) die Emissionen um ca. 27% bis 2050 im Vergleich zum Jahr 2005 gesenkt werden (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1 Entwicklung der prozessbedingten CO_2-Emissionen für ausgewählte Produktionsprozesse im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2005-2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt t CO_2					
Zementklinkerproduktion	12.921	12.188	12.609	11.725	10.709	10.012
Kalksteinproduktion	5.454	5.019	5.542	4.434	5.542	5.542
Glasproduktion	706	762	839	879	906	944
Keramikproduktion	359	309	309	309	309	309
Sodaasche	313	323	323	323	323	323
Ammoniakproduktion	7.805	7.437	7.437	5.950	7.437	7.437
Karbidproduktion	16	17	17	17	17	17
Katalysatorenabbrand	2.883	2.992	2.052	1.582	1.688	1.511
Umwandlungsverluste	3.776	3.776	2.590	1.996	2.130	1.907
Methanolherstellung	1.314	718	718	574	718	718
Rußproduktion	652	1.341	1.341	1.341	1.341	1.341
Eisen- und Stahl-Produktion	20.929	18.208	17.824	12.002	13.787	12.096
Herstellung von Ferrolegierungen	8	6	6	6	6	6
(Primär-) Aluminium-Produktion	883	551	752	664	589	532
Summe	58.018	53.645	52.359	39.454	45.501	42.695
ggü. 2005	*-*	*-7,5%*	*-9,8%*	*-32,0%*	*-21,6%*	*-26,4%*

Quellen: UBA (2012 a+b), Berechnungen des Öko-Instituts

6.1.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 (CO_2-Emissionen)

Die Einführung von CCS führt im Klimaschutzszenario 80 zu einer Emissionsreduktion der prozessbedingten CO_2-Emissionen von 8 Mio. t CO_2 im Jahr 2030. Bis zum Jahr 2050 steigt die Emissionsreduktion auf 34 Mio. t CO_2 an (Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3). Für die Herstellung von Zement, Kalkstein sowie Eisen und Stahl wurde die Anwendung von CCS sowohl für die prozessbedingten als auch für die energiebedingten Emissionen[60] modelliert.

Berücksichtigt man zusätzlich die in anderen Sektoren inventarisierten energiebedingten Emissionseinsparungen, so führt die Einführung von CCS insgesamt zu einer Emissionsreduktion von 62,5 Mio. t CO_2 im Jahr 2050.

[60] Konventionsbedingt wird die Reduktion der energiebedingten Emissionen in den jeweiligen Energiesektoren berichtet.

Tabelle 6-2 Im Klimaschutzszenario 80 abgeschiedene prozessbedingte und energiebedingte CO_2-Mengen durch CCS in 2030-2050

	2030	2035	2040	2045	2050
	Prozessbedingte Emissionen				
	kt t CO_2				
Zementklinkerproduktion	2.345	4.430	6.425	8.284	10.012
Kalksteinproduktion	1.108	2.217	3.325	4.434	5.542
Ammoniakproduktion	1.487	2.975	4.462	5.950	7.437
Methanolproduktion	144	287	431	574	718
Eisen- und Stahl-Produktion	2.968	5.443	7.439	9.105	10.365
Summe prozessbedingt	8.052	15.351	22.083	28.347	34.075
	Energiebedingte Emissionen				
	kt t CO_2				
Zementklinkerproduktion	661	1.307	1.663	1.989	2.201
Kalksteinproduktion	275	509	701	870	1.007
Eisen- und Stahl-Produktion	6.576	12.343	17.295	21.610	25.200
Summe energiebedingt	7.512	14.160	19.659	24.469	28.408
Summe prozess-&energiebedingt	15.564	29.511	41.742	52.816	62.483

Quellen: Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 6-3 Entwicklung der prozessbedingten CO_2-Emissionen für ausgewählte Produktionsprozesse im Klimaschutzszenario 80, 2005-2050

	2005	**2010**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
	kt t CO_2					
Zementklinkerproduktion	12.921	12.188	12.609	9.380	4.283	0
Kalksteinproduktion	5.454	5.019	5.542	4.434	2.217	0
Glasproduktion	706	762	839	879	906	944
Keramikproduktion	359	309	309	309	309	309
Sodaasche	313	323	323	323	323	323
Ammoniakproduktion	7.805	7.437	7.437	5.950	2.975	0
Karbidproduktion	16	17	17	17	17	17
Katalysatorenabbrand	2.883	2.992	2.052	1.582	813	588
Umwandlungsverluste	3.776	3.776	2.590	1.996	1.026	742
Methanolherstellung	1.314	718	718	574	287	0
Rußproduktion	652	1.341	1.341	1.341	1.341	1.341
Eisen- und Stahl-Produktion	20.929	18.208	17.824	12.002	5.089	138
Herstellung von Ferrolegierungen	8	6	6	6	6	6
(Primär-) Aluminium-Produktion	883	551	752	664	589	532
Summe	58.018	53.645	52.359	39.454	20.181	4.938
ggü. 2005	*-*	*-7,5%*	*-9,8%*	*-32,0%*	*-65,2%*	*-91,5%*

Quelle: UBA (2012 a+b), Berechnungen des Öko-Instituts

6.1.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 (CO_2-Emissionen)

Im Klimaschutzszenario 90 wird CCS zusätzlich in den kleineren Quellgruppen Katalysatorenabbrand, Umwandlungsverluste und Rußproduktion eingesetzt. Im Vergleich

zum Klimaschutzszenario 80 geht die Nutzung von CCS insgesamt leicht zurück, weil z.B. bei der Stahlproduktion von einer höheren Materialeffizienz ausgegangen wurde und somit weniger prozessbedingtes CO_2 anfällt.

Tabelle 6-4 Mit CCS im Klimaschutzszenario 90 abgeschiedene prozessbedingte und energiebedingte CO_2-Mengen in 2030-2050

	2030	2035	2040	2045	2050
	Prozessbedingte Emissionen				
	kt t CO_2				
Zementklinkerproduktion	2.345	4.430	6.425	8.284	10.012
Kalksteinproduktion	1.108	2.217	3.325	4.434	5.542
Ammoniakproduktion	1.487	2.975	4.462	5.950	7.437
Katalysatorenabbrand	303	446	427	443	464
Umwandlungsverluste	382	563	539	560	586
Methanolproduktion	144	287	431	574	718
Ruß	268	536	805	1.073	1.341
Eisen- und Stahl-Produktion	2.667	707	6.343	1.275	8.366
Summe prozessbedingt	8.704	12.161	22.758	22.592	34.467
	Energiebedingte Emissionen				
	kt t CO_2				
Zementklinkerproduktion	661	1.118	1.372	1.602	1.717
Kalksteinproduktion	273	504	694	862	998
Eisen- und Stahl-Produktion	5.877	14.800	14.555	23.981	19.946
Summe energiebedingt	6.810	16.422	16.622	26.445	22.662
Summe prozess-&energiebedingt	15.515	28.584	39.380	49.037	57.128

Quellen: Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 6-5 Entwicklung der prozessbedingten CO_2-Emissionen für ausgewählte Produktionsprozesse im Klimaschutzszenario 90, 2005-2050

	2005	**2010**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
	kt t CO_2					
Zementklinkerproduktion	12.921	12.188	12.609	9.380	4.283	0
Kalksteinproduktion	5.454	5.019	5.542	4.434	2.217	0
Glasproduktion	706	762	839	859	876	902
Keramikproduktion	359	309	309	309	309	309
Sodaasche	313	323	323	323	323	323
Ammoniakproduktion	7.805	7.437	7.437	5.950	2.975	0
Karbidproduktion	16	17	17	17	17	17
Katalysatorenabbrand	2.883	2.992	2.052	1.211	285	0
Umwandlungsverluste	3.776	3.776	2.590	1.528	359	0
Methanolherstellung	1.314	718	718	574	287	0
Rußproduktion	652	1.341	1.341	1.073	536	0
Eisen- und Stahl-Produktion	20.929	18.208	17.822	10.796	4.354	131
Herstellung von Ferrolegierungen	8	6	6	6	6	6
(Primär-) Aluminium-Produktion	883	551	752	655	578	519
Summe	58.018	53.645	52.357	37.114	17.405	2.206
ggü. 2005	*-*	*-7,5%*	*-9,8%*	*-36,0%*	*-70,0%*	*-96,2%*

Quellen: UBA (2012 a+b), FhG-ISI, Berechnungen des Öko-Instituts

6.1.5 Ergebnisse der Projektionen für prozessbedingte CH_4 und N_2O–Emissionen

Die wichtigsten Emissionsquellen bei den prozessbedingten CH_4- und N_2O-Emissionen sind die Adipinsäureproduktion und die Salpetersäureproduktion. Deshalb konzentriert sich die Modellierung auf diese beiden Prozesse. Für die Adipinsäureproduktion werden aufgrund aktueller Erfahrungen aus den Joint-Implementation-Projekten eine Emissionsminderung in Höhe von 50% im Vergleich zu 2009 für die Salpetersäureproduktion und 90% für die Adipinsäureproduktion berücksichtigt (Tabelle 6-6). Bis zum Jahr 2050 wird im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) für die Summe der prozessbedingten CH_4- und N_2O-Emissionen eine Emissionsminderung von -60% bis zum Jahr 2050 im Vergleich zu 2005 erreicht.

Tabelle 6-6 Entwicklung der CH_4- und N_2O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2005-2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt					
CH_4-Emissionen						
Rußproduktion	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Eisen- und Stahlproduktion	0,22	0,21	0,23	0,22	0,21	0,21
Zwischensumme CH_4	0,23	0,23	0,25	0,25	0,24	0,23
N_2O-Emissionen						
Rohstahlherstellung	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04
Salpetersäureproduktion	15,87	9,78	7,33	8,50	5,62	5,62
Adipinsäureherstellung	10,57	2,31	2,44	2,96	3,58	4,33
Herstellung von Caprolactam	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Herstellung von N-Dodecandisäure	C	C	C	C	C	C
N_2O-Einsatz als Anästhetika	1,30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Anderer (technischer) N_2O-Einsatz	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
N_2O aus Sprengstoffeinsatz	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Zwischensumme N_2O	28,05	13,31	10,99	12,68	10,41	11,15
Summe (kt CO_2-Äqu.)	8.699,23	4.130,04	3.412,96	3.934,59	3.231,45	3.461,20
ggü. 2005	-	*-52,5%*	*-60,8%*	*-54,8%*	*-62,9%*	*-60,2%*

Quellen: UBA (2012 a+b), Berechnungen des Öko-Instituts

Im Klimaschutzszenario 80 und im Klimaschutzszenario 90 werden weitergehende Emissionsminderungen bei den industriellen N_2O-Emissionen berücksichtigt. Das höhere CO_2-Preisniveau führt zu stärkeren Reduktionen der Emissionen bei der Adipin- und Salpetersäureproduktion ab 2020.

- Dabei wird zu Grunde gelegt, dass beide in Deutschland betriebenen Adipinsäureanlagen eine Emissionsreduktion in Höhe von 99,9% erreichen. Diese Emissionsreduktion basiert auf den Erfahrungen aus der JI-Anlage in Krefeld.
- Für die Salpetersäureproduktion wird ebenfalls eine höhere Abscheiderate berücksichtigt. Dabei wird für alle Anlagen der Emissionsfaktor eines erfolgreichen CDM-Projekts einer deutschen Firma (BASF) in Ägypten verwendet. So ergibt sich eine Emissionsreduktion in Höhe von 98% für die Salpetersäureproduktion.

Tabelle 6-7 Entwicklung der CH_4- und N_2O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Klimaschutzszenario 80 und 90, 2005-2050

	2005	2010	2015	2020	2025	2030
	kt					
CH_4-Emissionen						
Rußproduktion	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Eisen- und Stahlproduktion	0,22	0,21	0,23	0,23	0,23	0,22
Zwischensumme CH_4	0,23	0,23	0,25	0,25	0,25	0,24
N_2O-Emissionen						
Rohstahlherstellung	0,06	0,06	0,00	0,05	0,00	0,04
Salpetersäureproduktion	15,87	9,78	6,80	0,15	0,17	0,18
Adipinsäureherstellung	10,57	2,31	2,22	0,01	0,02	0,02
Herstellung von Caprolactam	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Herstellung von N-Dodecandisäure	C	C	C	C	C	C
N_2O-Einsatz als Anästhetika	1,30	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Anderer (technischer) N_2O-Einsatz	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
N_2O aus Sprengstoffeinsatz	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Zwischensumme N_2O	28,05	13,31	10,19	1,39	1,35	1,41
Summe (kt CO_2-Äqu.)	8.699,23	4.130,04	3.164,10	435,63	423,00	441,19
ggü. 2005	*-*	*-52,5%*	*-63,6%*	*-95,0%*	*-95,1%*	*-94,9%*

Quellen: UBA (2012 a+b), FhG-ISI, Berechnungen des Öko-Instituts

Das im Bereich der prozessbedingten CH_4 - und N_2O -Emissionen umsetzbare Minderungspotenzial dürfte mit Blick auf die im Klimaschutzszenario 80 und im Klimaschutzszenario 90 unterstellten Maßnahmen sowie die nur untergeordneten Emissionsbeiträge der anderen Industrieprozesse weitgehend ausgeschöpft sein.

6.1.6 Vergleich der Szenarien

Tabelle 5-91 zeigt die Emissionsentwicklungen der Treibhausgase von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick.

Die Emissionen der Treibhausgase gehen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (AMS (2012)) in der Periode 2005 bis 2050 von 68 Mio. t CO_2-Äqu. auf 49 Mio. t CO_2-Äqu., also um insgesamt etwa 19 Mio. t CO_2-Äqu. zurück. Im Klimaschutzszenario 80 (KS 80) liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 7 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 61 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Im Klimaschutzszenario 90 (KS 90) sinken die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 64 Mio. t CO_2-Äqu. auf 4 Mio. t CO_2-Äqu.

Für die Periode 2005 bis 2020 ergibt sich damit im AMS (2012) eine Emissionsminderung von 15 % und für den Zeitraum von 2005 bis 2050 von 28 %. Die entsprechenden Vergleichswerte für das KS 80 belaufen sich auf 20 % bzw. 90 % und für das KS 90 auf 20 % bzw. 94 %.

Bezogen auf die Ausgangswerte des Jahres 1990 betragen die entsprechenden Reduktionsraten bis 2050 im AMS (2012), KS 80 und KS 90 43%, 92% bzw. 95%.

Tabelle 6-8 Emissionsentwicklungen im Bereich der Industrieprozesse (CO_2, CH_4, N_2O)) im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CO_2-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	62.757	59.652	55.228				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				54.998	51.026	47.261	44.455
Klimaschutzszenario 80				54.119	41.214	21.941	6.698
Klimaschutzszenario 90				54.117	38.875	19.165	3.966
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	4	5	5				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				5	5	5	5
Klimaschutzszenario 80				5	5	5	5
Klimaschutzszenario 90				5	5	5	5
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	24.434	8.694	4.125				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				3.408	3.929	4.469	5.012
Klimaschutzszenario 80				430	436	442	448
Klimaschutzszenario 90				430	435	440	446
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	87.195	68.351	59.358				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				58.411	54.960	51.734	49.472
Klimaschutzszenario 80				54.554	41.655	22.388	7.151
Klimaschutzszenario 90				54.552	39.314	19.610	4.417
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-33,0	-37,0	-40,7	-43,3
Klimaschutzszenario 80				-37,4	-52,2	-74,3	-91,8
Klimaschutzszenario 90				-37,4	-54,9	-77,5	-94,9
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-14,5	-19,6	-24,3	-27,6
Klimaschutzszenario 80				-20,2	-39,1	-67,2	-89,5
Klimaschutzszenario 90				-20,2	-42,5	-71,3	-93,5
Anmerkungen: nur prozessbedingte Emissionen in der Abgrenzung des NIR, ohne CO2-Emissionen aus der Rauchgas-entschwefelung							

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

6.2 Industrieprozesse und Produktverwendung (Verwendung von FKW, HFKW und SF_6)

Die hier projizierten Emissionen an fluorierten Treibhausgasen beinhalten Emissionen an FKW, HFKW und SF_6 aus sämtlichen im deutschen Emissionsinventar erfassten Quell-Aktivitäten solcher Emissionen, d.h.

- Herstellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen,
- Herstellung von Aluminium und
- Verwendung von FKW, HFKW und SF_6 inklusive der Entsorgung F-gas haltiger Produkte.

Emissionen an den ebenfalls treibhausgasaktiven Fluor**chlor**kohlenwasserstoffen (FCKW) und anderen unter dem Montreal-Protokoll geregelten halogenierten Kohlen-

wasserstoffen sind in Einklang mit den Berichterstattungsregeln unter dem Kyoto-Protokoll nicht in diesem Bericht enthalten.

6.2.1 Annahmen und Parameter

Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Im Rahmen des Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)s wurden folgende Maßnahmen zur Reduzierung von teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (HFKW) und perfluorierten Kohlenwasserstoffen (FKW) berücksichtigt:

a) Wartungspflicht/Dichtheitsprüfungen für ortsfeste Kälte- und Klimaanlagen, Wärmepumpen und Brandschutzsysteme mit mehr als 3 kg fluorierten Treibhausgase laut Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (F-Gas-Verordnung)

b) Wartungspflicht/Dichtheitsprüfungen für mobile Anlagen mit mehr als 3 kg fluorierten Treibhausgase, die der Kühlung von Gütern beim Transport dienen, gemäß der Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV)

c) Einhaltung maximaler Leckageraten für ortsfeste Anwendungen gemäß Chemikalien-Klimaschutzverordnung

d) Verwendungsverbote laut Verordnung (EG) Nr. 842/2006 für synthetische Treibhausgase in den Erzeugnissen/Einrichtungen: neuartige Aerosole, Autoreifen, Schuhe, Schallschutzscheiben, Brandschutzsysteme (FKW) und Feuerlöscher (FKW). Weitgehende Substitution als Treibmittel in Einkomponentenschäumen (PU-Montageschäume)

e) Emissionsminderung bei fluorierten Treibhausgasen in der Halbleiterherstellung (freiwillige Selbstverpflichtung)

f) Einbezug der F-Gas-Emissionen der Primäraluminiumindustrie in den europäischen Emissionshandel

g) Substitution von HFKW durch Kältemittel mit einem GWP ≤ 150 sowie Verbesserung der Dichtheit bei mobilen Klimaanlagen für ausgewählte Fahrzeugklassen (Pkw und kleine Nutzfahrzeuge) laut Richtlinie 2006/40/EG (MAC-Richtlinie) bzw. deren nationaler Umsetzung durch die Straßenverkehrszulassungsordnung: ab 2011 für neue Fahrzeugtypen, ab 2017 für alle neuen Fahrzeuge dieser Klasse

h) Förderung von Maßnahmen, die zu einer vorzeitigen Substitution von HFKW durch Kältemittel mit einem GWP ≤ 150 bei Pkw-Klimaanlagen führen (Meseberg Beschluss Nr. 23): Hier ist bisher keine Umsetzung erfolgt

i) Förderung der Entwicklung und Markteinführung besonders energieeffizienter und klimafreundlicher Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln im Rahmen des Klimaschutz-Effizienz-Fonds (Meseberg Beschluss Nr. 23, bisher umgesetzt

durch das Förderprogramm „Gewerbliche Kälteanlagen“ der Nationalen Klimaschutzinitiative)

Maßnahmen zur Reduzierung von SF_6

j) Substitution von SF_6 als Schutzgas in großen Produktionsstätten (jährlich verwendete Menge an SF_6 über 850 kg) der Magnesium- Produktion (Magnesiumdruckguss) laut Verordnung (EG) Nr. 842/2006

k) Selbstverpflichtung deutscher Schaltanlagenhersteller, -nutzer und SF_6-Produzenten zu SF_6-Emissionsbegrenzungsmaßnahmen bei elektrischen Betriebsmitteln

Klimaschutzszenario 80

Für das Klimaschutzszenario 80 wurden folgende, über das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) hinausgehende Maßnahmen angenommen:

a) Verzicht auf Neuanlagen mit fluorierten Kältemitteln in bestehenden und neuen Supermärkten

b) Ergänzung des Anhangs II der Verordnung (EG) 842/2006 (Verbot des Inverkehrbringens F-Gase enthaltender Geräte) um die Anwendungsbereiche:

- Haushaltskühlgeräte
- steckerfertige Geräten in der Gewerbekälte

c) Verzicht auf H-FKW bei

- PU-Schaumprodukten
- XPS-Hartschäumen
- mobilen Raumklimageräten
- Haushaltswärmepumpen

d) Verzicht auf die Verwendung fluorierter Kältemittel mit einem GWP ≥ 20 in Neuanlagen der Gebäudeklimatisierung und der Industriekühlung

e) Verwendung von HFKW in Aerosolen (Dosier- und technische Aerosole) nur noch in Ausnahmefällen

f) Substitution von HFKW in mobilen Kälte- bzw. Klimaanlagen durch Kältemittel mit GWP ≤ 150 für alle Fahrzeugtypen und mobilen Anwendungen

g) Weitgehende Substitution der fluorierten Kältemittel in allen weiteren Kälte- und Klimaanlagen

h) Substitution von SF_6 als Schutzgas in weiteren Produktionsstätten der Magnesium-Produktion (d.h. auch bei Anlagen mit jährlicher verwendeter Menge an SF_6 unter 850 kg)

Der im November 2012 von der EU-Kommission vorgelegte Vorschlag für eine Revision der EU-Verordnung zu fluorierten Treibhausgasen ist im Klimaschutzszenario 80

nicht explizit berücksichtigt. Eine Revision wie von der EU-Kommission vorgeschlagen würde allerdings Substitutionsmaßnahmen in Deutschland anstoßen, die sich zum Teil mit berücksichtigten technischen Substitutionsoptionen decken.

Klimaschutzszenario 90

Für das Klimaschutzszenario 90 wurden nach 2020 folgende, über das Klimaschutzszenario 80 hinausgehende Maßnahmen angenommen:

a) Verzicht auf SF_6 als Schutzgas in neuen elektrischen Schaltgeräten und Schaltanlagen sowie in elektrischen Bauteilen für die Energieübertragung (Zu- und Anbauten für Schaltanlagen)

b) Verzicht auf SF_6 im Schutzgas-Schweißen

c) Verzicht auf SF_6 in Flugzeug-Radarsystemen

Treibhausgasemissionen aus ozonschichtschädigenden Substanzen

Neben den F-Gasen sind auch die meisten ozonschichtschädigenden Substanzen (ODS, ozone-depleting substances) Treibhausgase. Darunter fallen (teilhalogenierte) Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW, H-FCKW) und Halone. Diese sind über das Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht und nicht über das Kyoto-Protokoll geregelt. Allerdings werden im Montreal-Protokoll Produktion und Verbrauch von ODS, nicht aber Emissionen aus der Freisetzung von ODS werden hingegen nicht berücksichtig. Andererseits werden diese Emissionen auch nicht in der Treibhausgasberichterstattung aufgeführt und folglich auch nicht in den Klimaschutzszenarien berücksichtigt. Schätzungen zu ODS-Emissionen auf nationaler oder europäischer Ebene sind nicht verfügbar. Laut Gschrey & Schwarz (2009) wurden auf globaler Ebene im Jahr 2005 ODS emittiert, die 1700 Mio. t CO_2-Äq. entsprachen. Damit waren diese Emissionen etwa doppelt so hoch, wie die globalen F-Gas-Emissionen (926 Mio. t CO_2-Äq.). Da im Montrealer Protokoll ein stufenweiser globaler Ausstieg aus der Produktion und Nutzung von ODS vereinbart wurde, wird entsprechend Gschrey & Schwarz (2009) davon ausgegangen, dass die auf ODS zurückzuführenden Treibhausgasemissionen bis 2050 auf ein vernachlässigbares Niveau zurückgehen werden.

6.2.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Mit dem beschriebenen methodischen Ansatz ergibt sich für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) die in Abbildung 6-1 und Tabelle 6-9 gezeigte Emissionsentwicklung.

Abbildung 6-1 Emissionen an fluorierten Treibhausgasen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Quelle: UBA 2012c, Öko-Recherche 2011, Eigene Darstellung des Öko-Instituts

Der größte Emissionsbeitrag muss danach auch in Zukunft für die HFKW-Emissionen bilanziert werden. Mit den berücksichtigten Maßnahmen ist auch in der bis 2010 stark wachsenden Quellgruppe der HFKW-Emissionen aus Kühl- und Klimaanlagen bis 2030 ein absoluter Rückgang der Emissionen zu erwarten. Nach 2030 steigen die HFKW-Emissionen wieder leicht. Die SF_6-Emissionen aus der Entsorgung von Schallschutzfenstern wachsen weiter bis 2020 und nehmen als Folge des Verwendungsverbots von 2007 danach stark ab. Insgesamt sinkt im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) das Emissionsniveau für HFKW, FKW und SF_6 für den Zeithorizont 2030 um ca. 42 % unter das Niveau von 2005 und um ca. 46 % unter das Niveau von 1995, dem Basisjahr der deutschen F-Gas-Emissionen unter dem Kyoto-Protokoll. Nach 2030 wird im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bis 2050 ein leichter Anstieg der Emissionen erwartet, weil eine weiter zunehmende Anwendung von F-Gas-basierten Produkten und Systemen (v. a. Kälte und Klima) ohne zusätzliche technische Substitutionen der F-gase angenommen wird. Für 2050 liegen die Reduktionsraten gegenüber 2005 bei ca. 35 % und gegenüber 1995 bei ca. 39 %.

Tabelle 6-9 Entwicklung der Emissionen an fluorierten Treibhausgasen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.[b]				
HFKW-Emissionen					
Herstellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF6	166	200	200	200	200
Kühl- und Klimaanlagen	10.086	5.447	4.680	5.266	5.806
Schaumherstellung	670	910	962	1.014	1.066
Feuerlöscher	24	15	9	9	9
Aerosole und medizinische Dosiersprays	457	525	530	543	538
Halbleiterproduktion	9	12	12	12	12
Nicht spezifiziert/vertraulich[a]	186	22	25	27	30
Zwischensumme HFKW	*11.597*	*7.131*	*6.418*	*7.071*	*7.661*
FKW-Emissionen					
Aluminiumproduktion	135	184	162	144	131
Kühl- und Klimaanlagen	53	NO	NO	NO	NO
Herstellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF6	NA,NO	C,NA,NO	C,NA,NO	C,NA,NO	C,NA,NO
Halbleiterproduktion	121	189	189	189	189
Fotovoltaik	0	IE	IE	IE	IE
Zwischensumme FKW	*309*	*373*	*351*	*333*	*320*
SF_6-Emissionen					
Magnesium-Gießereien	107	111	123	136	150
Herstellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF6	90	100	100	100	100
Halbleiterproduktion	18	17	17	17	17
Elektrische Anlagen	543	614	614	614	614
Reifenbefüllung	14	NO	NO	NO	NO
Spürgas	4	4	4	4	4
Schallschutzfenster	2.223	3.521	214	NO	NO
Optische Glasfasern	197	123	123	123	123
Fotovoltaik	55	55	55	55	55
Nicht spezifiziert/vertraulich[a]	IE	377	385	395	405
Zwischensumme SF_6	3.250	4.923	1.636	1.445	1.469
Summe fluorierte Treibhausgase	15.155	12.426	8.405	8.849	9.450
ggü. 1995[c]	*-1,8%*	*-19,5%*	*-45,6%*	*-42,7%*	*-38,8%*
ggü. 2005	*5,0%*	*-13,9%*	*-41,8%*	*-38,7%*	*-34,5%*

Anmerkungen:
CRF-Notierungscodes: IE: included elswhere; NA: not appliccable; NO: not occuring
[a] in den Inventaren als vertraulich gekennzeichneite Emissionswerte aus verschiedenen Anwendungsbereichen, z.B. Aluminiumguss, Teilchenbeschleuniger, Radaranlagen, Schweißen, Sportschuhe, Lösemittelanwendungen
[b] berechnet mit den für die Kyoto-Berichterstattung maßgeblichen GWP-Werten des 2. IPCC Assessment Report
[c] Für die deutschen Emissionen an fluorierten Treibhausgasen dient im Kyoto-Protokoll 1995 als Basisjahr.

Quelle: UBA 2012c, Öko-Recherche 2011, Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

6.2.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Mit dem beschriebenen methodischen Ansatz ergibt sich für das Klimaschutzszenario 80 die in Abbildung 6-2 und Tabelle 6-10 gezeigte Emissionsentwicklung.

Abbildung 6-2 Emissionen an fluorierten Treibhausgasen im Klimaschutzszenario 80

Quelle: UBA 2012c, Öko-Recherche 2011, Eigene Darstellung des Öko-Instituts

Im Klimaschutzszenario 80 werden die HFKW-Emissionen bis 2030 noch sehr viel stärker reduziert als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012). Die SF_6-Emissionen liegen dagegen nur geringfügig unter dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), die FKW-Emissionen bleiben unverändert. Innerhalb des Klimaschutzszenarios 80 liegt nach 2020 der größte Emissionsanteil nicht mehr bei den HFKW sondern bei SF_6. Insgesamt sinkt im Klimaschutzszenario 80 das Emissionsniveau für HFKW, FKW und SF_6 für den Zeithorizont 2030 um ca. 83 % unter das Niveau von 2005 und um ca. 84 % unter das Niveau von 1995, dem Basisjahr der deutschen F-Gas-Emissionen unter dem Kyoto-Protokoll. Nach 2030 wird im Klimaschutzszenario 80 bis 2050 ein weiterer leichter Abfall der Emissionen erwartet, für 2050 liegen die Reduktionsraten gegen über 2005 bei ca. 86 % und gegenüber 1995 bei ca. 87 %.

Tabelle 6-10 Entwicklung der Emissionen an fluorierten Treibhausgasen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Klimaschutzszenario 80

	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.[b]				
HFKW-Emissionen					
Herstellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF6	166	200	200	200	200
Kühl- und Klimaanlagen	10.086	4.667	294	116	31
Schaumherstellung	670	87	87	87	87
Feuerlöscher	24	15	9	9	9
Aerosole und medizinische Dosiersprays	457	96	98	101	100
Halbleiterproduktion	9	12	12	12	12
Nicht spezifiziert/vertraulich[a]	186	26	30	32	36
Zwischensumme HFKW	*11.597*	*5.103*	*730*	*557*	*475*
FKW-Emissionen					
Aluminiumproduktion	135	184	162	144	131
Kühl- und Klimaanlagen	53	NO	NO	NO	NO
Herstellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF6	NA,NO	C,NA,NO	C,NA,NO	C,NA,NO	C,NA,NO
Halbleiterproduktion	121	189	189	189	189
Fotovoltaik	0	IE	IE	IE	IE
Zwischensumme FKW	*309*	*373*	*351*	*333*	*320*
SF_6-Emissionen					
Magnesium-Gießereien	107	NO	NO	NO	NO
Herstellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF6	90	100	100	100	100
Halbleiterproduktion	18	17	17	17	17
Elektrische Anlagen	543	614	614	614	614
Reifenbefüllung	14	NO	NO	NO	NO
Spürgas	4	4	4	4	4
Schallschutzfenster	2.223	3.521	214	NO	NO
Optische Glasfasern	197	123	123	123	123
Fotovoltaik	55	55	55	55	55
Nicht spezifiziert/vertraulich[a]	IE	296	296	296	296
Zwischensumme SF_6	3.250	4.731	1.424	1.210	1.210
Summe fluorierte Treibhausgase	15.155	10.206	2.505	2.100	2.005
ggü. 1995[c]	*-1,8%*	*-33,9%*	*-83,8%*	*-86,4%*	*-87,0%*
ggü. 2005	*5,0%*	*-29,3%*	*-82,6%*	*-85,5%*	*-86,1%*

Anmerkungen:
CRF-Notierungscodes: IE: included elswhere; NA: not appliccable; NO: not occuring
[a] in den Inventaren als vertraulich gekennzeichneite Emissionswerte aus verschiedenen Anwendungsbereichen, z.B. Aluminiumguss, Teilchenbeschleuniger, Radaranlagen, Schweißen, Sportschuhe, Lösemittelanwendungen
[b] berechnet mit den für die Kyoto-Berichterstattung maßgeblichen GWP-Werten des 2. IPCC Assessment Report
[c] Für die deutschen Emissionen an fluorierten Treibhausgasen dient im Kyoto-Protokoll 1995 als Basisjahr.

Quelle: UBA 2012c, Öko-Recherche 2011, Eigene Berechnungen des Öko-Instituts

6.2.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Mit dem beschriebenen methodischen Ansatz ergibt sich für das Klimaschutzszenario 90 die in Abbildung 6-3 und Tabelle 6-11 gezeigte Emissionsentwicklung.

Abbildung 6-3 Emissionen an fluorierten Treibhausgasen im Klimaschutzszenario 90

Quelle: UBA 2012c, Öko-Recherche 2011, Berechnungen des Öko-Institut

Im Klimaschutzszenario 90 werden die SF_6-Emissionen nach 2020 noch stärker reduziert als im Klimaschutzszenario 80. Die HFKW- und FKW-Emissionen bleiben unverändert. Innerhalb des Klimaschutzszenarios 90 tragen ab 2020 HFKW und SF_6 zu etwa gleichen Teilen zu den F-Gas-Emissionen bei. Nach 2030 sinken sowohl HFKW als auch SF_6 in etwa auf das Niveau der FKW-Emissionen. Insgesamt sinkt im Klimaschutzszenario 90 das Emissionsniveau für HFKW, FKW und SF_6 für den Zeithorizont 2030 um ca. 87 % unter das Niveau von 2005 und um ca. 88 % unter das Niveau von 1995, dem Basisjahr der deutschen F-Gas-Emissionen unter dem Kyoto-Protokoll. Nach 2030 wird im Klimaschutzszenario 80 bis 2050 ein weiterer leichter Abfall der Emissionen erwartet, für 2050 liegen die Reduktionsraten gegen über 2005 bei ca. 91 % und gegenüber 1995 bei ca. 92 %.

Tabelle 6-11 Entwicklung der Emissionen an fluorierten Treibhausgasen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Klimaschutzszenario 90

	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.[b]				
HFKW-Emissionen					
Herstellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF6	166	200	200	200	200
Kühl- und Klimaanlagen	10.086	4.667	294	116	31
Schaumherstellung	670	87	87	87	87
Feuerlöscher	24	15	9	9	9
Aerosole und medizinische Dosiersprays	457	96	98	101	100
Halbleiterproduktion	9	12	12	12	12
Nicht spezifiziert/vertraulich[a]	186	26	30	32	36
Zwischensumme HFKW	*11.597*	*5.103*	*730*	*557*	*475*
FKW-Emissionen					
Aluminiumproduktion	135	184	162	144	131
Kühl- und Klimaanlagen	53	NO	NO	NO	NO
Herstellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF6	NA,NO	C,NA,NO	C,NA,NO	C,NA,NO	C,NA,NO
Halbleiterproduktion	121	189	189	189	189
Fotovoltaik	0	IE	IE	IE	IE
Zwischensumme FKW	*309*	*373*	*351*	*333*	*320*
SF_6-Emissionen					
Magnesium-Gießereien	107	NO	NO	NO	NO
Herstellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF6	90	100	100	100	100
Halbleiterproduktion	18	17	17	17	17
Elektrische Anlagen	543	614	166	115	65
Reifenbefüllung	14	NO	NO	NO	NO
Spürgas	4	4	4	4	4
Schallschutzfenster	2.223	3.521	214	NO	NO
Optische Glasfasern	197	123	123	123	123
Fotovoltaik	55	55	NO	NO	NO
Nicht spezifiziert/vertraulich[a]	IE	296	123	123	123
Zwischensumme SF_6	3.250	4.731	747	482	432
Summe fluorierte Treibhausgase	15.155	10.206	1.829	1.373	1.227
ggü. 1995[c]	*-1,8%*	*-33,9%*	*-88,2%*	*-91,1%*	*-92,1%*
ggü. 2005	*5,0%*	*-29,3%*	*-87,3%*	*-90,5%*	*-91,5%*

Anmerkungen:
CRF-Notierungscodes: IE: included elswhere; NA: not appliccable; NO: not occuring
[a] in den Inventaren als vertraulich gekennzeichneite Emissionswerte aus verschiedenen Anwendungsbereichen, z.B. Aluminiumguss, Teilchenbeschleuniger, Radaranlagen, Schweißen, Sportschuhe, Lösemittelanwendungen
[b] berechnet mit den für die Kyoto-Berichterstattung maßgeblichen GWP-Werten des 2. IPCC Assessment Report
[c] Für die deutschen Emissionen an fluorierten Treibhausgasen dient im Kyoto-Protokoll 1995 als Basisjahr.

Quelle: UBA 2012c, Öko-Recherche 2011, Berechnungen des Öko-Institut

6.2.5 Vergleich der Szenarien

Tabelle 5-91 zeigt die Emissionsentwicklungen für CO_2, CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick.

Die Emissionen der Treibhausgase im Bereich der F-Gase steigen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (AMS (2012)) in der Periode 2005 bis 2050 von 7 Mio. t CO_2-Äqu. auf 9 Mio. t CO_2-Äqu., also um etwa 2 Mio. t CO_2-Äqu.. Im Klimaschutzszenario 80 (KS 80) liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 2 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 5 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Im Klimaschutzszenario 90 (KS 90) sinken die THG-Emissionen gegenüber 2005 bis zum Jahr 2050 um 6 Mio. t CO_2-Äqu. auf 1 Mio. t CO_2-Äqu.

Für die Periode 2005 bis 2020 ergibt sich damit im AMS (2012) eine Emissionssteigerung von 76 % und für den Zeitraum von 2005 bis 2050 von 34 %. Im KS 80 steigen die Emissionen von 2005 bis 2020 um 45 %, sinken aber von 2005 bis 2050 um 72 %. Das KS 90 ist bis 2020 identisch mit dem KS 80, die Minderung gegenüber 2005 bis 2050 beträgt 83 %.

Bezogen auf die Ausgangswerte des Jahres 1995[61] betragen die entsprechenden Reduktionsraten bis 2050 im AMS (2012), KS 80 und KS 90 20 %, 83 % bzw. 90 %.

[61] 1995 ist das Basisjahr der deutschen F-Gas-Emissionen unter dem Kyoto-Protokoll.

Tabelle 6-12 Emissionsentwicklungen für industrielle Prozesse (F-Gase) im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
HFKW-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	4.592	2.000	11.597				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				7.131	6.418	7.071	7.661
Klimaschutzszenario 80				5.103	730	557	475
Klimaschutzszenario 90				5.103	730	557	475
FKW-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	2.627	781	309				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				373	351	333	320
Klimaschutzszenario 80				373	351	333	320
Klimaschutzszenario 90				373	351	333	320
SF6-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	4.642	4.269	3.250				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				4.923	1.636	1.445	1.469
Klimaschutzszenario 80				4.731	1.424	1.210	1.210
Klimaschutzszenario 90				4.731	747	482	432
Summe HFKW+FKW+SF6							
Entwicklung 1990 – 2010	11.861	7.050	15.155				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				12.426	8.405	8.849	9.450
Klimaschutzszenario 80				10.206	2.505	2.100	2.005
Klimaschutzszenario 90				10.206	1.829	1.373	1.227
Summe HFKW+FKW+SF6				Veränderung ab 1995[a] in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-19,6	-29,1	-25,4	-20,3
Klimaschutzszenario 80				-34,0	-78,9	-82,3	-83,1
Klimaschutzszenario 90				-14,0	-84,6	-88,4	-89,7
Summe HFKW+FKW+SF6				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				76,3	19,2	25,5	34,0
Klimaschutzszenario 80				44,8	-64,5	-70,2	-71,6
Klimaschutzszenario 90				44,8	-74,1	-80,5	-82,6

Anmerkung: [a] Für HFKW, FKW und SF_6 ist das Basisjahr im Rahmen der Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls 1995.

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

6.3 Abfallwirtschaft

6.3.1 Annahmen und Parameter

6.3.1.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Die entscheidenden regulatorischen Rahmenbedingungen für den Abfallsektor sind auf die Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASi) sowie ab 2001 die Abfallablagerungsverordnung (AbfAblV) und das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrW) zurückzuführen. Anforderungen der Abfallablagerungsverordnung und der Deponieverwertungsverordnung wurden 2009 in die Deponieverordnung integriert.

Am 30.03.2011 hat die Bundesregierung die Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes beschlossen. Das Gesetz ist am 1. Juni 2012 in Kraft getreten. Hierbei wird dem Recycling eine höhere Bedeutung als der energetischen Verwertung beigemessen; bis 2020 sollen 65 Prozent aller Siedlungsabfälle recycelt werden.

Als weitere regulative Instrumente sind die Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen (30. BImSchV) sowie die Novelle der Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (17. BImSchV) zu nennen. Die Abfallablagerungsverordnung unterbindet seit Juni 2005 die Ablagerung unbehandelter Abfälle, welche für die Ausgasung organischer Stoffe verantwortlich sind. Die Anforderungen der Abfallablagerung sind mittlerweile Bestandteil der Deponieverordnung Gleichfalls ermöglicht die anderweitige Beseitigung (dazu gehört die Verbrennung) oder biologisch-mechanischen Abfallbehandlung (BMU 2006) eine Minderung des Abfallaufkommens. Eine wichtige Rolle spielt zum einen die Abfallzusammensetzung und die aus den unterschiedlichen Halbwertszeiten der Abfallkomponenten resultierende Methanbildung in Deponien (Einfluss der Methanbildung auf die Inputmenge). Zum anderen beeinflusst die Deponiegaserfassung und -nutzung die Höhe der CH_4-Emissionen (hier Einfluss der Methanbildung durch das technische Verfahren).

Für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) stellt die Abwasserbehandlung und die daraus resultierenden Methan-Emissionen die steuernde Größe dar (Tabelle 6-13). Die Abwasserbehandlung in kommunalen Kläranlagen sowie Kleinkläranlagen erfolgt unter aeroben Bedingungen, weswegen keine Methanemissionen auftreten.

Tabelle 6-13 Trendentwicklung des Abfallaufkommens für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	Aktivitätsdaten in kt						
Abfallinput							
Deponien	40249	8.506	1.439	1.439	1.439	1.439	1.439
Biologische Abfallbehandlungsanlagen	724	9.030	8.860	8.860	8.860	8.860	8.860
Biologisch-mechanische Abfallbehandlung	NA	1.246	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Kommunale Abwasserbehandlung	4847	4.714	4.744	4.679	4.587	4.411	4.165
THG relevantes Abfallaufkommen	45820	23.495	20.043	19.978	19.886	19.710	19.464
ggü. 2010				-0,33%	-0,78%	-1,66%	-2,89%

Quelle: UBA (2012b), Eigene Berechnungen

Methan-Emissionen aus der Abfalldeponierung: Der biogene Anteil im Siedlungsabfall hat seit 2005 deutlich abgenommen (siehe Abbildung 6-4). Bei gleichbleibender Methanerfassungsrate (50 Prozent[62]) wird die Verringerung des biologisch abbaubaren

[62] Eine zentrale Rolle bei der Berechnung der Methan-Emissionen aus Deponien spielt die Methanerfassungsrate. In den letzten Jahren wurde von einer Erfassungsrate von 50 Prozent ausgegangen. Es hat sich aber gezeigt, dass diese Rate für die letzten Jahre über-

Anteils unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung (wie Verringerung des Anteils an Textilien, Windeln und organischen Abfällen) hier berechnet. Der kinetische Ansatz im Modell spiegelt die realitätsnahe zeitliche Entwicklung der Methanbildung über mehrere Jahre ab. Abbildung 6-4 zeigt den Effekt der verzögerten Reduktion der Methan-Emissionen nach signifikanter Abnahme der deponierten, organischen Abfallmenge Anfang der 1990er Jahre.

Abbildung 6-4 Entwicklung der Methan-Emissionen aus der Abfalldeponierung in Deutschland, 1990-2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Emissionen aus der kommunalen Abwasserbehandlung: Für die Berechnung der Methan-Emissionen wird der Anteil der Bewohner, der an abflusslose Gruben angeschlossen ist, unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung bis 2050 herangezogen.

---

schätzt wurde und daher zukünftig mit höheren Methanemissionen aus diesem Bereich zu rechnen ist. Laut dem Nationalen Inventarbericht 2012 soll die Kinetik der Deponiegasbildung aus MBA-Abfällen weiter untersucht und in einem verbesserten Modellansatz beschrieben werden. Für zukünftige Projektionen werden die Ergebnisse über Methanbildungsraten berücksichtigt werden. Weiterhin sollen nach Angaben des Statistischen Bundesamts Daten zur Deponiegasfassung und -verwertung auch bei Deponien in der Nachsorgephase erhoben werden. Dazu sollen ab 2012 in der Umweltstatistik erstmals auf allen Deponien einheitlich erhobene Daten zur Deponiegasfassung vorliegen.

Für die Berechnung der Lachgas-Emissionen wird der Ernährungsstand und die damit verbundene Eiweißzufuhr[63] der Bevölkerung im Jahr 2010 für die zukünftige Jahre angenommen. Von einer Änderung des Ernährungsverhaltens wird nicht ausgegangen.

Methan- und Lachgas-Emissionen aus der Kompostierung und der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung: Für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen wird von einer gleichbleibenden Abfallmenge (Stand 2010) ausgegangen.

6.3.1.2 Klimaschutzszenario 80

Für dieses Szenario werden innovative Verfahren und erleichterte Anwendungen insbesondere bei der Nachsorge älterer Deponien berücksichtigt, welche durch die Deponieverordnung für Deponiebetreiber ermöglicht werden.

Gleichfalls wird der verminderte Proteingehalt im Abwasser bedingt durch reduzierte Eiweißzufuhr pro Kopf sowie der Einsatz organischer Reststoffe (im Abfall) als Ersatz von Biomasse für die bioenergetische Verwendung (Verstromung) für dieses Szenario herangezogen (Tabelle 6-14).

Tabelle 6-14 Trendentwicklung des Abfallaufkommens für das Klimaschutzszenario 80

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	Aktivitätsdaten in kt						
Abfallinput							
Deponien	40249	8.506	1.439	1.433	1.419	1.392	1.358
Biologische Abfallbehandlungsanlagen	724	9.030	8.860	8.572	8.572	8.572	8.572
Biologisch-mechanische Abfallbehandlung	NA	1.246	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Kommunale Abwasserbehandlung	4847	4.714	4.744	4.080	3.847	3.670	3.796
THG relevantes Abfallaufkommen	45820	23.495	20.043	19.085	18.838	18.634	18.726
ggü. 2010				-4,78%	-6,01%	-7,03%	-6,57%

Quelle: UBA (2012b), Eigene Berechnungen

Methan-Emissionen aus der Abfalldeponierung: Als weiterführende Maßnahme wird bei konstanten Siedlungsabfallmengen von einer verbesserten Deponiegaserfassung und -nutzung ausgegangen. Die erfassten Methan-Emissionen aus Deponien werden dabei bis auf 70 Prozent erhöht.

[63] FAO-Daten zum Eiweißanteil tierischen Ursprungs: http://www.fao.org/economic/ess/ess-fs/fs-data/ess-fadata/en/

Eine Verringerung des biologisch abbaubaren Anteils unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung (wie Verringerung des Anteils an Textilien, Windeln und organischen Abfällen) wird hier ebenfalls berechnet.

Methan-Emissionen aus der kommunalen Abwasserbehandlung: Die Grundsätze der Abwasserbeseitigung und die Abwasserbeseitigungspflicht nach § 55 und 56 WHG und der Betrieb von Abwasseranlagen nach § 60 WHG schließen eine Nutzung von abflusslosen Gruben für die Entsorgung von Haushaltsabwässern nicht aus. Artikel 3 der EU-Richtlinie 91/271/EWG ermöglicht die Einrichtung individueller Systeme oder anderer geeignete Maßnahmen, die das gleiche Umweltschutzniveau gewährleisten, wenn die Einrichtung einer Kanalisation nicht gerechtfertigt werden kann (übermäßige Kosten, Gemeinden mit weniger als 2000 Einwohnern). In einzelnen Bundesländern wird in Gebieten, in denen der Entwässerungsplan einen Anschluss an öffentliche Abwasserbehandlungsanlagen nicht vorsieht, der Bau von Kleinkläranlagen durch finanzielle Zuschüsse unterstützt. Aufgrund dieser Unterstützung ist der Anteil der Bevölkerung, die noch abflusslose Gruben betreiben, in den vergangenen Jahren kontinuierlich gesunken. Im Klimaschutzszenario 80 wurde daher unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung zusätzlich eine jährliche Abnahme des Anteils der Einwohner mit abflusslosen Gruben um sieben Prozent angenommen. Dies entspricht der mittleren Änderungsrate aus den letzten verfügbaren Statistiken der Jahre 2002 bis 2007 (Destatis, 2007).

Lachgas-Emissionen aus der kommunalen Abwasserbehandlung: Für das Klimaschutzszenario 80 wurden die Ziele aus dem Koalitionsvertrag für die 17. Legislaturperiode hinsichtlich des Ausbaus von Angeboten an Familienbildung für eine gesunde Ernährung von Kindern und Erwachsenen (Zeilen 1801-1805, Kapitel Ernährungsbildung) berücksichtigt. Für die Berechnung der Lachgas-Emissionen wird angenommen, dass über das verbesserte Ernährungsbewusstsein der Bevölkerung der jährliche Pro-Kopf-Fleischkonsum von derzeit ca. 60 auf 52 Kilogramm Fleisch (14 Prozent Reduktionspotential) reduziert wird. Dies entspricht bei täglichem Fleischverzehr von ca. 170 Gramm Fleisch einem Verzicht auf Fleisch an einem Tag in der Woche - der Wert weicht allerdings noch stark von der Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung ab (jährlich maximal 31 Kilogramm Fleisch pro Kopf), sodass hier noch ein höheres Reduktionspotential vorhanden wäre.

In der Berechnung wird die täglich Eiweißzufuhr aus allen Proteinquellen entsprechend der FAO-Daten verwendet und um den Anteil der Eiweißzufuhr, die über Fleisch erfolgt (27 Prozent) gemindert. Über die Reduktion des Eiweiß-Stickstoffs je produzierter Menge Abwasser und dem Bevölkerungsrückgang wurde so die Entwicklung der Lachgas-Emissionen aus der kommunalen Abwasserentsorgung ermittelt.

Methan- und Lachgas-Emissionen aus der Kompostierung: Um den im Koalitionsvertrag vorgesehenen Einsatz organischer Reststoffe (Abfall) als Ersatz von Biomasse für die bioenergetische Verwendung (Verstromung) zu berücksichtigen, wird im Klimaschutzszenario 80 ein Anstieg der Stromerzeugung aus biogenem Abfall (Vergärung) zwischen 2008 und 2020 um 17 Prozent angenommen (Fortschreibung bis 2030).

Anteil und Wichtung lehnen sich an die Leitstudie (DLR et al. 2010) an. Für die Emissionsberechnung wird eine entsprechende Abnahme des Inputs von Siedlungsabfällen im Kompoststrom angenommen, der dann der Vergärung zugeführt wird (vgl. UBA 2010a). Der stärkere Nutzungsdruck auf biogene Reststoffe, der sich durch Art. 21 Abs. 2 der Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (RL 2009/28/EG, EE-RL) bzw. der laufenden Änderung der Verordnung zur Durchführung der Regelungen der Biokraftstoffquote (36. BImSchV) ergibt, wird im Klimaschutzszenario 80 nicht quantitativ berücksichtigt.

6.3.1.3 Klimaschutzszenario 90

Zur Erreichung des Minderungsziels im Klimaschutzszenario 90 wird im Abfallbereich Deponien von einer zusätzlichen Verringerung des Klärschlammanteils bei der Deponierung (siehe Tabelle 6-15) ausgegangen, da insbesondere dieser Anteil über eine kurze Abbauzeit und ein hohes Methanbildungspotential verfügt.

Tabelle 6-15 Trendentwicklung des Abfallaufkommens für das Klimaschutzszenario 90

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	Aktivitätsdaten in kt						
Abfallinput							
Deponien	40249	8.506	1.439	1.373	1.240	1.174	1.107
Biologische Abfallbehandlungsanlagen	724	9.030	8.860	8.572	8.572	8.572	8.572
Biologisch-mechanische Abfallbehandlung	NA	1.246	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Kommunale Abwasserbehandlung	4847	4.714	4.744	4.080	3.847	3.670	3.796
THG relevantes Abfallaufkommen	45820	23.495	20.043	19.025	18.660	18.416	18.475
ggü. 2010				-5,08%	-6,90%	-8,12%	-7,82%

Quelle: UBA (2012b), Eigene Berechnungen

Methan-Emissionen aus der Abfalldeponierung: Vor dem Hintergrund, dass verbesserte Deponieverfahren zu einer höheren Deponiegaserfassung (70 Prozent) führen, wird zusätzlich der biologisch aktive Klärschlammanteil (Ausgangswert ist hier 2010) für das Jahr 2030 auf nur 70 % Input und für das Jahr 2050 auf 50 % gesetzt.

6.3.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Im Vergleich zur THG-Vorjahresberichterstattung nahm die Siedlungsabfallmenge um einen Faktor von 1,017 im Berichtsjahr 2009 und 2010 zu. Somit ergeben sich generell höhere Emissionsmengen im Abfallbereich. Die Ergebnisse der Projektionsberechnungen für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) zeigen, dass die starke Minderung der Methan-Emissionen aus der Abfalldeponierung die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Abfallsektors wesentlich bestimmt (vgl. Tabelle 6-16). Dem Bereich

der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung wird in beiden Szenarien keine Reduktions-Maßnahme adressiert.

Der signifikante Rückgang des Abfallinputs in Deponien aufgrund der entscheidenden regulatorischen Rahmenbedingungen für den Abfallsektor ist hier maßgebend. Die gesamten Treibhausgasemissionen des Abfallsektors nehmen im Zeitraum 2010-2050 um ca. 7,2 Mio. t CO2-Äqu. ab.

Durch den starken Rückgang des Abfallinputs im Zeitraum von 2010 bis 2050 sinken die Methan-Emissionen im Bereich der Deponien um 77 Prozent. Unter Berücksichtigung der rückläufigen Bevölkerungsentwicklung kommt es zu einer Verringerung des Anteils an Textilien, Windeln und organischen Abfällen (siehe Tabelle 6-16) und somit zu weiteren Emissionsabnahmen.

In diesem Szenario ergibt sich auch in der kommunalen Abwasserentsorgung eine Minderung um 12 Prozent der Methan-Emissionen und der Lachgas-Emissionen. Bezogen auf das gesamte Treibhausgasinventar ist diese Quelle eher als unbedeutend zu betrachten. Die Bereiche Kompostierung und Mechanisch-biologische Abfallbehandlung bleiben im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) unverändert gegenüber dem Jahr 2010 (siehe Tabelle 6-16).

Tabelle 6-16 Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen aus der Abfallwirtschaft im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 1990-2050

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	in kt						
CH4-Emissionen							
Deponien	1.838,36	1.132,62	427,35	243,99	166,71	124,64	100,38
Kommunale Abwasserbehandlung	106,01	8,32	3,38	3,34	3,28	3,15	2,98
Kompostierung	2,37	26,03	25,66	25,66	25,66	25,66	25,66
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	NA	0,19	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Zwischensumme CH4 (kt)	1.946,74	1.167,16	456,66	273,27	195,92	153,72	129,29
ggü. 1990		-40%	-77%	-86%	-90%	-92%	-93%
ggü. 2010				*-40,2%*	*-57,1%*	*-66,3%*	*-71,7%*
N2O-Emissionen							
Kommunale Abwasserbehandlung	7,17	7,32	7,43	7,33	7,18	6,91	6,52
Kompostierung	0,05	0,66	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	NA	0,29	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Zwischensumme N2O (kt)	7,22	8,27	8,57	8,47	8,32	8,05	7,66
ggü. 1990		15%	19%	17%	15%	11%	6%
ggü. 2010				*-1,2%*	*-2,9%*	*-6,1%*	*-10,6%*
Summe (kt CO2-Äqu.)	43.119	27.073	12.246	8.363	6.694	5.723	5.090
ggü. 1990		-37%	-72%	-81%	-84%	-87%	-88%
ggü. 2010				*-31,7%*	*-45,3%*	*-53,3%*	*-58,4%*

Quelle: Eigene Berechnung

6.3.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Weitere Minderungen der Methan-Emissionen werden für den Zeitraum 2010-2050 im Bereich der kommunalen Abwasserbehandlung erzielt (95 Prozent). Außerdem sinken dort die Lachgas-Emissionen um 16 Prozent (siehe Tabelle 6-17). Weitere Reduktionen ergeben sich noch im Bereich der Kompostierung (Methan und Lachgas-Emissionen nehmen um 3 Prozent ab). Insgesamt fällt damit die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80 nur wenig höher aus als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (Differenz von 0,85 Mio. t CO_2-Äqu.). Die bereits ergriffenen Maßnahmen zur Rückführung der Treibhausgasemissionen aus der Abfallwirtschaft können durch weiterführende Maßnahmen (verbesserte Technologien) insbesondere im Bereich Deponierung somit verstärkt werden.

Tabelle 6-17 Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen aus der Abfallwirtschaft im Klimaschutzszenario 80, 1990-2050

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	in kt						
CH4-Emissionen							
Deponien	1.838,36	1.132,62	427,35	164,14	112,15	83,85	67,53
Kommunale Abwasserbehandlung	106,01	8,32	3,38	1,61	0,77	0,37	0,17
Kompostierung	2,37	26,03	25,66	24,83	24,83	24,83	24,83
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung		0,19	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Zwischensumme CH4 (kt)	1.946,74	1.167,16	456,66	190,85	138,02	109,31	92,80
ggü. 1990		-40%	-77%	-90%	-93%	-94%	-95%
ggü. 2010				*-58,2%*	*-69,8%*	*-76,1%*	*-79,7%*
N2O-Emissionen							
Kommunale Abwasserbehandlung	7,17	7,32	7,43	7,04	6,91	6,64	6,27
Kompostierung	0,05	0,66	0,64	0,62	0,62	0,62	0,62
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	NA	0,29	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Zwischensumme N2O (kt)	7,22	8,27	8,57	8,17	8,03	7,76	7,39
ggü. 1990		15%	19%	13%	11%	8%	2%
ggü. 2010				*-4,7%*	*-6,3%*	*-9,4%*	*-13,7%*
Summe (kt CO2-Äqu.)	43.119	27.073	12.246	6.539	5.387	4.702	4.240
ggü. 1990		-37%	-72%	-85%	-88%	-89%	-90%
ggü. 2010				*-46,6%*	*-56,0%*	*-61,6%*	*-65,4%*

Quelle: Eigene Berechnung

6.3.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Durch Verringerung des biologisch, aktiven Klärschlammanteils kann eine Verringerung der Methan-Emissionen im Deponiebereich um 88 Prozent in 2050 erreicht werden (siehe Tabelle 6-18). Zwischen 2010 und 2050 entsteht eine Differenz von fast 1,2 Mio. t CO_2-Äqu. gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012). Auch im

Klimaschutzszenario 90 zeigt sich, dass im Deponiebereich weitere Einsparpotenziale genutzt werden können.

Tabelle 6-18 Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen aus der Abfallwirtschaft im Klimaschutzszenario 90, 1990-2050

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	in kt						
CH4-Emissionen							
Deponien	1.838,36	1.132,62	427,35	163,03	105,23	71,70	51,42
Kommunale Abwasserbehandlung	106,0	8,32	3,38	1,61	0,77	0,37	0,17
Kompostierung	2,4	26,03	25,66	24,83	24,83	24,83	24,83
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	NA	0,19	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Zwischensumme CH4 (kt)	1.946,74	1.167,16	456,66	189,74	131,09	97,17	76,70
ggü. 1990		-40%	-77%	-90%	-93%	-95%	-96%
ggü. 2010				*-58,4%*	*-71,3%*	*-78,7%*	*-83,2%*
N2O-Emissionen							
Kommunale Abwasserbehandlung	7,17	7,32	7,43	7,04	6,91	6,64	6,27
Kompostierung	0,05	0,66	0,64	0,62	0,62	0,62	0,62
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	NA	0,29	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Zwischensumme N2O (kt)	7,22	8,27	8,57	8,17	8,03	7,76	7,39
ggü. 1990		15%	19%	13%	11%	8%	2%
ggü. 2010				*-4,7%*	*-6,3%*	*-9,4%*	*-13,7%*
Summe (kt CO2-Äqu.)	43.119	27.073	12.246	6.516	5.241	4.447	3.902
ggü. 1990		-37%	-72%	-85%	-88%	-90%	-91%
ggü. 2010				*-46,8%*	*-57,2%*	*-63,7%*	*-68,1%*

Quelle: Eigene Berechnung

6.3.5 Vergleich der Szenarien

Tabelle 6-19 zeigt die Emissionsentwicklungen für CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick.

Die Emissionen der Treibhausgase CH_4 und N_2O gehen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (AMS (2012)) in der Periode 2005 bis 2050 von 18 Mio. t CO_2-Äqu. auf 5 Mio. t CO_2-Äqu., also um insgesamt etwa 13 Mio. t CO_2-Äqu. zurück. Im Klimaschutzszenario 80 (KS 80) liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 4 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 14 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Im Klimaschutzszenario 90 (KS 90) sinken die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um ebenfalls um 14 Mio. t CO_2-Äqu. auf 4 Mio. t CO_2-Äqu.

Für die Periode 2005 bis 2020 ergibt sich damit im AMS (2012) eine Emissionsminderung von 53 % und für den Zeitraum von 2005 bis 2050 von 71 %. Die entsprechenden

Vergleichswerte für das KS 80 belaufen sich auf 63 % bzw. 76 % und für das KS 90 auf 63 % bzw. 78 %.

Bezogen auf die Ausgangswerte des Jahres 1990 betragen die entsprechenden Reduktionsraten bis 2050 im AMS (2012), KS 80 und KS 90 88%, 90% bzw. 91%.

Tabelle 6-19 Emissionsentwicklungen für den Abfallsektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	40.874	14.935	9.583				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				5.739	4.114	3.228	2.715
Klimaschutzszenario 80				4.008	2.898	2.296	1.949
Klimaschutzszenario 90				3.985	2.753	2.041	1.611
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	2.238	2.667	2.656				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				2.625	2.580	2.494	2.375
Klimaschutzszenario 80				2.531	2.488	2.406	2.292
Klimaschutzszenario 90				2.531	2.488	2.406	2.292
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	43.111	17.602	12.239				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				8.363	6.694	5.723	5.090
Klimaschutzszenario 80				6.539	5.387	4.702	4.240
Klimaschutzszenario 90				6.516	5.241	4.447	3.902
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-80,6	-84,5	-86,7	-88,2
Klimaschutzszenario 80				-84,8	-87,5	-89,1	-90,2
Klimaschutzszenario 90				-84,9	-87,8	-89,7	-90,9
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-52,5	-62,0	-67,5	-71,1
Klimaschutzszenario 80				-62,9	-69,4	-73,3	-75,9
Klimaschutzszenario 90				-63,0	-70,2	-74,7	-77,8

Quelle: UBA (ZSE, NIR), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

6.4 Landwirtschaft

6.4.1 Annahmen und Parameter

Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) basiert auf den Agrarökonomischen Projektionen für Deutschland des von Thünen-Instituts (Offermann et al., 2012). Wesentliche Auswirkungen auf die Projektionen hat die Umsetzung der Health Check-Beschlüsse zur Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) im Zeitraum 2003 bis 2013, die Aufhebung der obligatorischen Flächenstilllegung ab dem Jahr 2009 und das Auslaufen der Milchquotenregelung in 2015 (EC 2009b). Die Auswirkungen dieser Reformen wurden im Szenario des vTI bis 2021 berücksichtigt.

Weitere Entwicklungen auf Basis der Neustrukturierung der GAP ab 2014 wurden auf Grund der fehlenden Umsetzung noch nicht betrachtet. Das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ist daher auf die bestehenden Maßnahmen limitiert, die Daten werden linear von 2020 bis 2050 fortgeschrieben. Damit ergeben sich für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) die in Tabelle 6-20 und Tabelle 6-21 dargestellten Trends bei Tierbeständen und landwirtschaftlichen Böden.

Neben einem Rückgang der Milchkühe bis 2020 kommt es auch zu einem Rückgang der Tierzahlen bei der Mutterkuhhaltung und der Kälberaufzucht, sowie bei Schafen und Ziegen. Gründe hierfür sind v.a. die Entkopplung der Tierprämien und die dadurch verringerten Anreize zur Haltung. Bei Schweinen und Geflügel kommt es auf Grund einer steigenden Nachfrage zu einer Erhöhung der Bestände.

Tabelle 6-20 Entwicklung der Tierbestände im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	Population in Tausend						
Rinder gesamt	19.488	14.538	12.809	11.160	11.160	11.160	11.160
Milchkühe	6.355	4.570	4.183	3.813	3.813	3.813	3.813
Nicht-Milchkühe	13.133	9.968	8.626	7.346	7.346	7.346	7.346
Schweine	26.502	21.768	22.244	22.856	22.856	22.856	22.856
Geflügel	113.879	120.180	128.900	130.766	130.766	130.766	130.766
Büffel, Schafe, Ziegen, Pferde, Maultiere und Esel	3.856	3.383	2.711	2.622	2.622	2.622	2.622
1990- 2010, Treibhausgasinventar 2012 ab 2010 Anwendung Defizitszenario							

Quelle: Rösemann et al, 2012, Eigene Berechnungen Öko-Institut

Die erhöhte Nachfrage nach Bioenergie und die Abschaffung der Stilllegungsfläche führt zu steigendem Anbau von Raps, Weizen und Futtermais bis 2020. Damit einhergehen ein erhöhter Einsatz an Mineraldünger und vermehrte Ernterückstände. Die Wirtschaftsdüngerlagerung geht entsprechend der geringeren Tierzahlen zurück. Ab 2020 werden die Daten konstant fortgeschrieben. Nur die Bewirtschaftung organischer Böden folgt bis 2050 den Daten aus dem LULUCF Modell und nimmt geringfügig ab.

Tabelle 6-21 Entwicklung der einzelnen Subkategorien für landwirtschaftliche Böden im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)[64]

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	Gg Stickstoff pro Jahr						
Mineraldünger	2.089	1.936	1.499	1.742	1.742	1.742	1.742
Mineraldünger in kg/ha	118	114	90	108	108	108	108
Wirtschaftsdüngerausbringung	900	788	769	742	742	742	742
Leguminosen	140	96	77	75	75	75	75
Ernterückstände	841	852	905	983	983	983	983
Anwendung von Klärschlämmen	27	33	28	28	28	28	28
N-Ausscheidungen beim Weidegang	207	162	137	115	115	115	115
Bewirtschaftung organischer Böden in 1000 ha	1.235	1.242	1.230	1.230	1.226	1.223	1.219
1990- 2010, Treibhausgasinventar 2012 ab 2010 Anwendung Defizitszenario							

Quelle: Rösemann et al, 2012, Eigene Berechnungen Öko-Institut

Klimaschutzszenario 80

Die Tierzahlen im Klimaschutzszenario 80 folgen der abnehmenden Entwicklung der letzten 20 Jahre bis 2030 und werden danach konstant fortgeschrieben. (siehe Tabelle 6-22 und Tabelle 6-23).

Tabelle 6-22 Entwicklung der Tierbestände im Klimaschutzszenario 80

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	Population in Tausend						
Rinder gesamt	19.488	14.538	12.809	11.160	9.675	9.675	9.675
Milchkühe	6.355	4.570	4.183	3.813	3.496	3.496	3.496
Nicht-Milchkühe	13.133	9.968	8.626	7.346	6.179	6.179	6.179
Schweine	26.502	21.768	22.244	22.856	23.204	23.204	23.204
Geflügel	113.879	120.180	128.900	130.766	137.882	137.882	137.882
Büffel, Schafe, Ziegen, Pferde, Maultiere und Esel	3.856	3.383	2.711	2.622	1.950	1.950	1.950
1990- 2010, Treibhausgasinventar 2012 ab 2010 Anwendung Minimalziel							

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

[64] Die Angabe Stickstoff pro Jahr bezieht sich auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland, d.h. insgesamt wurden im Jahr 2050 bsp. 983 Gg Stickstoff aus Ernterückständen in die deutschen Böden eingetragen bzw. 1742 Gg Stickstoff in Form von Mineraldünger auf die Böden aufgebracht.

Der Stickstoff-Mineraldüngereinsatz hängt ab vom Bedarf der angebauten Kulturen, der Fruchtfolgen sowie von Preisentwicklungen, der Flächennutzung und Ertragszuwächsen im Pflanzenbau, der Abnahme an organischem Dünger durch geringere Tierzahlen, der Entwicklung der Flächenstilllegung und den standörtlichen Erfordernissen des Betriebsmanagements. Für das Klimaschutzszenario 80 wurde von einem fortlaufenden Trend bis 2040 ausgegangen, basierend auf dem Jahr 2000. Für 2050 wurden die Werte konstant fortgeschrieben.

Die Silomaisfläche hängt von rückläufigen Rinderbeständen und zunehmender Produktion für Biogasanlagen ab. Aufgrund der bislang hohen Nahrungsmittelpreise und Flächenverknappung stagnierte der Neubau von Biogasanlagen. Mittelfristig ist jedoch mit einer Zunahme trotz abnehmender Rinderbestände zu rechnen. In diesem Szenario wird ein zunehmender Trend beim Anbau von Ölsaaten, der Silomaisfläche, Getreide- und Gemüseanbau aus diesem Grunde bis 2040 berücksichtigt und bis 2050 konstant fortgeschrieben. Daraus resultieren erhöhte Mineraldüngereinsätze und höhere Stickstoffeinträge aus Ernterückständen (siehe Tabelle 6-23).

Für organische Böden, die als Ackerland und Grünland genutzt werden, wird für das Klimaschutzszenario 80 weiterhin ein abnehmender Trend angenommen, basierend auf den Berechnungen aus dem LULUCF Modell (siehe hierzu Detailangaben in Kapitel 6.5).

Tabelle 6-23 Entwicklung der einzelnen Subkategorien für landwirtschaftliche Böden im Klimaschutzszenario 80

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	Gg Stickstoff pro Jahr						
Mineraldünger	2.089	1.936	1.499	1.742	1.542	1.668	1.668
Mineraldünger in kg/ha	118	114	90	108	96	104	104
Wirtschaftsdüngerausbringung	900	788	769	742	722	697	697
Leguminosen	140	96	77	75	56	50	50
Ernterückstände	841	852	905	983	1.059	1.137	1.137
Anwendung von Klärschlämmen	27	33	28	28	26	26	26
N-Ausscheidungen beim Weidegang	207	162	137	115	93	71	71
Bewirtschaftung organischer Böden in 1000 ha	1.235	1.242	1.230	1.230	992	985	979
1990- 2010, Treibhausgasinventar 2012 ab 2010 Anwendung Minimalziel-Szenario							

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

Klimaschutzszenario 90

Das Klimaschutzszenario 90 berücksichtigt im Wesentlichen die gleichen Maßnahmen wie das Klimaschutzszenario 80 jedoch unter verschärften Bedingungen. Für die Emissionen aus der Tierhaltung wurden folgende Annahmen getroffen:

Die Zahl der Milchkühe geht zurück, bis 2020 v.a. aufgrund des Auslaufens der Milchquote, später hauptsächlich durch eine Steigerung der Milchleistung. Diese wurde im Jahr 2012 im Vergleich zum Vorjahr um 0,7% gesteigert. Im Klimaschutzszenario 90 wird nun davon ausgegangen, dass die Milchleistung in den Jahren 2010-2050 jährlich um weitere 0,7% gesteigert werden kann. Das entspricht bei gleichbleibender Milchproduktionsmenge einem Rückgang der Milchkühe um etwa 20% bis 2050 (siehe Tabelle 6-24).

Die Zahl der anderen Rinder sowie der Schweine geht aufgrund eines geänderten Konsumverhaltens zurück. Ein sinkender Pro-Kopf-Fleischverbrauch führt bis 2050 zu einer um 30% verringerten Rinder- und Schweineproduktion. Während allgemein die Zahl der Großvieheinheiten sinkt, steigt die Kleintierproduktion, so. z.B. Geflügel mit einem Anstieg von 18% bis 2050.

Tabelle 6-24 Entwicklung der Tierbestände im Klimaschutzszenario 90

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	Population in Tausend						
Rinder gesamt	19.488	14.538	12.809	11.160	9.675	7.887	6.868
Milchkühe	6.355	4.570	4.183	3.813	3.496	3.106	3.044
Nicht-Milchkühe	13.133	9.968	8.626	7.346	6.179	4.781	3.824
Schweine	26.502	21.768	22.244	22.856	23.204	22.418	17.934
Geflügel	113.879	120.180	128.900	130.766	137.882	142.479	152.453
Büffel, Schafe, Ziegen, Pferde, Maultiere und Esel	3.856	3.383	2.711	2.622	1.950	1.524	1.603
1990- 2010, Treibhausgasinventar 2012 ab 2010 Anwendung 2-Grad-Szenario							

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

Entscheidend für die Emissionsberechnung aus der Tierhaltung ist der Emissionsfaktor für den Methanausstoß bei der Verdauung. 5 – 12% der Futterenergie wird bei Wiederkäuern als Methan wieder abgegeben. In den letzten Jahren kam es auf Grund der Zunahme in der Milchleistung und der Fleischproduktion zu einer Erhöhung des Methanausstoßes aus der Verdauung. Forschungen haben ergeben, dass sich durch Fütterungs- und Management-Maßnahmen der Methanausstoß aus der Verdauung reduzieren lässt, nach Schätzungen der Universität Hohenheim[65] unter den derzeitigen Produktionsbedingungen aber maximal um 15%. Ab 2020 wird der Emissionsfaktor von 0,13 auf 0,11 bis 2050 gesenkt.

[65] Institut für Tierernährung Universität Hohenheim: http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/76282/Vortrag%2011.pdf?command=downloadContent&filename=Vortrag%2011.pdf, April 2011

Bei der Wirtschaftsdüngerlagerung (Gülle und Festmist) wird die organische Substanz mikrobiell abgebaut und Methan und Lachgasemissionen entstehen. Nach der Nährstoffproduktion in der Tierhaltung kommt es zur Lagerung dieses Wirtschaftsdüngers, bis er in Biogasanlagen oder im Ackerbau verwertet werden kann. Mit relativ einfachen Mitteln können die Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung reduziert werden. Neben genug Lagerkapazität reicht bei der Güllelagerung eine vollständige Abdeckung, während bei Festmist eine Betonplatte mit Seitenwänden und ein Auffangsystem für Sickerwasser angebracht sind. Bis 2050 wird so mit einem starken Rückgang der Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung gerechnet.

Für landwirtschaftliche Böden wurden folgende Annahmen getroffen:

Beim Stickstoff-Mineraldüngereinsatz wurde für das Klimaschutzszenario 90 im Jahr 2050 ein Zielwert von 52 kg N/ha angenommen. Aufgrund von hohen Stickstoffüberschüssen[66] in den Böden ist eine Reduktion des Mineraldüngereinsatzes möglich und notwendig. EU weit lag der Einsatz von Mineraldünger je Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche im Jahr 2008/2009 und 2009/2010 zwischen 51 und 52 kg (BMELV 2012b). Da schon auf Grund der aktuellen Regelungen eine deutliche Reduzierung des Düngereinsatzes erforderlich ist, um die Grenzwerte für Stickstoffüberschüsse zu erreichen, werden die EU-27 Durchschnittswerte als Zielwerte für Deutschland im Jahr 2050 angenommen (siehe Tabelle 6-25).

Beim Einsatz von Wirtschaftsdünger wird mit einem starken Rückgang gerechnet. Gründe hierfür sind vor allem der Rückgang der Tierbesatzdichte und der verstärkte Einsatz von Gülle in Biogasanlagen. Mit der EEG-Novelle 2012 wird der Einsatz von Gülle in Biogasanlagen höher vergütet und damit wird die Nutzung von Gülle wieder wirtschaftlicher (EEG 2012).

Im Gegensatz zum Klimaschutzszenario 80 wurde beim Anbau von Ölsaaten, der Silomaisfläche, Getreide- und Gemüseanbau im Klimaschutzszenario 90 mit einer stärkeren Zunahme zwischen 2040 und 2050 gerechnet. Allerdings werden verstärkt Biokraftstoffe der 2. Generation eingesetzt, wobei nicht nur die Frucht, sondern die gesamte Pflanze für die Kraftstoffproduktion verwertet wird. Dadurch kommt es zu einer Abnahme der Ernterückstände und folglich geringeren Stickstoffeinträgen. Die Aufbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftliche Flächen wird unter Berücksichtigung der Entwicklung von 2000 bis 2020 hinsichtlich des Bevölkerungsrückgangs sowie vor dem Hintergrund der Vermeidung weiterer Düngereinbringung bis 2050 abnehmen.

Auch im Klimaschutzszenario 90 wird für organische Böden, die als Ackerland und Grünland genutzt werden, ein abnehmender Trend angenommen (siehe hier Detailangaben in Kapitel 6.5). Entsprechend den Annahmen aus dem LULUCF-Modell sinkt der Anteil der bewirtschafteten organischen Böden auf 11% im Vergleich zu 2010.

[66] Die Düngeverordnung gibt Höchstwerte für die Begrenzung der Nährstoffüberschüsse auf 60 kg N/ha im 3-Jahresmittel (§ 6 der Düngeverordnung) vor.

Tabelle 6-25 Entwicklung der einzelnen Subkategorien für landwirtschaftliche Böden im Klimaschutzszenario 90

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	Gg Stickstoff pro Jahr						
Mineraldünger	2.089	1.936	1.499	1.742	1.526	1.236	841
Mineraldünger in kg/ha	118	114	90	108	95	77	52
Wirtschaftsdüngerausbringung	900	788	769	742	577	474	388
Leguminosen	140	96	77	75	56	50	49
Ernterückstände	841	852	905	983	954	903	812
Anwendung von Klärschlämmen	27	33	28	25	20	16	10
N-Ausscheidungen beim Weidegang	207	162	137	115	93	65	53
Bewirtschaftung organischer Böden in 1000 ha	1.235	1.242	1.230	1.230	170	153	135
1990- 2010, Treibhausgasinventar 2012 ab 2010 Anwendung 2-Grad-Szenario							

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

6.4.2 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

In Tabelle 6-26, Tabelle 6-27 und Tabelle 6-28 sind die Auswirkungen der Veränderungen im Tierbestand sowie der entsprechenden Flächennutzung auf die Entwicklung der Methan- bzw. Lachgas-Emissionen dargestellt. Im Vergleich zu 1990 verringern sich die gesamten Methan-Emissionen in den relevanten Bereichen Fermentation und Düngerwirtschaft im Jahre 2050 um 28 Prozent. Die Reduktion ist überwiegend auf die Abnahme der Tierzahlen bei Milchkühen und Rindern zurückzuführen.

Tabelle 6-26 Entwicklung der Methan-Emissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CH_4						
Fermentation	1.270,1	1.046,1	965,6	883,0	883,0	883,0	883,0
Düngerwirtschaft	301,2	272,9	265,4	249,0	249,0	249,0	249,0
Reisanbau	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Landwirtschaftliche Böden	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Brandrodung	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Verbrennen von Ernterückständen auf der Fläche	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Andere	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO
Summe	1.571,3	1.319,1	1.231,0	1.132,0	1.132,0	1.132,0	1.132,0
Summe in kt CO_2-Äquivalent	32.996	27.700	25.851	23.772	23.772	23.772	23.772
Veränderung ggü. 1990		-16,1%	-21,7%	-28,0%	-28,0%	-28,0%	-28,0%
Veränderung ggü. 2005				-8,9%	-8,9%	-8,9%	-8,9%

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

Die gesamten Lachgas-Emissionen in den Bereichen Düngerwirtschaft und Landwirtschaftliche Böden nehmen bis 2050 im Vergleich zu 1990 um 12 Prozent ab (siehe Tabelle 6-27). Auf Grund steigender Flächennutzung und erhöhten Mineraldüngereinsatzes kommt es im Gegensatz zu 2005 zu einer leichten Steigerung der Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden.

Tabelle 6-27 Entwicklung der Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt N_2O						
Fermentation	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Düngerwirtschaft	7,3	7,2	7,3	6,9	6,9	6,9	6,9
Reisanbau	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Landwirtschaftliche Böden	141,6	133,9	127,0	135,0	134,9	134,9	134,8
Brandrodung	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Verbrennen von Ernterückständen auf der Fläche	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Andere	NA, NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO
Summe	148,9	141,1	134,3	141,9	141,9	141,8	141,8
Summe in kt CO_2-Äquivalent	46.161	43.751	41.628	43.989	43.975	43.960	43.946
Veränderung ggü. 1990	-8,1%	-12,9%	-17,1%	-12,4%	-12,4%	-12,5%	-12,5%
Veränderung ggü. 2005				0,5%	0,5%	0,5%	0,4%

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

Die gesamten landwirtschaftlichen Methan- und Lachgas-Emissionen sinken letztlich im Vergleich zu 1990 um 19 Prozent auf 67.718 kt CO_2-Äqu. im Jahr 2050 (siehe Tabelle 6-28).

Tabelle 6-28 Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft in kt CO_2 Äquivalenten , 1990-2050 im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
N_2O, ab 2010	46.161	43.751	41.628	43.989	43.975	43.960	43.946
CH_4, ab 2010	27.700	26.102	25.851	23.772	23.772	23.772	23.772
Gesamt	73.861	69.853	67.479	67.761	67.747	67.733	67.718
Veränderung ggü. 1990	-11,2%	-16,1%	-18,9%	-18,6%	-18,6%	-18,6%	-18,6%
Veränderung ggü. 2005				-3,0%	-3,0%	-3,0%	-3,1%

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

6.4.3 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

Die Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft zeigen Tabelle 6-29, Tabelle 6-30 und Tabelle 6-31 für die einzelnen Anwendungsbereiche. Abnehmende Tierzahlen sowie der Rückgang der Bewirtschaftung organischer Böden haben einen großen Einfluss auf den Emissionstrend.

Insgesamt wird mit einem kontinuierlichen Rückgang der Methan-Emissionen auf 21.232 kt CO2 Äquivalente (-36 Prozent) bis zum Jahr 2050 gerechnet, bezogen auf das Jahr 1990. Neben rückläufigen Tierbeständen führt auch die verbesserte Lagerung des Wirtschaftsdüngers zu einer Verringerung der Methanemissionen.

Tabelle 6-29 Entwicklung der Methan-Emissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Klimaschutzszenario 80

	1990	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CH_4							
Fermentation	1,270.1	1,046.1	975.2	965.6	883.0	780.0	780.0	780.0
Düngerwirtschaft	301.2	272.9	267.8	265.4	249.0	230.1	231.0	231.0
Reisanbau	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Landwirtschaftliche Böden	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Brandrodung	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Verbrennen von Ernterückständen auf der Fläche	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Andere	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO
Summe	1,571.3	1,319.1	1,243.0	1,231.0	1,132.0	1,010.1	1,011.1	1,011.1
Summe in kt CO_2-Äquivalent	32,996	27,700	26,102	25,851	23,772	21,213	21,232	21,232
Veränderung ggü. 1990		-16.1%	-20.9%	-21.7%	-28.0%	-35.7%	-35.7%	-35.7%
Veränderung ggü. 2005					-8.9%	-18.7%	-18.7%	-18.7%

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

Für Lachgas-Emissionen zeigt sich ebenfalls ein abnehmender Trend (-17,2 Prozent) bis 2050 bezogen auf 1990. Nach 2030 kommt es methodisch[67] bedingt erneut zu einem geringen Anstieg der Lachgasemissionen. Das kann in der nächsten Projektphase ggf. geändert werden.

[67] Die Trendentwicklung basiert für das Jahr 2030 auf den Jahren 2000- 2020, während für das Jahr 2040 die Trendentwicklung auf den Jahren 2010-2030 basiert. Der starke Rückgang der Düngemitteleinsätze von 2000 bis 2010 führt damit in 2030 zu einem niedrigeren Wert als für 2040.

Tabelle 6-30 Entwicklung der Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Klimaschutzszenario 80

	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt N_2O						
Fermentation	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Düngerwirtschaft	7,3	7,2	7,3	6,9	6,5	6,5	6,5
Reisanbau	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Landwirtschaftliche Böden	141,6	133,9	127,0	135,0	125,7	127,7	127,6
Brandrodung	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Verbrennen von Ernterückständen auf der Fläche	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Andere	NA, NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO
Summe	148,9	141,1	134,3	141,9	132,2	134,1	134,0
Summe in kt CO_2-Äquivalent	46.161	43.751	41.628	43.989	40.974	41.582	41.555
Veränderung ggü. 1990	-8,1%	-12,9%	-17,1%	-12,4%	-18,4%	-17,2%	-17,2%
Veränderung ggü. 2005				0,5%	-6,3%	-5,0%	-5,0%

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

Bis 2050 kommt es zu einem Rückgang der gesamten landwirtschaftlichen Methan- und Lachgas-Emissionen von 24,7% im Gegensatz zu 1990 (siehe Tabelle 6-31).

Tabelle 6-31 Entwicklung der Methan und Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft in kt CO_2 Äquivalenten , 1990-2050 im Klimaschutzszenario 80

	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
N_2O, ab 2010	46.161	43.751	41.628	43.989	40.974	41.582	41.555
CH_4, ab 2010	27.700	26.102	25.851	23.772	21.213	21.232	21.232
Gesamt	73.861	69.853	67.479	67.761	62.186	62.814	62.788
Veränderung ggü. 1990	-11,2%	-16,1%	-18,9%	-18,6%	-25,3%	-24,7%	-24,7%
Veränderung ggü. 2005				-3,0%	-11,0%	-10,2%	-10,3%

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

6.4.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

Im Vergleich zum Klimaschutzszenario 80 wird bis 2050 von einem kontinuierlichen Rückgang in der Milchkuh-, Rinder- und Schweinehaltung durch ein ausgeprägtes Ernährungsbewusstsein in der Bevölkerung ausgegangen. Gleichfalls nimmt die Geflügelproduktion für den verbleibenden Fleischbedarf zu. Dadurch kann ein deutlicher Rückgang der tierbedingten Methan- und Lachgas-Emissionen erzielt werden (siehe Tabelle 6-32, Tabelle 6-33).

Tabelle 6-32 Entwicklung der Methan-Emissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Klimaschutzszenario 90

	1990	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CH_4							
Fermentation	1.270,1	975,2	975,2	965,6	883,0	780,0	592,3	539,0
Düngerwirtschaft	301,2	267,8	267,8	265,4	249,0	230,1	197,2	173,5
Reisanbau	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Landwirtschaftliche Böden	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Brandrodung	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Verbrennen von Ernterückständen auf der Fläche	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Andere	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO
Summe	1.571,3	1.243,0	1.243,0	1.231,0	1.132,0	1.010,1	789,5	712,5
Summe in kt CO_2-Äquivalent	32.996	26.102	26.102	25.851	23.772	21.213	16.580	14.962
Veränderung ggü. 1990		-16,1%	-20,9%	-21,7%	-28,0%	-35,7%	-41,5%	-45,5%
Veränderung ggü. 2005					-8,9%	-18,7%	-36,5%	-42,7%

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

Den größten Einfluss auf die rückläufige Entwicklung der Lachgas-Emissionen hat der Rückgang des Düngemitteleinsatzes und die deutliche Abnahme des organischen Bodenanteils bei Acker- und Grünlandwirtschaft. Damit wird 2050 eine Reduktion von 53% im Gegensatz zu 1990 erreicht (siehe Tabelle 6-33).

Tabelle 6-33 Entwicklung der Lachgasemissionen in der Landwirtschaft, 1990-2050 im Klimaschutzszenario 90

	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt N_2O						
Fermentation	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Düngerwirtschaft	7,3	7,2	7,3	6,9	6,5	5,6	5,0
Reisanbau	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Landwirtschaftliche Böden	133,9	133,9	127,0	135,0	106,7	91,9	70,6
Brandrodung	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Verbrennen von Ernterückständen auf der Fläche	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Andere	NA, NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO	NA,NO
Summe	141,2	141,1	134,3	141,9	113,2	97,6	75,6
Summe in kt CO_2-Äquivalent	43.772	43.751	41.628	43.989	35.094	30.245	23.428
Veränderung ggü. 1990	-12,8%	-12,9%	-17,1%	-12,4%	-30,1%	-39,8%	-53,3%
Veränderung ggü. 2005				0,5%	-19,8%	-30,9%	-46,5%

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

Insgesamt konnten die Emissionen aus der Landwirtschaft im Gegensatz zu 1990 mehr als halbiert werden (siehe Tabelle 6-34). Rückläufige Tierzahlen, verringerte Düngemitteleinsätze und der fast vollständige Stopp der Bewirtschaftung organischer Böden sind die Gründe für den starken Rückgang.

Tabelle 6-34 Entwicklung der Methan- und Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft in kt CO_2 Äquivalenten , 1990-2050 im Klimaschutzszenario 90

	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
N_2O, ab 2010	43.772	43.751	41.628	43.989	35.094	30.245	23.428
CH_4, ab 2010	26.102	26.102	25.851	23.772	21.213	16.580	14.962
Gesamt	69.874	69.853	67.479	67.761	56.307	46.825	38.390
Veränderung ggü. 1990	-16,0%	-16,1%	-18,9%	-18,6%	-32,3%	-43,7%	-53,9%
Veränderung ggü. 2005				-3,0%	-19,4%	-33,0%	-45,0%

Quelle: UBA (2012a), Offermann et al. (2012), Eigene Berechnungen Öko-Institut

6.4.5 Vergleich der Szenarien

Tabelle 5-91 zeigt die Emissionsentwicklungen für CH_4 und N_2O von 1990 bis 2050 im Vergleich der Szenarien sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick.

Die Emissionen der Treibhausgase CH_4 und N_2O gehen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (AMS (2012)) in der Periode 2005 bis 2050 von 70 Mio. t CO_2-Äqu. auf 68 Mio. t CO_2-Äqu., also um etwa 2 Mio. t CO_2-Äqu. zurück. Im Klimaschutzszenario 80 (KS 80) liegen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 auf einem Niveau von 63 Mio. t CO_2-Äqu. und damit um etwa 7 Mio. t CO_2-Äqu. unter dem entsprechenden Wert von 2005. Im Klimaschutzszenario 90 (KS 90) sinken die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 31 Mio. t CO_2-Äqu. auf 38 Mio. t CO_2-Äqu.

Für die Periode 2005 bis 2020 ergibt sich damit im AMS (2012) eine Emissionsminderung von 3 % und für den Zeitraum von 2005 bis 2050 ebenfalls von 3 %. Die entsprechenden Vergleichswerte für das KS 80 belaufen sich auf 3 % bzw. 10 % und für das KS 90 auf 3 % bzw. 45 %.

Bezogen auf die Ausgangswerte des Jahres 1990 betragen die entsprechenden Reduktionsraten bis 2050 im AMS (2012), KS 80 und KS 90 19%, 25% bzw. 54%.

Tabelle 6-35 Emissionsentwicklungen für den Landwirtschaftssektor im Vergleich der Szenarien, 1990-2050

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
Entwicklung 1990 – 2010	32.996	26.102	25.851				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				23.772	23.772	23.772	23.772
Klimaschutzszenario 80				23.772	21.213	21.232	21.232
Klimaschutzszenario 90				23.772	21.213	16.580	14.962
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	50.215	43.751	41.628				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				43.989	43.975	43.960	43.946
Klimaschutzszenario 80				43.989	40.974	41.582	41.555
Klimaschutzszenario 90				43.989	35.094	30.245	23.428
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	83.211	69.853	67.479				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				67.761	67.747	67.733	67.718
Klimaschutzszenario 80				67.761	62.186	62.814	62.788
Klimaschutzszenario 90				67.761	56.307	46.825	38.390
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-18,6	-18,6	-18,6	-18,6
Klimaschutzszenario 80				-18,6	-25,3	-24,5	-24,5
Klimaschutzszenario 90				-18,6	-32,3	-43,7	-53,9
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-3,0	-3,0	-3,0	-3,1
Klimaschutzszenario 80				-3,0	-11,0	-10,1	-10,1
Klimaschutzszenario 90				-3,0	-19,4	-33,0	-45,0

Quelle: UBA 2012 a+b (ZSE, NIR), Modellrechnungen von vTI und Öko-Institut

6.5 LULUCF

6.5.1 Annahmen und Parameter

6.5.1.1 Analyse der Flächenkategorien im Hinblick auf THG-Reduktionspotenziale

Im Jahr 2010 wurden insgesamt 44.642 Gg CO_2-Äq (inkl. Methan und Lachgas) als THG-Emissionen in den CRF-Tabellen ausgewiesen. Diesen Emissionen stehen 27.372 Gg CO_2-Äq gegenüber, die im Jahr 2010 in Senken eingelagert wurden.

Als Senke fungieren vor allem alte und neue Waldflächen mit einem Anteil von 72% bzw. 19% an der gesamten Senkenleistung sowie neue Gehölzflächen mit einem Anteil von 6% an der gesamten Senkenleistung (siehe Abbildung 6-5).

Abbildung 6-5 LULUCF-Senken (Anteil der Flächentypen an der eingelagerten THG-Menge)

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der CRF-Tabellen aus dem Jahr 2010. min. = mineralische Böden; organische Böden sind unter „Sonstige" berücksichtigt.

Die Emissionen werden stark von Acker- und Grünlandflächen auf organischen Böden dominiert (Abbildung 6-6). Alte Ackerflächen auf organischen Böden emittieren 52% der gesamten LULUCF-Emissionen. Hinzu kommen Emissionen von neuen Ackerflächen auf organischen Böden (4%). Von alten Grünlandflächen auf organischen Böden werden weitere 24% der LULUCF-Emissionen freigesetzt.[68] In der Summe sind damit 80% der LULUCF-Emissionen Flächentypen auf organischen Böden in der Landwirtschaft zuzuordnen (Abbildung 6-6). Diese Ergebnisse decken sich sehr gut mit den Angaben in BMELV (2012).

Zu den Emissionen auf organischen Böden kommen in der Landwirtschaft weitere Emissionen auf neuen Ackerflächen auf mineralischen Böden (4%) und Emissionen durch den Einsatz von Karbonat-Dünger (4%) hinzu. Insgesamt werden damit 88% der LULUCF-Emissionen auf landwirtschaftlichen Flächen emittiert (Abbildung 6-6).

Weitere Emissionen entfallen auf Siedlungsflächen (4%), alte Feuchtgebiete (5%) und auf sonstige Flächentypen (3%, Abbildung 6-6). Im Hinblick auf alte Feuchtgebiete ist festzuhalten, dass diese Emissionen durch den Torfabbau verursacht werden.

[68] Grünlandflächen auf mineralischen Böden sind in Abbildung 6-6 unter „Sonstige" berücksichtigt.

Abbildung 6-6 LULUCF-Quellen (Anteil der Flächentypen an den THG-Emissionen)

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der CRF-Tabellen aus dem Jahr 2010. min. = mineralische Böden; org. = organische Böden; AL = Ackerland; GL = Grünland; FG = Feuchtgebiete (terrestrische); SI = Siedlungen.

Als Flächenkategorien mit einem hohen THG-Reduktionspotenzial (siehe Schritt 2 in Abschnitt 3.2.11.1) wurden aus der CRF-Tabelle 2010 diejenigen Flächenkategorien identifiziert, die

a) eine hohe THG-Emission verursachen (>500 Gg CO_2-Äq/Jahr) und/oder
b) einen hohen THG-Emissionskoeffizienten aufweisen (>5 Mg CO_2-Äq/ha/Jahr).

Die so identifizierten Flächentypen (siehe Tabelle 6-36) decken sich im Grundzug mit den Ergebnissen in Abbildung 6-6. Besonders auffällig sind die hohen positiven Emissionskoeffizienten (Quellen) für Ackerflächen auf organischen Böden (ca. 40 Mg CO_2-Äq/ha), für Grünland auf organischen Böden (17,8 bzw. 19,1 Mg CO_2-Äq/ha) und für alte Feuchtgebiete (37,5 Mg CO_2-Äq/ha). Bei den alten Feuchtgebieten liegt der Wert deshalb so hoch, weil in dieser Kategorie noch bestehende Torfabbauflächen mit eingerechnet sind. Außerdem spielen Siedlungsflächen und Karbonat-Düngung auf Äckern aufgrund der großen Fläche als Quelle eine Rolle.

Deutlich negative Emissionskoeffizienten (Senken) finden sich für neue Wälder (14,3 bzw. 15,8 Mg CO_2-Äq/ha) und für Gehölze (7,8 Mg CO_2-Äq/ha). Zudem haben die alten Wälder auf mineralischen Böden – trotz niedrigem Emissionskoeffizienten – eine deutliche Senken-Funktion, da sie mit über 10 Mio. ha eine große Fläche einnehmen.

Tabelle 6-36 Fläche und THG-Emissionen der LULUCF-Flächentypen

Kategorie	Boden, Alter	Fläche (1.000 ha)	Emissionen (Gg CO_2-Äq)	(Mg CO_2-Äq/ha)
Wald	mineralisch, alt	10.361	**-19.719**	-1,90
	mineralisch, neu	328	**-5.182**	**-15,77**
	organisch, alt	224	198	0,88
	organisch, neu	20	-292	**-14,34**
Ackerland	mineralisch, alt	12.988	0	0,00
	mineralisch, neu	593	**1.710**	2,88
	organisch, alt	580	**23.381**	**40,33**
	organisch, neu	43	**1.729**	**40,48**
Grünland	mineralisch, alt	4.771	0	0,00
	mineralisch, neu	266	-391	-1,47
	organisch, alt	604	**10.765**	**17,82**
	organisch, neu	21	392	**19,12**
Gehölze	mineralisch, alt	359	0	0,00
	mineralisch, neu	224	**-1.743**	**-7,78**
	organisch, alt	14	36	2,49
	organisch, neu	10	-22	-2,26
Feuchtgebiete	mineralisch, alt	19	**713**	**37,53**
	mineralisch, neu	8	-14	-1,75
	organisch, alt	34	**1.293**	**37,53**
	organisch, neu	6	-10	-1,77
Gewässer	mineralisch, alt	483	0	0,00
	mineralisch, neu	74	161	2,19
	organisch, alt	25	0	0,00
	organisch, neu	6	13	2,32
Siedlung	mineralisch, alt	2.826	**1.941**	0,69
	mineralisch, neu	719	417	0,58
	organisch, alt	110	76	0,69
	organisch, neu	26	118	4,45
Sonstiges Land	mineralisch, alt	36	0	0,00
	mineralisch, neu	0	0	0,00
	organisch, alt	2	0	0,00
	organisch, neu	0	0	0,00
Ackerland	Karbonat	14.203	**1.638**	0,12
	Karbonat	10.934	58	0,01
Waldbrand		10.934	4	0,00
TOTAL		35.780	17.270	0,48

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der CRF-Tabellen aus dem Jahr 2010. Grün: relevante Senken (THG-Emission < -500 Gg CO_2-Äq/Jahr oder THG-Emissionskoeffizienten < -5 Mg CO_2-Äq/ha/Jahr); Rot: relevante Quellen (THG-Emission > 500 Gg CO_2-Äq/Jahr oder THG-Emissionskoeffizienten > 5 Mg CO_2-Äq/ha/Jahr).

Eine Betrachtung der Flächenanteile, die für hohe Emissionen verantwortlich sind, zeigt, dass sich 4,4% der Ackerflächen (623.000 ha) und 10,7% des Grünlands (604.000 ha) auf organischen Böden befinden (Tabelle 6-37). Vor allem diese beiden Flächenkategorien waren im Jahr 2010 – wie oben dargestellt – für die LULUCF-Emissionen verantwortlich. Die Umwandlung anderer Flächen hin zu Ackerland auf mineralischen Böden fand auf 593.000 ha (4,2%) statt, wobei aber verhältnismäßig geringe THG-Emissionen pro Fläche vorliegen.

Diese Flächenbetrachtung zeigt, dass ein verhältnismäßig geringer Anteil der landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland hauptsächlich für die THG-Emissionen im LULUCF-Sektor ist (insbesondere landwirtschaftliche Flächen auf organischen Böden). Politische Maßnahmen treffen somit nicht alle Landwirte, sondern vor allem Landwirte in Regionen mit einem hohen Anteil an organischen Böden. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein kurzer Überblick über die räumliche Verteilung der organischen Böden in Deutschland gegeben.

Tabelle 6-37 Fläche, Flächenanteil in Deutschland und THG-Emissionen der Flächenkategorien mit hohen THG-Reduktionspotenzialen (2010)

	Emissionen Gg CO_2-Äq	Fläche kha	Anteil an Ackerland bzw. Grünland	Anteil an Total
Ackerland				
Ackerland (org. alt)	23.381	580	4,10%	1,60%
Ackerland (org. neu)	1.729	43	0,30%	0,10%
Ackerland (min. neu)	1.710	593	4,20%	1,70%
Ackerland TOTAL		14.203		39,70%
Grünland				
Grünland (org. alt)	10.765	604	10,70%	1,70%
Grünland TOTAL		5.662		15,80%
Restliche Kategorien	7.058			
TOTAL	44.642	35.780		100,00%

Quelle: Eigene Darstellung nach CRF-Tabellen 2010, vgl. auch Tabelle 6-36; min = mineralische Böden, org. = organische Böden; „Restliche Kategorien“ umfass alle weiteren Kategorien (z.B. Ackerland (min. alt), Grünland (min. alt), Gewässer, etc.).

6.5.1.2 Räumliche Verteilung organischer Böden

Laut Flächenanalysen durch Drösler et al. (2011) werden in Deutschland von den 18.098 km² Moorflächen, die in der Bodenübersichtskarte aus dem Jahr 1997 ausgewiesen sind, 32% als Acker- und 40% als Grünland genutzt. Dies entspricht 5% der Ackerfläche und 14% der Grünlandfläche in Deutschland. Diese Werte liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Werte, die im Jahr 2010 in den CRF-Tabellen für Ackerland und Grünland auf organischen Böden (4,4% bzw. 10,7%; vgl. Tabelle 6-37) ausgewiesen sind.

Im Hinblick auf eine räumliche Verteilung zeigt sich, dass Moorflächen vor allem in Norddeutschland anzutreffen sind. Ein kleinerer Flächenanteil befindet sich in Süddeutschland (vgl. Drösler et al. 2011). Die Erstellung einer detaillierten Flächenkulisse für unterschiedliche Moortypen wird derzeit im Rahmen des Projekts „Klimaberichterstattung organische Böden“[69] durch die Humboldt-Universität zu Berlin und das Thünen-Institut in Braunschweig erarbeitet. Ergebnisse stehen voraussichtlich im Oktober 2013 zur Verfügung und werden im weiteren Verlauf dieses Vorhabens berücksichtigt.

6.5.1.3 THG-Reduktionspotenzial: Flächenumwandlung oder Bioenergie

Wie in Kap. 6.5.1.1 für das Jahr 2010 herausgestellt liegen die deutlichsten LULUCF-Reduktionspotenziale im Bereich der landwirtschaftlichen Flächen auf organischen Böden. Hierbei ist insbesondere eine Umwandlung von Acker- und Grünlandflächen mit hohen Emissionswerten hin zu Flächen mit niedrigen Emissionswerten (z.B. Wald, Feuchtgebiete oder Gehölze) als Maßnahme geeignet.

Mit dieser Umwandlung würde aber landwirtschaftliche Fläche verloren gehen. Dies führt sehr wahrscheinlich zu einer Verdrängung der Produktion ins Ausland, wo mit negativen indirekten Effekten zu rechnen ist. Da aber bereits auf anderen landwirtschaftlichen Flächen Biomasse als Bioenergie – mit dem Ziel einer THG-Reduktion – angebaut wird, stellt sich die Frage, ob es eine effizientere Klimaschutzmaßnahme wäre,

a) weiterhin Bioenergie anzubauen und die organischen Böden in einer landwirtschaftlichen Nutzung zu lassen oder
b) organische Böden aus der landwirtschaftlichen Nutzung zu nehmen und die Anbaufläche für Bioenergie zu reduzieren.

Bei der Umwandlung von Ackerland auf organischen Bögen zu Wald, Feuchtgebieten oder Gehölzen kann innerhalb der ersten 20 Jahren eine Reduktion der THG-Emissionen von 42,1 bis 54,6 Mg CO_2/(ha*a) erreicht werden (Tabelle 6-38). THG-Reduktionen bei der Umwandlung von Grünland in diese Flächenkategorien liegen in der gleichen Größenordnung (42,4-54,7 Mg CO_2/(ha*a)). Nach 20 Jahren, wenn die umgewandelten Flächen in die Kategorie „alt“ übergehen, reduziert sich das Reduktionspotenzial auf etwa 40 Mg CO_2/(ha*a) (Tabelle 6-38).

Im Vergleich hierzu ist für die Produktion von Bioenergie auf Ackerflächen mit THG-Reduktion von maximal 23 Mg CO_2-Äq/(ha*a) zu rechen (vgl. Tabelle 6-38). Bei einer energetischen Nutzung von Grasschnitt liegt der Wert bei maximal 15 Mg CO_2-Äq/(ha*a) (WBGU 2008). Damit zeigt sich deutlich, dass mit einer Umwandlung von Ackerflächen auf organischen Böden hin zu Wald, Feuchtgebieten oder Gehölzen eine

[69] http://www.ti.bund.de/no_cache/de/startseite/institute/ak/projekte/verbundprojekt-organische-boeden/mehr-zum-projekt.html

zwei- bis dreifach höhere THG-Reduktion erreicht werden kann als mit dem Anbau von Bioenergie.

Diese Analyse unterstreicht, dass die Umwandlung der organischen Böden und die gleichzeitig Reduktion der Produktion von Bioenergie die effizientere der beiden oben genannten Klimaschutzmaßnahmen darstellt.

Tabelle 6-38 THG-Reduktionspotenzialen bei der Umwandlung von Ackerland auf organischen Böden hin zu Wald, Feuchtgebieten oder Gehölzen und bei der Produktion von Bioenergie.

Flächenkategorie	Emissionen Mg CO_2/ha	Einsparung Mg CO_2/ha
Vor Umwandlung		
Altes Ackerland (org. Böden)	40,33	0,00
Die ersten 20 Jahre nach Umwandlung		
Altes Ackerland (org. Böden) zu neuem Wald (org. Böden)	-14,30	-54,63
Altes Ackerland (org. Böden) zu neuen Feuchtgebieten (org. Böden)	-1,77	-42,11
Altes Ackerland (org. Böden) zu neuem Gehölz (org. Böden)	-6,11	-46,44
Ab dem 21. Jahre nach Umwandlung		
Alter Wald (org. Böden)	0,88	-39,45
Alte Feuchtgebiete (org. Böden) ohne Torfabbau	-1,77	-42,11
Alte Gehölze (org. Böden)	2,49	-37,84
Bioenergie		
Bioenergie vom Acker (WBGU 2008)	k.A.	-4 bis -23

Quelle: Eigene Darstellung nach CRF-Tabellen 2010 und WBGU 2008; k.A. = keine Angaben; die Berechnungen basieren auf der Quellen- und Senkenleistung der Kategorien.

6.5.1.4 Szenarien-Entwicklung

Für die Szenarien-Entwicklung werden – aufbauend auf den Ergebnissen der Analyse der CRF-Tabellen – für die Flächenkategorien, die eine Bedeutung bei den LULUCF-Emissionen einnehmen, Maßnahmen (M) entwickelt, die die THG-Emissionen reduzieren. Diese Maßnahmen werden dann bei der Berechnung der drei Szenarien (Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90) unterschiedlich stark berücksichtigt (siehe Tabelle 6-39). Hinzu kommen zwei Maßnahmen zur Entwicklung der Siedlungsfläche und zum Torfabbau, die sich aus bereits gesetzten politischen Zielen ergeben. Zudem wird eine Restriktion (R) zum Grünlandumbruch eingeführt, um realistische Modelergebnisse zu erhalten. Diese Maßnahmen und die Restriktion werden in einem nächsten Schritt den Szenarien zugeordnet.

Maßnahme M-LULUCF-1: Im Hinblick auf die Entwicklung neuer Siedlungsflächen wird als Maßnahme angenommen, dass das Ziel, bis 2020 nur noch maximal 30 ha/Tag an neuer Siedlungsfläche zu erschließen[70], erreicht wird. Im Jahr 2010 wurden 90,2 ha/Tag in Siedlungsflächen umgewandelt. Im Modell wird hierzu ab 2011 die Anzahl an neuen Siedlungsflächen linear bis 2020 auf 30 ha/Tag reduziert und zwar unter Beibehaltung der Anteile pro umgewandelten Flächentyp aus der Fortschreibung. Flächenänderungen von Siedlungen zu anderen Flächenkategorien werden ab dem Jahr 2011 bis 2050 als konstant fortgeschrieben. Diese Maßnahme wird in allen Szenarien zu 100% umgesetzt.

Maßnahme M-LULUCF-2: In Bezug auf Feuchtgebiete wird als Maßnahme angenommen, dass der Abbau von Torf im Zeitraum von 2015 bis 2020 vollständig eingestellt wird.[71] Dies wird im Modell derart umgesetzt, dass der Emissionskoeffizient für alte Feuchtgebiete (-37,5 Mg CO_2/(ha*a)), in die der Torfabbau in den CRF-Tabellen eingerechnet ist, ab 2015 bis 2020 linear abnimmt bis zu dem Emissionskoeffizienten von -2,0 Mg CO_2-Äq/(ha*a), der für alte Feuchtgebiete ohne Torfabbau angenommen wird (zum Vergleich Feuchtgebiete ohne Torfabbau: neue Feuchtgebieten aus Ackerland bzw. Grünland auf organischen Böden liegen bei -1,77 bzw. -2,05 Mg CO_2-Äq/(ha*a)).

Maßnahme M-LULUCF-3.1: Für den Flächentyp Grünland wird als Maßnahme angenommen, dass Grünland auf organischen Böden in Wald (10%), Feuchtgebiete (80%) oder Gehölze (10%) umgewandelt wird. Der hohe Anteil an Feuchtgebieten ist damit begründet, dass bereits Grünland vorliegt und insbesondere vernäßte Grünlandflächen einen hohen Naturschutzwert aufweisen. Die Umsetzung im Modell geschieht linear über den Zeitraum von 2015 bis 2030, wobei für diese Jahre der Anteil an Grünland auf organischen Böden, das in die drei Flächenkategorien umgewandelt wird, je nach Zielgröße der Abnahme (z.B. Restfläche von Gehölze auf organischen Böden von 5%) erhöht wird. Ab 2031 sinken die Flächenänderungskoeffizienten wieder auf die Werte vor 2015.

Maßnahme M-LULUCF-3.2: Als zweite Maßnahme für Grünland werden andere Flächenkategorien auf organische Böden nur noch in geringem Umfang in Grünland umgewandelt. Diese Maßnahme greift ab 2015 und die entsprechenden Flächenänderungskoeffizienten werden im Modell auf 5% des Fortschreibungswertes heruntergesetzt.

Maßnahme M-LULUCF-4.1: Im Hinblick auf Ackerflächen werden Ackerflächen auf organischen Böden in Wald (40%), Feuchtgebiete (50%) oder Gehölze (10%) umgewandelt. Für diese Verteilung wurde angenommen, dass die Hälfte der Fläche in feuch-

---

[70] Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung aus dem Jahr 2002 (http://www.umweltbundesamt.de/umweltrecht/raumplanung.htm)

[71] Sicherung von Mooren bis 2020 (siehe BMU 2007)

tes Grünland (Feuchtgebiete) umgewandelt wird. Die übrigen Flächen werden als nicht vernäßte Wald- bzw. Gehölzstandorte entwickelt, womit eine höhere THG-Reduktion erreicht wird als mit der Umwandlung zu Feuchtgebieten. Diese Maßnahme wird im Modell in gleicher Weise wie beim Grünland umgesetzt (Zeitraum von 2015 bis 2030).

Maßnahme M-LULUCF-4.2: Andere Flächenkategorien auf organischen Böden werden nur noch zu einem sehr geringen Anteil in Ackerland umgewandelt (ab 2015 nur noch 5% von dem Wert der Fortschreibung).

Maßnahme M-LULUCF-4.3: Zusätzlich wird eine Umwandlung von Dauergrünland (= Grünland) und Gehölze auf organischen und mineralischen Böden) zu Ackerflächen weitestgehend unterbunden (ab 2015 nur noch 5% des Fortschreibungswertes). Letzteres entspricht der Naturschutzforderung eines Verbots für Grünlandumbruch. Beispielsweise gilt in Nordrhein-Westfalen bereits ein Grünlandumbruchverbot[72].

Mit diesen Maßnahmen wird der Großteil der als relevanten identifizierten LULUCF-Emissionen adressiert (vgl. Abschnitt 6.5.1.1). Die Parametrisierung basiert auf eigenen Einschätzungen, die mit LULUCF- und Naturschutzexperten diskutiert wurden. Zudem decken sich diese Maßnahmen im Grundzug mit den Empfehlungen für eine effiziente Klimaschutzpolitik in Niedersachsen (Flessa et al. 2012).

Nicht berücksichtigt werden Emission von Siedlungsflächen und Emissionen durch den Einsatz von Karbonatdünger. Die Emissionskoeffizienten für diese beiden Kategorien (0,69 Mg CO_2-Äq /(ha*a) bzw. 0,12 Mg CO_2-Äq /(ha*a)) sind sehr niedrig und die betroffenen Flächen sehr groß. Da eine signifikante Reduktion der Flächen schwer möglich ist, müsste eine Reduktion der THG-Emissionen auf Ebene der Emissionskoeffizienten erfolgen. In Rücksprache mit dem Auftraggeber wird dies ggf. in der nächsten Projektphase berücksichtigt.

Hinzu kommt noch eine *Restriktion (R-LULUCF-5):* Für mineralische Böden im Jahr 2010 lag die Umwandlung von Ackerland zu Gehölzen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Umwandlung von Gehölzen zu Ackerland. In dem Moment, wo ein Grünlandumbruchsverbot (einschließlich Gehölzen) umgesetzt wird (siehe *M-LULUCF-5.3*), werden durch den weiterhin hohen Flächenänderungskoeffizienten für Ackerflächen hin zu Gehölzen überproportional Ackerflächen zu Gehölzen umgewandelt. Es wird aber davon ausgegangen, dass Landwirte versuchen werden, ihre verfügbare Ackerfläche aufrecht zu halten. Daher wird in allen Szenarien angenommen, dass die Umwandlung von Ackerland zu Gehölzen und die Umwandlung von Gehölzen zu Ackerland immer identisch sind.

[72] http://www.lb-naturschutz-nrw.de/34+M5268eb8ccf6.98.html

Tabelle 6-39 Maßnahme und Restriktionen der drei Szenarien (Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90)

Flächenkategorie	Maßnahmen	Umsetzung		
		AMS (2012)	KS 80	KS 90
Siedlungen				
Neue Siedlungen (20 Jahre) aus anderen Flächenkategorien --> *M-LULUCF-1*	Die Inanspruchnahme von Fläche für Siedlungen wird bis 2020 auf 30,0 ha/Tag reduziert (2010: 90,2 ha/Tag). Keine Sondermaßnahme für Grünland und Gehölze.	100%	100%	100%
Feuchtgebiete und Gewässer				
Alte Feuchtgebiete (--> M-LULUCF-2)	Der Abbau von Torfmoor wird eingestellt (im Zeitraum von 2015-2020)	--	100%	100%
Grünland				
Altes Grünland (organische Böden) --> *M-LULUCF-3.1*	Grünland auf organischen Böden wird zu Wald (10%), Feuchtgebieten (80%) oder Gehölze (10%) umgewandelt (im Zeitraum von 2015-2030)	--	30%	95%
Neues Dauergrünland (20 Jahre, organische Böden) --> *M-LULUCF-3.2*	Andere Flächenkategorien auf organischen Böden werden nicht zu Dauergrünland umgewandelt (ab 2015 nur noch 5% des Fortschreibungswertes)	--	30%	95%
Ackerland				
Altes Ackerland (organischer Boden) --> *M-LULUCF-4.1*	Ackerland auf organischen Böden wird zu Wald (40%), Feuchtgebieten (50%) oder Gehölze (10%) umgewandelt (im Zeitraum von 2015-2030)	--	30%	95%
Neues Ackerland (20 Jahre, organische Böden) --> *M-LULUCF-4.2*	Andere Flächenkategorien auf organischen Böden werden nicht zu Ackerland umgewandelt (ab 2015 nur noch 5% des Fortschreibungswertes)	--	30%	95%
Neues Ackerland (20 Jahre, organische und mineralische Böden) --> *M-LULUCF-4.3*	Grünland und Gehölze werden nicht mehr zu Acker umgewandelt (ab 2015 nur noch 5% des Fortschreibungswertes)	--	30%	95%
Gehölze (Restriktion)				
Neue Gehölze (20 Jahre, mineralische Böden) --> *R-LULUCF-5*	Ackerland auf mineralischen Böden wird zu gleichen Flächenanteilen zu Gehölze wie Gehölze auf mineralischen Böden zu Ackerland (ab 2015)	100%	100%	100%

Quelle: Eigene Darstellung; AMS (2012) = Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012); KS 80 = Klimaschutzszenario 80; KS 90 = Klimaschutzszenario 90; Die Parametrisierung der Umsetzung der Maßnahmen basiert auf eigenen Einschätzungen, die mit LULUCF- und Naturschutzexperten diskutiert wurden.

Die in Tabelle 6-39 zusammengestellten Maßnahmen beziehen sich ausschließlich auf Maßnahmen zu Reduktion von Emissionen aus Quellen. Die Senken (Wald und neue Gehölze (GL-2)) wurden bisher nicht bearbeitet. Hierzu können nach Absprache mit dem Auftraggeber entsprechende Maßnahmen in der nächsten Projektphase erarbeitet werden.

Für die drei Szenarien wird Folgendes angenommen:

- Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) wird lediglich die Maßnahme zu Siedlungsflächen (*M-LULUCF-1*) umgesetzt.
- Für das Klimaschutzszenario 80 wird angenommen, dass alle Maßnahmen aus Tabelle 6-39 herangezogen werden. Allerdings wird die Ausgestaltung der Regularien so schwach gestaltet, dass lediglich 30% der adressierten Flächen durch die Maßnahmen beeinflusst werden. Dieser Wert wurde in Rücksprache mit LULUCF- und Naturschutzexperten gewählt.
- Im Klimaschutzszenario 90 werden alle in Tabelle 6-39 beschriebenen Maßnahmen zu 95% umgesetzt, da die Praxis zeigt, dass bei flächenbezogenen Bestimmungen eine 100%-ige Umsetzung schwer zu erreichen ist (z.B. hoher Grünlandumbruch trotz *Cross-Compliance*-Bestimmungen, Bebauung in Schutzgebieten, etc.).

6.5.2 Ergebnisse zu Flächenänderungen (Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), Klimaschutzszenario 80, Klimaschutzszenario 90)

Die Flächenveränderungen der LULUCF-Flächentypen sind in Abbildung 6-7 für alle Szenarien (Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), Klimaschutzszenario 80, Klimaschutzszenario 90) graphisch einander gegenübergestellt. Ein deutlicher Unterschied zwischen den drei Szenarien ist, dass die Ackerlandfläche im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) auf einen Wert von gut 14,3 Mio. ha ansteigt, wohingegen die Ackerlandfläche im Klimaschutzszenario 80 leicht und im Klimaschutzszenario 90 deutlich abnimmt. Diese Abnahme im Klimaschutzszenario 80 und 90 resultiert vor allem aus der Umwandlung von Ackerland in Wald und Feuchtgebiete. Die Umsetzung eines Umbruchverbots für Dauergrünland wirkt sich hingegen weniger stark aus. Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) führt das Fehlen dieser Maßnahmen zu dem genannten Anstieg an Ackerland.

Für Feuchtgebiete ist im Klimaschutzszenario 80 eine leichte und im Klimaschutzszenario 90 eine starke Zunahme zu verzeichnen (erreichter Wert in 2050: 318.000 ha bzw. 821.000 ha). Dies ist ein direktes Ergebnis der Vernässung von Acker- und Grünland auf organischen Böden. Im Vergleich hierzu liegt der Anteil an Feuchtgebieten im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bei 90.000 ha.

Grünlandflächen nehmen in allen drei Szenarien deutlich bis auf einen Wert von 5,1 Mio. ha ab. Jedoch entsteht im Klimaschutzszenario 80 und 90 gleichzeitig Grünland in Feuchtgebieten (s.o.), was den Grünlandverlust im Klimaschutzszenario 80 teilwiese und im Klimaschutzszenario 90 mehr als kompensiert. Gerade im Klimaschutzszenario 90 kann aus Naturschutzsicht durch die Vernässung eine deutliche Aufwertung des Grünlands erwartet werden.

Waldflächen bleiben im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) konstant (2050: 11,0 Mio. ha). Im Klimaschutzszenario 80 und 90 steigt der Anteil an Waldflächen – bedingt durch die Umwandlung von Acker- und Grünland auf organischen Böden – leicht an (erreichter Wert in 2050: 11,1 Mio. ha bzw. 11,3 Mio. ha).

Die Reduktion des Flächenverbrauchs für Siedlungsflächen auf nur noch 30 ha/Tag bewirkt, dass die Siedlungsfläche in Deutschland sich ab 2020 in allen drei Szenarien auf einen konstanten Wert etwa 3,8 Mio. ha einpendelt. Ohne die beschriebene Reduktion des Flächenverbrauchs würde die Siedlungsfläche in Deutschland deutlich bis auf einen Wert von 4,7 Mio. ha im Jahr 2050 ansteigen (Daten nicht dargestellt).

Abbildung 6-7 Flächenänderungen der LULUCF-Flächentypen für die drei Szenarien (Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90) von 1990 bis 2050

Quelle: Eigene Darstellung

6.5.3 Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (THG)

Die THG-Emissionen im LULUCF-Sektor werden stark durch CO_2-Emissionen dominiert, da insbesondere CO_2 bei Flächenumwandlungen und -nutzung freigesetzt bzw. eingelagert wird. Lachgasemissionen nehmen z.B. im Jahr 2010 weniger als 1% und Methanemissionen weniger als 0,1% der THG-Emissionen ein.

Die THG-Emissionen des Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)s sind in Abbildung 6-8 und Tabelle 6-40 dargestellt. Auffällig ist zuallererst der drastische Anstieg der Emissionen für Wälder von 2001 nach 2002. Dies ist ein methodischer Effekt, der durch die Nutzung der neuen Bundeswaldinventur (BWI II, 2001/2002) bedingt und entsprechend in den CRF-Tabellen dokumentiert ist. Da für die Fortschreibung im Rahmen der Modellierung jedoch auf die Jahre von 2006 bis 2010 zurückgegriffen wird, hat dieser methodische Effekt keine Auswirkungen auf die Ergebnisse der Modellierung.

In der Summe pendeln sich im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ab 2020 die THG-Emissionen der einzelnen Flächenkategorien und ebenso die Summe aller Emissionen auf weitestgehend konstante Werte ein. Im Jahr 2050 ist der gesamte LULUCF-Sektor für Emissionen von ca. 22.400 Gg CO_2-Äq verantwortlich. Dabei fungieren vor allem die Waldflächen als Senken (in 2050: ca. -21.350 Gg CO_2-Äq) und allen voran die Ackerflächen gefolgt von den Grünlandflächen als Quellen (in 2050: ca. 28.850 Gg CO_2-Äq bzw. ca. 9.000 Gg CO_2-Äq; Abbildung 6-8, Tabelle 6-40THG-). Die Emissionen der Feuchtgebiete resultiert vor allem aus dem noch bestehenden Torfabbau (2.520 Gg CO_2-Äq in 2050). Die Abnahme der Senkenfunktion der neuen Waldflächen von 2002 bis 2020 ist damit begründet, dass seit etwa 2000 die Umwandlung von anderen Flächenkategorien in Wald deutlich abgenommen hat. Dadurch nimmt der Pool an neuen Waldflächen, die eine größere Senkenfunktion als alte Waldflächen haben, stetig ab und pendelt sich nach 2020 auf einen konstanten Wert ein.

Abbildung 6-8 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) von 1990 bis 2050

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 6-40 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) von 2010 bis 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	Gg CO_2				
5.A. Wald	-24.991	-21.656	-21.268	-21.305	-21.342
5.B. Ackerland	28.458	28.228	28.325	28.600	28.874
5.C. Grünland (inkl. Gehölze)	9.037	7.742	8.881	9.198	9.021
5.D. Feuchtgebiete (inkl. Gewässer)	2.156	2.472	2.790	3.020	3.250
5.E. Siedlungen	2.551	2.341	2.483	2.526	2.520
5.F. Other Land	0	0	0	0	0
5.G. Other	58	62	62	62	62
5. Alle Landnutzungskategorien	17.270	19.189	21.273	22.101	22.385
ggü. 1990	162,3%	169,3%	176,8%	179,8%	180,8%
ggü. 2005	9,7%	21,9%	35,1%	40,4%	42,2%
ggü. 2010		11,1%	23,2%	28,0%	29,6%

Quelle: Eigene Darstellung

6.5.4 Ergebnisse Klimaschutzszenario 80 (THG)

Im Klimaschutzszenario 80, in dem alle Maßnahmen zu 30% umgesetzt werden (vgl. Tabelle 6-39), wird eine deutliche THG-Reduktion erreicht (Abbildung 6-9, Tabelle 6-41). Dies wird insbesondere durch die Umwandlung von Acker- und Grünlandflächen auf organischen Böden in Feuchtgebiete, Wälder und Gehölze erreicht. Bis zum Jahr 2030 sinken die THG-Emissionen im LULUCF-Sektor in diesem Szenario auf 6.150 Gg CO_2-Äq und steigen bis 2050 wieder auf ca. 8.675 Gg CO_2-Äq an (Abbildung 6-9, Tabelle 6-41). Dieser Anstieg ist darin begründet, dass die neuen Wald- und Gehölzflächen eine stärkere Senkenfunktion aufweisen als die alten Wald- und Gehölzflächen.

Abbildung 6-9 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Klimaschutzszenario 80 von 1990 bis 2050 (alle Maßnahmen, 30% Umsetzung)

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 6-41 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Klimaschutzszenario 80 von 2010 bis 2050 (alle Maßnahmen, 30% Umsetzung)

	2010	2020	2030	2040	2050
	Gg CO_2				
5.A. Wald	-24.991	-22.144	-22.488	-22.006	-21.265
5.B. Ackerland	28.458	25.302	20.977	21.030	21.149
5.C. Grünland (inkl. Gehölze)	9.037	6.397	5.521	6.001	6.058
5.D. Feuchtgebiete (inkl. Gewässer)	2.156	-63	-403	-183	146
5.E. Siedlungen	2.551	2.342	2.485	2.529	2.525
5.F. Other Land	0	0	0	0	0
5.G. Other	58	62	62	62	62
5. Alle Landnutzungskategorien	17.270	11.896	6.154	7.433	8.675
ggü. 1990	162,3%	142,9%	122,2%	126,8%	131,3%
ggü. 2005	9,7%	-24,4%	-60,9%	-52,8%	-44,9%
ggü. 2010		-31,1%	-64,4%	-57,0%	-49,8%

Quelle: Eigene Darstellung

6.5.5 Ergebnisse Klimaschutzszenario 90 (THG)

Bei einer Umsetzung der Maßnahmen zu 95% (vgl. Tabelle 6-39) wird im Klimaschutzszenario 90 eine so starke THG-Reduktion erreicht, dass der LULUCF-Sektor nicht mehr als Quelle sondern als Senke fungiert. Dies liegt wiederum vor allem an der Umwandlung von Acker- und Grünlandflächen auf organischen Böden in Feuchtgebiete, Wälder und Gehölze (Abbildung 6-10, Tabelle 6-42). Die LULUCF-Emissionen von Ackerflächen sinken von ca. 28.500 Gg CO_2-Äq im Jahr 2010 auf ca. 4.000 Gg CO_2-Äq im Jahr 2050 und die Emissionen von Grünlandflächen nehmen von ca. 9.000 Gg CO_2-Äq im Jahr 2010 auf ca. -550 Gg CO_2-Äq im Jahr 2050 ab. In der Summe reduzieren sich die gesamten LULUCF-Emissionen von ca. 17.300 Gg CO_2-Äq im Jahr 2010 auf ca. -21.700 Gg CO_2-Äq im Jahr 2030, gefolgt von einem Anstieg auf einen Wert von -14.900 bis Gg CO_2-Äq im Jahr 2050 (Abbildung 6-10, Tabelle 6-42). Letztere Anstieg wiederum durch den oben beschriebenen Effekt von neuen und alten Flächen bedingt.

Abbildung 6-10 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Klimaschutzszenario 90 von 1990 bis 2050 (alle Maßnahmen, 95% Umsetzung)

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 6-42 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Klimaschutzszenario 90 von 2010 bis 2050 (alle Maßnahmen, 95% Umsetzung)

	2010	2020	2030	2040	2050
	Gg CO_2				
5.A. Wald	-24.991	-23.221	-25.180	-23.554	-21.096
5.B. Ackerland	28.458	18.789	4.625	4.198	3.982
5.C. Grünland (inkl. Gehölze)	9.037	3.343	-2.111	-1.213	-555
5.D. Feuchtgebiete (inkl. Gewässer)	2.156	-546	-1.611	-908	146
5.E. Siedlungen	2.551	2.344	2.489	2.536	2.535
5.F. Other Land	0	0	0	0	0
5.G. Other	58	62	62	62	62
5. Alle Landnutzungskategorien	17.270	770	-21.725	-18.879	-14.927
ggü. 1990	162,3%	102,8%	21,6%	31,9%	46,1%
ggü. 2005	9,7%	-95,1%	-238,0%	-219,9%	-194,8%
ggü. 2010		-95,5%	-225,8%	-209,3%	-186,4%

Quelle: Eigene Darstellung

6.5.6 Vergleich der Szenarien

Die Ergebnisse der drei Szenarien (Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), Klimaschutzszenario 80 und Klimaschutzszenario 90) unterscheiden sich deutlich voneinander. Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) stellt der LULUCF-Sektor – wie auch im Jahr 2010 – eine THG-Quelle in der Größenordnung von 22.400 Gg CO_2-Äq im Jahr 2050 dar. Durch die teilweise Umsetzung der Maßnahmen im Klimaschutzszenario 80 wird diese THG-Quelle auf 8.675 Gg CO_2-Äq im Jahr 2050 reduziert. Eine konsequente Umsetzung der Maßnahmen im Klimaschutzszenario 90 führt dazu, dass der LULUCF-Sektor nicht mehr als Quelle, sondern als Senke fungiert. Die Senkenleistung im Klimaschutzszenario 90 beträgt -14.900 Gg CO_2-Äq im Jahr 2050 (vgl. Tabelle 6-42).

Ein Vergleich der THG-Entwicklung in Bezug auf das Jahr 1990 und das Jahr 2005 ist ebenfalls in Tabelle 6-42 dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass die beiden Bezugsjahre sich sehr deutlich voneinander unterschieden. Im Jahr 1990 trat der LULUCF-Sektor als Senke auf, insbesondere durch die Senkenleistung der alten Waldflächen. Im Jahr 2005 – nach der Waldinventur im Jahr 2002 – stellt der LULUCF-Sektor eine Quelle dar. Im Zeitraum von 1990 bis 2005 war eine Zunahme der THG-Emission um 157 % zu verzeichnen. Entsprechend deutlich unterscheiden sich die Veränderungen der THG-Emissionen in Bezug auf das Jahr 1990 und 2005:

- Bezogen auf das Jahr 1990 ist bis zum Jahr 2050 im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ein Anstieg der THG-Emissionen um ca. 180% festzustellen, der im Klimaschutzszenario 90 auf ca. 46% abgemildert werden kann.
- Bezogen auf das Jahr 2005 steigen bis zum Jahr 2050 im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) die THG-Emission um 42% an, während sie im Klimaschutzszenario 80 um -45% und im Klimaschutzszenario 90 um -195%

abnehmen. Der letztere Wert zeigt, dass der LULUCF-Sektor im Vergleich zum Jahr 2005 im Jahr 2050 wieder eine Senkenfunktion annimmt.

Tabelle 6-43 LULUCF-bedingte THG-Emissionen im Klimaschutzszenario 90 von 2010 bis 2050 (alle Maßnahmen, 95% Umsetzung)

	1990	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	kt CO_2-Äqu.						
CO_2-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	-27.968	15.531	17.028				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				18.965	21.069	21.896	22.181
Klimaschutzszenario 80				11.683	5.980	7.256	8.483
Klimaschutzszenario 90				582	-21.833	-18.996	-15.092
CH_4-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	9	1	3				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				5	5	5	5
Klimaschutzszenario 80				5	5	5	5
Klimaschutzszenario 90				5	5	5	5
N_2O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2010	260	266	251				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				219	199	199	199
Klimaschutzszenario 80				207	169	171	187
Klimaschutzszenario 90				183	103	111	160
Summe CO_2+CH_4+N_2O							
Entwicklung 1990 – 2010	-27.699	15.798	17.283				
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				19.189	21.273	22.101	22.385
Klimaschutzszenario 80				11.896	6.154	7.433	8.675
Klimaschutzszenario 90				770	-21.725	-18.879	-14.927
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 1990 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				-169,3	-176,8	-179,8	-180,8
Klimaschutzszenario 80				-142,9	-122,2	-126,8	-131,3
Klimaschutzszenario 90				-102,8	-21,6	-31,8	-46,1
Summe CO_2+CH_4+N_2O				Veränderung ab 2005 in %			
Akt.-Maßnahmen-Sz. (2012)				21,5	34,7	39,9	41,7
Klimaschutzszenario 80				-24,7	-61,0	-53,0	-45,1
Klimaschutzszenario 90				-95,1	-237,5	-219,5	-194,5

Quelle: Eigene Darstellung

7 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen und deren Komponenten

Im Folgenden wird die Entwicklung der Treibhausgasemissionen für alle drei Szenarien jeweils auf zwei unterschiedlichen Weisen aggregiert dargestellt, um zum einen die Beiträge der unterschiedlichen Treibhausgase, zum anderen die Beiträge der einzelnen Sektoren abzubilden. Die gesamten Treibhausgasemissionen werden dabei jeweils in einer weiten und einer engen Abgrenzung dargestellt, das heißt jeweils mit bzw. ohne Berücksichtigung der Emissionsbeiträge der Hochseeschifffahrt, des internationalen Flugverkehrs und LULUCF.

7.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

In Tabelle 7-1 ist die Entwicklung der Emissionen von CO_2, CH_4, N_2O, HFKW, FKW sowie SF_6 für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) zusammengestellt, wobei in dieser Zusammenstellung die den internationalen Treibstoffbunkerungen (Hochseeschifffahrt und internationaler Flugverkehr) und LULUCF zuzurechnenden Treibhausgasemissionen gesondert ausgewiesen und nur in der unteren der beiden Summenzeilen berücksichtigt werden.

Tabelle 7-1 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nach Gasen, 2005–2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	Mio. t CO_2-Äqu.					
Kohlendioxid	866,0	819,0	696,2	583,6	504,7	448,7
Methan	55,6	47,7	39,6	37,4	35,4	33,7
Lachgas	61,3	54,7	55,7	55,4	55,3	55,3
HFKW	10,3	11,6	7,1	6,4	7,1	7,7
FKW	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3
SF_6	3,5	3,2	4,9	1,6	1,4	1,5
Gesamt	997,3	936,5	803,9	684,8	604,2	547,2
ggü. 2005	*-*	*-6,1%*	*-19,4%*	*-31,3%*	*-39,4%*	*-45,1%*
ggü. 1990	*-20,0%*	*-24,8%*	*-35,5%*	*-45,0%*	*-51,5%*	*-56,1%*
ggü. Basisjahr[a]	*-20,2%*	*-25,1%*	*-35,7%*	*-45,2%*	*-51,7%*	*-56,2%*
Nachrichtlich:						
Internat. ziviler Luftverkehr und internat. Seeverkehr	*31,4*	*33,8*	*39,4*	*45,2*	*49,4*	*50,3*
LULUCF	*15,8*	*17,3*	*19,2*	*21,3*	*22,1*	*22,4*
Gesamt incl. nachrichtlich	1.044,4	987,6	862,5	751,3	675,7	619,8
ggü. 2005	*-*	*-5,4%*	*-17,4%*	*-28,1%*	*-35,3%*	*-40,7%*
ggü. 1990	*-15,7%*	*-20,3%*	*-30,4%*	*-39,3%*	*-45,4%*	*-50,0%*
ggü. Basisjahr[a]	*-15,9%*	*-20,5%*	*-30,6%*	*-39,5%*	*-45,6%*	*-50,1%*

Anmerkung: [a] das Basisjahr ist 1990 für Kohlendioxid, Methan und Lachgas sowie 1995 für HFKW, FKW und Schwefelhexafluorid, als Basisemission wurde der in FCCC/KP/CMP/2008/9/Rev.1 festgelegte Wert verwendet

Quellen: UBA (2012 a+b), Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Im Zeitraum 1990 bis 2050 werden die Treibhausgasemissionen um 56 % zurückgeführt. Der größte Emissionsminderungsbeitrag zwischen 2010 und 2050 entfällt auf die Kohlendioxid-Emissionen (CO_2), in diesem Bereich werden etwa 95 % der gesamten Emissionsreduktion erbracht. Darüber hinaus fällt ein relevanter Anteil von knapp 4 % auf die Zurückführung des Ausstoßes von Methan (CH_4). Die Emissionen der Gruppe der synthetischen Treibhausgase (teilhalogenisierte Kohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexaflourid (SF_6)) tragen zusammen etwas mehr als 1 % zur gesamten Emissionsreduktion bei. Die Emissionen von Lachgas (N_2O) steigen sogar leicht an.

Tabelle 7-2 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nach Quellbereichen, 2005–2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	Mio. t CO_2-Äqu.					
Energiesektoren	380,1	354,5	289,3	231,3	196,7	175,1
Industrie	110,8	115,0	112,7	105,0	97,4	92,7
GHD	47,9	44,1	39,2	30,3	22,5	15,8
Haushalte	111,9	103,1	74,7	57,1	46,1	37,8
Verkehr	161,7	154,7	132,6	115,6	101,3	89,0
Flüchtige Emissionen aus Energiesektoren	14,7	10,8	8,5	7,6	6,2	5,0
Industrieprozesse	80,7	72,6	68,7	61,2	58,5	56,8
Produktverwendung	2,1	1,9	2,1	2,1	2,1	2,1
Landwirtschaft	69,9	67,5	67,8	67,7	67,7	67,7
Abfallwirtschaft	17,6	12,2	8,4	6,7	5,7	5,1
Gesamt	997,3	936,5	803,9	684,8	604,2	547,2
ggü. 2005	*-*	*-6,1%*	*-19,4%*	*-31,3%*	*-39,4%*	*-45,1%*
ggü. 1990	*-20,0%*	*-24,8%*	*-35,5%*	*-45,0%*	*-51,5%*	*-56,1%*
ggü. Basisjahr[a]	*-20,2%*	*-25,1%*	*-35,7%*	*-45,2%*	*-51,7%*	*-56,2%*
Nachrichtlich:						
Internat. ziviler Luftverkehr und internat. Seeverkehr	*31,4*	*33,8*	*39,4*	*45,2*	*49,4*	*50,3*
LULUCF	*15,8*	*17,3*	*19,2*	*21,3*	*22,1*	*22,4*
Gesamt incl. nachrichtlich	1.044,4	987,6	862,5	751,3	675,7	619,8
ggü. 2005	*-*	*-5,4%*	*-17,4%*	*-28,1%*	*-35,3%*	*-40,7%*
ggü. 1990	*-15,7%*	*-20,3%*	*-30,4%*	*-39,3%*	*-45,4%*	*-50,0%*
ggü. Basisjahr[a]	*-15,9%*	*-20,5%*	*-30,6%*	*-39,5%*	*-45,6%*	*-50,1%*

Anmerkung: [a] das Basisjahr ist 1990 für Kohlendioxid, Methan und Lachgas sowie 1995 für HFKW, FKW und Schwefelhexafluorid, als Basisemission wurde der in FCCC/KP/CMP/2008/9/Rev.1 festgelegte Wert verwendet

Quellen: UBA (2012 a+b), Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Eine nach Quellbereichen strukturierte Übersicht über die Emissionsentwicklung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) für den Zeitraum 2000 bis 2050 bieten Tabelle 7-2 und Abbildung 7-1.

Knapp die Hälfte der von 2010 bis zum Jahr 2050 erzielten Emissionsminderungen wird von den Energiesektoren erbracht. Jeweils etwa ein Sechstel der Emissionsminderung entfällt auf die privaten Haushalte und den Verkehr. Weitere relevante Emissionsminderungsbeiträge entfallen auf den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

(GHD) und die energie- und prozessbedingten Industrieemissionen, sowie in geringerem Maße auf die Abfallwirtschaft und die flüchtigen Emissionen der Energiesektoren. Leicht ansteigende Trends weisen die Emissionen der Landwirtschaft und aus der Produktverwendung auf. Deutlich steigende Emissionen weisen der internationale Luft- und Seeverkehr sowie LULUCF auf, hier kann der historische deutliche Steigerungstrend in Bezug auf die Emissionen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nicht gebrochen werden.

Abbildung 7-1 Verminderung von Treibhausgasemissionen in den Jahren 2020–2050 gegenüber 1990 im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

7.2 Klimaschutzszenario 80

Im Klimaschutzszenario 80 werden durch deutlich ambitioniertere Maßnahmen deutlich größere Emissionsminderungen erbracht. Bis zum Jahr 2050 belaufen sich die gesamten Emissionsminderungen auf 82 % ohne Berücksichtigung von internationalem Luft- und Seeverkehr und LULUCF bzw. 80 % unter Berücksichtigung dieser, jeweils im Vergleich zu 1990.

Tabelle 7-3 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80, 2005–2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	Mio. t CO_2-Äqu.					
Kohlendioxid	866,0	819,0	596,5	417,9	268,0	149,1
Methan	55,6	47,7	36,5	31,2	28,6	27,0
Lachgas	61,3	54,7	51,7	47,5	47,2	46,5
HFKW	10,3	11,6	5,1	0,7	0,6	0,5
FKW	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3
SF_6	3,5	3,2	4,7	1,4	1,2	1,2
Gesamt	997,3	936,5	694,9	499,2	345,8	224,6
ggü. 2005	*-*	*-6,1%*	*-30,3%*	*-49,9%*	*-65,3%*	*-77,5%*
ggü. 1990	*-20,0%*	*-24,8%*	*-44,2%*	*-59,9%*	*-72,2%*	*-82,0%*
ggü. Basisjahr[a]	*-20,2%*	*-25,1%*	*-44,4%*	*-60,1%*	*-72,3%*	*-82,0%*
Nachrichtlich:						
Internat. ziviler Luftverkehr und internat. Seeverkehr	*31,4*	*33,8*	*37,8*	*39,2*	*32,1*	*20,7*
LULUCF	*15,8*	*17,3*	*11,9*	*6,2*	*7,4*	*8,7*
Gesamt incl. nachrichtlich	1.044,4	987,6	744,6	544,5	385,4	254,0
ggü. 2005	*-*	*-5,4%*	*-28,7%*	*-47,9%*	*-63,1%*	*-75,7%*
ggü. 1990	*-15,7%*	*-20,3%*	*-39,9%*	*-56,0%*	*-68,9%*	*-79,5%*
ggü. Basisjahr[a]	*-15,9%*	*-20,5%*	*-40,1%*	*-56,2%*	*-69,0%*	*-79,6%*

Anmerkung: [a] das Basisjahr ist 1990 für Kohlendioxid, Methan und Lachgas sowie 1995 für HFKW, FKW und Schwefelhexafluorid, als Basisemission wurde der in FCCC/KP/CMP/2008/9/Rev.1 festgelegte Wert verwendet

Quellen: UBA (2012 a+b), Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Mit etwa 94 % ist der Großteil dieser Emissionsentwicklung (Tabelle 7-3) wiederum auf die Projektion für die CO_2-Emissionen zurückzuführen. Knapp 3 % der Emissionsreduktion ist auf CH_4 zurückzuführen, knapp 2 % zusammen auf die synthetischen Treibhausgase HFKW, FKW und SF_6 und gut 1 % auf N_2O.

Tabelle 7-4 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80 nach Quellbereichen, 2005-2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	Mio. t CO_2-Äqu.					
Energiesektoren	380,1	354,5	211,9	148,7	102,1	61,2
Industrie	110,8	115,0	111,5	85,2	59,7	34,2
GHD	47,9	44,1	35,6	23,0	13,1	8,2
Haushalte	111,9	103,1	65,0	39,9	25,4	17,5
Verkehr	161,7	154,7	124,3	85,0	49,8	24,7
Flüchtige Emissionen aus Energiesektoren	14,7	10,8	7,5	5,7	3,7	2,5
Industrieprozesse	80,7	72,6	62,6	42,0	22,4	7,0
Produktverwendung	2,1	1,9	2,1	2,1	2,1	2,1
Landwirtschaft	69,9	67,5	67,8	62,2	62,8	62,8
Abfallwirtschaft	17,6	12,2	6,5	5,4	4,7	4,2
Gesamt	997,3	936,5	694,9	499,2	345,8	224,6
ggü. 2005	*-*	*-6,1%*	*-30,3%*	*-49,9%*	*-65,3%*	*-77,5%*
ggü. 1990	*-20,0%*	*-24,8%*	*-44,2%*	*-59,9%*	*-72,2%*	*-82,0%*
ggü. Basisjahr[a]	*-20,2%*	*-25,1%*	*-44,4%*	*-60,1%*	*-72,3%*	*-82,0%*
Nachrichtlich:						
Internat. ziviler Luftverkehr und internat. Seeverkehr	*31,4*	*33,8*	*37,8*	*39,2*	*32,1*	*20,7*
LULUCF	*15,8*	*17,3*	*11,9*	*6,2*	*7,4*	*8,7*
Gesamt incl. nachrichtlich	1.044,4	987,6	744,6	544,5	385,4	254,0
ggü. 2005	*-*	*-5,4%*	*-28,7%*	*-47,9%*	*-63,1%*	*-75,7%*
ggü. 1990	*-15,7%*	*-20,3%*	*-39,9%*	*-56,0%*	*-68,9%*	*-79,5%*
ggü. Basisjahr[a]	*-15,9%*	*-20,5%*	*-40,1%*	*-56,2%*	*-69,0%*	*-79,6%*

Anmerkung: [a] das Basisjahr ist 1990 für Kohlendioxid, Methan und Lachgas sowie 1995 für HFKW, FKW und Schwefelhexafluorid, als Basisemission wurde der in FCCC/KP/CMP/2008/9/Rev.1 festgelegte Wert verwendet

Quellen: UBA (2012 a+b), Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Die Rolle der einzelnen Sektoren auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80 verdeutlichen Abbildung 7-2 und Tabelle 7-4.

Etwa 41 % der gesamten Emissionsminderung im Jahr 2050 gegenüber 2010 entfallen hier auf die Energiesektoren, einen erheblichen Anteil von 18 % weißt der Verkehr auf. Weitere erhebliche Anteile entfallen aber auch auf die Emissionen der privaten Haushalte, die energiebedingten und prozessbedingten Industrieemissionen, sowie in geringerem Maße auf die Emissionen des GHD-Sektors. Die übrigen Sektoren weisen eher geringe Emissionsminderungsbeiträge auf.

Die Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs steigen zwar bis 2030 weiter an, ab dann ist aber eine Trendumkehr zu verzeichnen. Auch können die Emissionen aus LULUCF deutlich gesenkt werden.

Abbildung 7-2 Verminderung von Treibhausgasemissionen in den Jahren 2020-2050 gegenüber 1990 im Klimaschutzszenario 80

Quelle: Berechnung von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

7.3 Klimaschutzszenario 90

Die größten Emissionsreduktionen werden im Klimaschutzszenario 90 durch deutlich über das Klimaschutzszenario 80 hinausgehende ambitioniertere Maßnahmen erbracht. Bis zum Jahr 2050 belaufen sich die gesamten Emissionsminderungen auf 90 % ohne und mit Berücksichtigung von internationalem Luft- und Seeverkehr und LULUCF (im Vergleich zu 1990).

Tabelle 7-5 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 90, 2005–2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	Mio. t CO_2-Äqu.					
Kohlendioxid	866,0	819,0	569,0	375,0	200,8	76,6
Methan	55,6	47,7	36,5	30,9	22,8	19,3
Lachgas	61,3	54,7	51,4	41,2	35,2	27,7
HFKW	10,3	11,6	5,1	0,7	0,6	0,5
FKW	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3
SF_6	3,5	3,2	4,7	0,7	0,5	0,4
Gesamt	997,3	936,5	667,1	449,0	260,2	124,8
ggü. 2005	-	*-6,1%*	*-33,1%*	*-55,0%*	*-73,9%*	*-87,5%*
ggü. 1990	*-20,0%*	*-24,8%*	*-46,5%*	*-64,0%*	*-79,1%*	*-90,0%*
ggü. Basisjahr[a]	*-20,2%*	*-25,1%*	*-46,6%*	*-64,1%*	*-79,2%*	*-90,0%*
Nachrichtlich:						
Internat. ziviler Luftverkehr und internat. Seeverkehr	*31,4*	*33,8*	*37,7*	*39,0*	*31,9*	*20,5*
LULUCF	*15,8*	*17,3*	*0,8*	*-21,7*	*-18,9*	*-14,9*
Gesamt incl. nachrichtlich	1.044,4	987,6	705,6	466,3	273,2	130,4
ggü. 2005	-	*-5,4%*	*-32,4%*	*-55,4%*	*-73,8%*	*-87,5%*
ggü. 1990	*-15,7%*	*-20,3%*	*-43,0%*	*-62,4%*	*-77,9%*	*-89,5%*
ggü. Basisjahr[a]	*-15,9%*	*-20,5%*	*-43,2%*	*-62,5%*	*-78,0%*	*-89,5%*

Anmerkung: [a] das Basisjahr ist 1990 für Kohlendioxid, Methan und Lachgas sowie 1995 für HFKW, FKW und Schwefelhexafluorid, als Basisemission wurde der in FCCC/KP/CMP/2008/9/Rev.1 festgelegte Wert verwendet

Quellen: UBA (2012 a+b), Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Knapp 92 % der Emissionsreduktionen sind auf CO_2 zurückzuführen. Wichtig werden im KS 90 aber auch die Reduktion von CH_4- und N_2O-Emissionen, die jeweils über 3 % zur Emissionsreduktion von 2010 bis 2050 beitragen. Die der synthetischen Treibhausgase tragen knapp 2 % zur Emissionsreduktion bei. Bemerkenswert ist, dass im KS 90 im Jahr 2050 CO_2 nur noch 61 % der gesamten Treibhausemissionen ausmacht und Beiträge von N_2O und CH_4 auf 22 % bzw. 16 % ansteigen werden.

Tabelle 7-6 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 90 nach Quellbereichen im KS 90, 2005–2050

	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	Mio. t CO_2-Äqu.					
Energiesektoren	380,1	354,5	211,7	120,3	44,4	4,9
Industrie	110,8	115,0	89,4	79,8	59,9	27,0
GHD	47,9	44,1	35,1	21,3	9,8	4,0
Haushalte	111,9	103,1	61,3	38,0	22,6	14,8
Verkehr	161,7	154,7	123,3	81,4	47,9	24,0
Flüchtige Emissionen aus Energiesektoren	14,7	10,8	7,3	5,5	3,3	2,1
Industrieprozesse	80,7	72,6	62,6	39,0	18,9	3,5
Produktverwendung	2,1	1,9	2,1	2,1	2,1	2,1
Landwirtschaft	69,9	67,5	67,8	56,3	46,8	38,4
Abfallwirtschaft	17,6	12,2	6,5	5,2	4,4	3,9
Gesamt	997,3	936,5	667,1	449,0	260,2	124,8
ggü. 2005	*-*	*-6,1%*	*-33,1%*	*-55,0%*	*-73,9%*	*-87,5%*
ggü. 1990	*-20,0%*	*-24,8%*	*-46,5%*	*-64,0%*	*-79,1%*	*-90,0%*
ggü. Basisjahr[a]	*-20,2%*	*-25,1%*	*-46,6%*	*-64,1%*	*-79,2%*	*-90,0%*
Nachrichtlich:						
Internat. ziviler Luftverkehr und internat. Seeverkehr	*31,4*	*33,8*	*37,7*	*39,0*	*31,9*	*20,5*
LULUCF	*15,8*	*17,3*	*0,8*	*-21,7*	*-18,9*	*-14,9*
Gesamt incl. nachrichtlich:	1.044,4	987,6	705,6	466,3	273,2	130,4
ggü. 2005	*-*	*-5,4%*	*-32,4%*	*-55,4%*	*-73,8%*	*-87,5%*
ggü. 1990	*-15,7%*	*-20,3%*	*-43,0%*	*-62,4%*	*-77,9%*	*-89,5%*
ggü. Basisjahr[a]	*-15,9%*	*-20,5%*	*-43,2%*	*-62,5%*	*-78,0%*	*-89,5%*

Anmerkung: [a] das Basisjahr ist 1990 für Kohlendioxid, Methan und Lachgas sowie 1995 für HFKW, FKW und Schwefelhexafluorid, als Basisemission wurde der in FCCC/KP/CMP/2008/9/Rev.1 festgelegte Wert verwendet

Quellen: UBA (2012 a+b), Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Die Rolle der einzelnen Sektoren auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80 verdeutlichen Abbildung 7-3 und Tabelle 7-6.

Etwa 43 % der gesamten Emissionsminderung im Jahr 2050 gegenüber 2010 – und damit der mit Abstand größte Anteil – entfallen hier auf die Energiesektoren, einen erheblichen Anteil von 16 % weißt der Verkehr auf. Weitere erhebliche Anteile entfallen aber auch auf die Emissionen der privaten Haushalte, die energiebedingten und prozessbedingten Industrieemissionen, sowie in geringerem Maße auf die Emissionen des GHD-Sektors und die Landwirtschaft. Die übrigen Sektoren weisen eher geringe Emissionsminderungsbeiträge auf. Insgesamt sind die Anteile der Emissionsminderung im KS 90 also vergleichbar mit denen im KS 80.

Die Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs steigen zwar bis 2030 weiter an, ab dann ist – wie bereits im KS 80 gesehen – eine Trendumkehr zu verzeichnen. Auch können die Emissionen aus LULUCF deutlich gesenkt werden. Bereits 2020 sind die LULUCF-Emissionen wieder quasi null, danach wird LULUCF sogar zu einer Treibhausgassenke.

Abbildung 7-3 Verminderung von Treibhausgasemissionen in den Jahren 2020-2050 gegenüber 1990 im Klimaschutzszenario 90

Quelle: Berechnung von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

7.4 Vergleich der Szenarien

Abbildung 7-4 Zusätzliche Verminderung von Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80-Szenario und im Klimaschutzszenario 90 gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

In Abbildung 7-4 sind die im KS 80 und KS 90 gegenüber dem AMS (2012) zusätzlichen Emissionsminderungen dargestellt. Der größte Anteil an zusätzlichen Emissionsreduktionen gegenüber dem AMS (2012) kommt aus den Energiesektoren. Weitere bedeutende zusätzliche Reduktionen treten bei den Verkehrsemissionen, sowie den energie- und prozessbedingte Industrieemission auf. Aber auch die anderen Sektoren tragen jeweils zu Emissionsminderungen bei und helfen so, die Emissionsreduktionsziele von 80 % (KS 80) bzw. 90 % (KS 90) gegenüber dem Jahr 1990 zu erreichen.

Tabelle 7-7 Vergleich der Emissionsminderungen der drei Sektoren im Jahr 2050 gegenüber 1990 und Vergleich der Erreichung der Ziele von 80 % (KS 80) bzw. 90 % (KS 90) Emissionsminderungen

Sektor	1990	2050			Änderung ggü. 1990		
		AMS (2012)	KS 80	KS 90	AMS (2012)	KS 80	KS 90
	Mio. t CO2-Äq.				%		
Energiewirtschaft	428,1	175,1	61,2	4,9	-59%	-86%	-99%
Industrie	177,3	92,7	34,2	27,0	-48%	-81%	-85%
GHD	88,7	15,8	8,2	4,0	-82%	-91%	-95%
Haushalte	131,5	37,8	17,5	14,8	-71%	-87%	-89%
Verkehr (national)	164,7	89,0	24,7	24,0	-46%	-85%	-85%
Flüchtige Emissionen im Energiesektor	30,5	5,0	2,5	2,1	-84%	-92%	-93%
Industrieprozesse	94,5	56,8	7,0	3,5	-40%	-93%	-96%
Produktverwendung	4,5	2,1	2,1	2,1	-53%	-53%	-53%
Landwirtschaft	83,2	67,7	62,8	38,4	-19%	-25%	-54%
Abfallwirtschaft	43,1	5,1	4,2	3,9	-88%	-90%	-91%
Gesamt ohne int. Verkehr & LULUCF	**1.246,1**	**547,2**	**224,6**	**124,8**	**-56%**	**-82%**	**-90%**
Internationaler ziviler Luft- & Seeverkehr	20,1	50,3	20,7	20,5	150%	3%	2%
LULUCF	-27,7	22,4	8,7	-14,9	*keine sinnvolle Angabe möglich*		
Gesamt mit int. Verkehr & LULUCF	**1.238,6**	**619,8**	**254,0**	**130,4**	**-50%**	**-79%**	**-89%**

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 7-7 zeigt die Emissionsminderungsbeiträge der einzelnen Sektoren und Sektorbestandteile im Jahr 2050 gegenüber 1990. Obwohl es im Energie- und Klimakonzept der Bundesregierung keine Treibhausgasemissionsziele für einzelne Sektoren gibt, wurde in der Tabelle für die einzelnen Sektoren ein Über- bzw. Unterschreiten der Emissionsminderungsziele von 80 % (KS 80) bzw. 90 % (KS 90) farblich grün bzw. rot hervorgehoben. Dadurch werden diejenigen Sektoren erkenntlich, die einen überproportionalen Beitrag zur Emissionsreduktion liefern.

Die Emissionsminderungsbeiträge der einzelnen Sektoren sind im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) sehr unterschiedlich und reichen von einer Emissionsminderung von lediglich etwa 19 % in der Landwirtschaft bis hin zu etwa 88 % in der Abfallwirtschaft. Die Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs verzweieinhalbfachen sich sogar. Insgesamt ergibt sich eine Halbierung der Emissionen gegenüber 1990.

Im Klimaschutzszenario 80 erreichen alle Sektoren außer der Landwirtschaft und der Produktverwendung eine sektorale Treibhausgasminderung von über 80 %. Da einige Sektoren deutlich höhere Emissionsminderungen aufweisen, können die fehlenden Emissionsminderungen der Landwirtschaft und der Produktverwendung kompensiert werden, sodass über alle Sektoren in der engen Abgrenzung, d.h. ohne Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs sowie LULUCF eine Emissionsminderung von 82 % erreicht werden kann.

Im Klimaschutzszenario 90 hingegen erreichen neben der Landwirtschaft und der Produktverwendung auch die Industrie, die privaten Haushalte das gesteckte Ziel von 90 % Treibhausgasminderung nicht. Aber wie auch im Klimaschutzszenario 80 kann das Gesamtziel von 90 % Emissionsminderung durch eine deutliche Zielübererfüllung in einigen Sektoren erreicht werden.

In der weiten Abgrenzung, also inklusive internationalem Luft- und Seeverkehr sowie LULUCF, liegen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) die Emissionsminderungen deutlich geringer als in der engen Abgrenzung. Im Klimaschutzszenario 80 und 90 hingen werden die Emissionsminderungsziele nur knapp verfehlt, die Abweichung vom Ziel beträgt jeweils einen halben Prozentpunkt.

Abbildung 7-5 Anteile der einzelnen Sektoren an den gesamten Treibhausgasemissionen im Jahr 1990 bzw. im Jahr 2050 für die drei Szenarien

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Da die einzelnen Sektoren deutlich unterschiedliche Emissionsminderungsbeiträge aufweisen, verschiebt sich die Bedeutung der einzelnen Sektoren in Bezug auf die gesamten Treibhausgasemissionen. Abbildung 7-5 zeigt die Aufteilung der Emissionen in der engen Abgrenzung, also ohne internationalen Luft- und Seeverkehr und ohne LULUCF. Während im Jahr 1990 noch etwa 82 % der Emissionen auf die Energienutzung zurückzuführen ist[87], sinkt dieser Anteil im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bis 2050 auf 76 %. Die deutlich stärkere Senkung des Verbrauchs an fossilen Energie-

[87] Summierter Anteil für Energiesektor, energiebedingte Industrieemissionen, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Verkehr, Verkehr, flüchtige Emissionen im Energiesektor

trägern sorgt dafür, dass der Anteil im Klimaschutzszenario 80 auf 66 % und im Klimaschutzszenario 90 sogar auf unter 62 % sinkt. Während der summierte Anteil von Industrieprozessen und Produktverwendung von knapp 8 % im Jahr 1990 auf knapp 11 % für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) im Jahr 2050 steigt, sinkt er auf 4 % im Klimaschutzszenario 80 und auf 5 % im Klimaschutzszenario 90. Da die Landwirtschaft deutlich niedrigere Emissionsreduktionen als alle anderen Sektoren aufweist, steigt der relative Anteil der Landwirtschaft an den gesamten Emissionen deutlich: War die Landwirtschaft im Jahr 1990 noch für knapp 7 % aller Emissionen verantwortlich, so steigt ihr Anteil bis zum Jahr 2050 trotz nennenswerter Emissionsreduktionen auf gut 12 % im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 28 % im Klimaschutzszenario 80 und sogar knapp 31 % im Klimaschutzszenario 90. Der Anteil der Abfallwirtschaft liegt 2050 mit Anteilen von 0,9 % (AMS (2012)) bzw. 1,9 % (KS 80) bzw. 3,1 % (KS 90) niedriger als 1990.

Abbildung 7-6 Anteile der einzelnen Gase an den gesamten Treibhausgasemissionen im Jahr 1990 bzw. im Jahr 2050 für die drei Szenarien

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Verbunden mit der steigenden Bedeutung des deutlich steigenden relativen Anteils der Landwirtschaft, aber auch einer niedrigeren Senkung der CH_4- und N_2O-Emissionen als der CO_2-Emissionen in einigen anderen Sektoren, ist eine Verschiebung in der Be-

deutung der einzelnen Treibhausgase. Während der Anteil von Kohlendioxid (CO_2) an den gesamten Emissionen im Jahr 1990 noch mit knapp 84 % gegenüber knapp 9 % Methan (CH_4), knapp 7 % Lachgas (N_2O) und 1 % technische Gase (HKW, FKW, SF_6) deutlich dominierte, ändert sich die Bedeutung der einzelnen Gase im Klimaschutzszenario 80 und im Klimaschutzszenario 90 des Jahres 2050 deutlich: Nur noch 66 % der Emissionen bestehen aus CO_2, hingegen steigt der Anteil der CH_4-Emissionen auf 12 % und der Anteil der N_2O-Emissionen verdreifacht sich sogar auf 21 %. Eine ähnliche aber noch deutlichere Verschiebung zeigt sich im Klimaschutzszenario 90: CO_2-Emissionen machen nur noch 61 % aus, CH_4-Emissionen hingegen steigen auf einen Anteil von 16 % und N_2O-Emissionen auf 22 %. Der Anteil der technischen Gase ist sowohl im Klimaschutzszenario 80 als auch im Klimaschutzszenario 90 liegt mit einem Anteil von etwa 1 % quasi gleich wie im Jahr 1990. Im Gegensatz zu den Entwicklungen im Klimaschutzszenario 80 und 90 steht das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), bei dem sich mit 82 % CO_2, 6 % CH_4, 10 % N_2O und 1,7 % technische Gase die Zusammensetzung der gesamten Emissionen kaum ändert.

Tabelle 7-8 Vergleich der Dynamik der Emissionsminderungen

Intervall	1990/2000	2000/2010	2010/2020	2020/2030	2030/2040	2040/2050
	Mittlere Emissionsminderung in % pro Jahr					
AMS (2012)	-1,8%	-1,0%	-1,5%	-1,6%	-1,2%	-1,0%
KS 80	-1,8%	-1,0%	-2,9%	-3,3%	-3,6%	-4,2%
KS 90	-1,8%	-1,0%	-3,3%	-3,9%	-5,3%	-7,1%

Quelle: Eigene Darstellung

Die Dynamik der Emissionsminderung in den drei Szenarien ist deutlich unterschiedlich, wie Tabelle 7-8 zeigt. Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) liegt die jährliche Emissionsminderung durchgehend zwischen 1 und 2 % pro Jahr und damit im Bereich der historischen Emissionsminderungen. Im Klimaschutzszenario 80 verstärken sich die Emissionsminderungen und liegen zunächst bei knapp unter 3 % pro Jahr bis und steigen auf über 4 % pro Jahr bis 2050. Im Klimaschutzszenario 90 schließlich liegen die jährlichen Emissionsminderungen zunächst nur geringfügig oberhalb den Emissionsminderungen des Klimaschutzszenario 80s, vergrößern sich aber bis 2050 deutlich auf über 7 % pro Jahr. Bemerkenswert ist, dass von allen drei Szenarien im Klimaschutzszenario 90 zwischen 2040 und 2050 die größten jährlichen Emissionsminderungen erzielt werden können, obwohl im KS 90 die absoluten Emissionen bereits sehr deutlich reduziert wurden, es also gegenüber den anderen beiden Szenarien nur noch ein geringes Potential zur weiteren Emissionsreduktion gibt.

8 Analyse gesamtwirtschaftlicher Effekte

Generell sind folgende Effekte im Rahmen des Projektes „Klimaschutzszenarien 2050“ von besonderem Interesse und werden mit Hilfe des ASTRA-D Models analysiert:

BIP-Effekte, Produktionsveränderungen, Beschäftigungsveränderungen, Konsum (auch sektoral), Investitionen. Energieausgaben, Interaktion von Angebot und Nachfrage, Strukturwandel, internationaler Handel,.

Als Input für die gesamtwirtschaftliche Analyse wurden ökonomische Veränderungen innerhalb der sektoralen Modelle (Industrie, Gebäude, Verkehr, etc.) abgeschätzt. Solche Veränderungen werden als **Impulse** aus den sektoralen Maßnahmen und technologischen Anpassungen bezeichnet. Diese Impulse werden auf gesamtwirtschaftlich relevante Größen überführt, d.h. Investitionen, Konsumänderungen, Veränderungen der Staatseinnahmen oder der Importe. Die Impulse werden an die sektorale Wirtschaftszweigklassifikation mit 57 Sektoren (WZ 2003) angekoppelt und – wo nötig – auch auf Vorleistungssektoren innerhalb der Input-Output-Tabelle aufgeteilt. Insgesamt wurde angestrebt, eine geschlossene Maßnahmenabbildung im verwendeten ASTRA-D Modell zu implementieren. Dies bedeutet, dass eine Gegenfinanzierung zusätzlicher Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen gewährleistet sein soll, sei es durch Einsparungen in den Energieausgaben, durch staatliche Fördermaßnahmen oder durch Weitergabe in den Produktpreisen. Bei einigen wenigen Konsumveränderungen wurden Präferenzverschiebungen angenommen z.B. geringerer Fleischkonsum. Zentrale Impulse sind:

- Investitionsimpuls (zwischen 21 und 62 Milliarden Euro jährlich gegenüber dem AMS).
- Strompreisimpuls (leicht steigende Großhandelspreise in KS 80, sinkende Großhandelspreise in KS 90).
- Energieausgaben (Preis * Menge für Strom, Wärme, Verkehr), teils moderat steigend, meist stark sinkend (sektoral bis zu 45 % sinkend gegenüber AMS).
- Importänderungen (verringerte Energieimporte, erhöhte Biomasseimporte und Importe von Vorleistungen für Investitionsgüter).
- Staatliche Förderausgaben (F&E, direkte Zuschüsse, Kreditverbilligungen).

Diese Impulse ziehen Veränderungen im Investitions- und Konsumverhalten, der Handelsbilanz sowie bei den energiebezogenen und staatlichen Ausgaben nach sich. Die Impulse auf gesamtwirtschaftliche Stromgrößen (welche sich auf Veränderungen innerhalb eines festgelegten Zeitraums beziehen, wie z.B. Investitionen) induzieren Veränderungen der Bestandsgrößen (welche durch die Stromgrößen verändert werden, wie z.B. der Kapitalstock oder die Gesamtfaktorproduktivität) und verändern so die langfristigen Pfade der ökonomischen Größen. Somit sind nicht nur die primären Veränderungen der Impulse (direkte Effekte) erfasst, sondern auch noch die daraus resultierenden Zweitrundeneffekte (indirekte Effekte) berücksichtigt worden. Die daraus bis

2050 resultierenden gesamtwirtschaftlichen Effekte sind in Tabelle 8-1 qualitativ zusammengefasst.

Die Investitionen für energetische Maßnahmen im Gebäudesektor im Rahmen von Sanierungen, Heizsystemwechseln und Installation von Solaranlagen betragen im Mittel jährlich 23 Milliarden Euro im Defizitszenario und 40 bis 45 Milliarden Euro im KS90 Szenario. Ausschlaggebend für energetische Sanierungen ist der verfügbare und günstigste technische Standard. Gerade einmal 35% der Sanierungen gehen im gesamten Simulationszeitraum über die Minimalanforderungen hinaus. Unter ihnen befinden sich auch besonders ambitionierte Lösungen die insgesamt etwa 10 Prozent der Sanierungen ausmachen.

Tabelle 8-1 Übersicht der gesamtwirtschaftlichen Effekte

	KS 80 gegen AMS (2012)	KS 90 gegen AMS (2012)
Investition	↗	↑
Strompreis	↗	↘
Energieausgaben	→	→
Bruttoinlandsprodukt	↗	↗
Beschäftigung	→	→

Die Implementierung der Klimaschutzmaßnahmen bewirkt ein stärkeres Wachstum des Bruttoinlandproduktes im Zeitverlauf, als im AMS (2012) angenommen wurde. Dieses liegt nach 2030 im KS 90 sogar höher als im KS 80. Allerdings kommt das zusätzliche Wachstum auf unterschiedlichen Wegen zustande: die sektorale Entwicklung unterscheidet sich zwischen KS 80 sowie KS 90 deutlich, insbesondere durch die unterschiedliche Entwicklung des Strompreises. Der Großhandelspreis steigt im KS 80 bis zum Jahre 2050 und dämpft damit strom- und energieintensivere Sektoren, während er im KS 90 nach 2030 sinkt. Dies hat Auswirkungen auf die Beschäftigung, welche von der sektoralen Wertschöpfungsentwicklung sowie der Produktivitätsentwicklung abhängt. Damit ist die Gesamtbeschäftigung in KS 90 durchweg positiver als im AMS (2012), während dies für das KS 80 nicht uneingeschränkt gilt und in 2050 eine leichte Verringerung der Beschäftigung gegenüber dem AMS (2012) festgestellt wird. Eine Harmonisierung des Endkunden-Strompreises mit den Input-Parametern der Bottom-up Modellierung wird in der zweiten Runde erfolgen, in der die im Projekt berechneten Großhandelspreise verwendet werden.

Weitere wichtige Gründe für die unterschiedlichen Entwicklungen in den beiden Klimaschutzszenarien sind zum einen die zusätzlich benötigten Investitionen im KS 90, die kumuliert um 50,7% höher als im KS 80 sind und damit größere Akzelerator- und Multiplikatoreffekte entfalten. Außerdem haben sie einen positiveren Einfluss auf den Pro-

duktivitätsfortschritt. Zum anderen sind die Einsparungen bei den Energieausgaben höher und ermöglichen damit zusätzlichen Konsum in anderen Sektoren. Hinzu kommt noch der unterschiedliche Verlauf der Strompreise in den drei Szenarien, welcher einen Effekt auf die Preisweitergabe über Vorleistungen an die belieferten Sektoren sowie auf die Preise von Endprodukten an die Verbraucher hat.

Auf den Staatshaushalt haben die Veränderungen zum Teil gegenläufige Wirkungen: durch den höheren Konsum werden höhere indirekte Steuereinnahmen generiert, während die Fördermaßnahmen die Staatsausgaben erhöhen. Die ambitionierteren Maßnahmen im KS 90 werden punktuell erheblich teurer als in KS 80. Außenhandelswirkungen sind insofern betrachtet, als die Differenzimporte für Energieträger (z.B. entwickelt Deutschland sich vom Stromex- zum –importeur) und die Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen erfasst sind (ein Teil der notwendigen Investitionen wird aus dem Ausland importiert). Der Einfluss der Energieausgaben auf die Ex- und Importgüter und etwaige Lead-Market-Effekte wurden nicht weiter berücksichtigt. In Sensitivitätsrechnung wurden die beiden wichtigsten Impulse, Investitionen und Konsumverschiebung, untersucht. Fällt einer der beiden Impulse aus, bleiben die Szenarien immer noch positiv. Allerdings wirkte sich die Veränderung im Konsum gesamtwirtschaftlich stärker positiv aus als der Investitionsimpuls.

Die bisherigen Ergebnisse der ökonomischen Analyse zeigen, dass die beschriebene Strategie aus Effizienzpolitik plus erneuerbarem Strom (nahe 100%) plus Produktinnovation eine no-regret Strategie darstellt, die sich für Deutschland langfristig auszahlen würde.

9 Vergleich der Szenarienergebnisse mit den Zielen des Energie- und Klimaschutzkonzepts der Bundesregierung

In Bezug auf die Erreichung der Ziele des Energie- und Klimaschutzkonzepts der Bundesregierung gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien, wie Tabelle 9-1 zeigt.

Tabelle 9-1 Vergleich der Szenarienergebnisse mit den Zielen des Energie- und Klimaschutzkonzepts der Bundesregierung

Zieldefinitionen

	Treibhausgas-emissionen	Erneuerbare Energien		Minderung Energiebedarf					Steigerung Energie-produktivität
		Brutto-Endenergie	Strom-erzeugung	Primär-energie	Gebäude-Wärme	Endenergie Verkehr	Strom-verbrauch	Strom-verbrauch	
2020	-40%	18%	35%	-20%	-20%	-10%	-10%	-10%	2,1% p.a.
2030	-55%	30%	50%						
2040	-70%	45%	65%						
2050	-80% -[bis -95%]	60%	80%	-50%	-80%	-40%	-25%	-25%	
Basis	1990			2008	2008	2005	2008	2008	2008

Ergebnisse Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

	Treibhausgas-emissionen	Erneuerbare Energien		Minderung Energiebedarf					Steigerung Energie-produktivität
		Brutto-Endenergie	Strom-erzeugung	Primär-energie	Gebäude-Wärme	Endenergie Verkehr	Strom-verbrauch (klassisch)*	Strom-verbrauch (gesamt)	
2020	-35%	18%	37%	-10%	-12%	-9%	-2%	-2%	1,2% p.a.
2030	-45%	22%	54%						1,4% p.a.
2040	-52%	26%	61%						1,4% p.a.
2050	-56%	28%	65%	-29%	-43%	-29%	-9%	0%	1,4% p.a.
Basis	1990			2008	2008	2005	2008	2008	2008

* Enthält nicht Stromverbrauch von Wärmepumpen, Elektro-Straßenfahrzeuge, Luftzerlegung, Elektrolyse, Power-to-Gas H2 für Industrie

Ergebnisse Klimaschutzszenario 80

	Treibhausgas-emissionen	Erneuerbare Energien		Minderung Energiebedarf					Steigerung Energie-produktivität
		Brutto-Endenergie	Strom-erzeugung	Primär-energie	Gebäude-Wärme	Endenergie Verkehr	Strom-verbrauch (klassisch)*	Strom-verbrauch (gesamt)	
2020	-44%	20%	41%	-20%	-20%	-15%	-12%	-11%	1,7%
2030	-60%	27%	58%						2,1%
2040	-72%	44%	67%						2,1%
2050	-82%	63%	74%	-49%	-58%	-55%	-29%	-5%	2,0%
Basis	1990			2008	2008	2005	2008	2008	2008

* Enthält nicht Stromverbrauch von Wärmepumpen, Elektro-Straßenfahrzeuge, Luftzerlegung, Elektrolyse, Power-to-Gas H2 für Industrie

Ergebnisse Klimaschutzszenario 90

	Treibhausgas-emissionen	Erneuerbare Energien		Minderung Energiebedarf					Steigerung Energie-produktivität
		Brutto-Endenergie	Strom-erzeugung	Primär-energie	Gebäude-Wärme	Endenergie Verkehr	Strom-verbrauch (klassisch)*	Strom-verbrauch (gesamt)	
2020	-46%	19%	43%	-23%	-22%	-16%	-17%	-15%	2,3% p.a.
2030	-64%	28%	64%						2,3% p.a.
2040	-79%	47%	76%						2,2% p.a.
2050	-90%	76%	83%	-54%	-63%	-57%	-34%	-1%	2,3% p.a.
Basis	1990			2008	2008	2005	2008	2008	2008

* Enthält nicht Stromverbrauch von Wärmepumpen, Elektro-Straßenfahrzeuge, Luftzerlegung, Elektrolyse, Power-to-Gas H2 für Industrie

Quelle: Eigene Darstellung

9.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), das die Entwicklung der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen auf Basis der derzeit existierenden Politiken und Maßnahmen zeigt, werden die meisten Ziele des Energiekonzepts deutlich verfehlt. Ledig-

lich die Ziele für den regenerativen Anteil der Stromerzeugung bzw. am Bruttoendenergieverbrauch können zunächst erfüllt werden: Da der stärkste Ausbau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen bis 2030 stattfindet und danach deutlich abflacht, gleichzeitig aber der Stromverbrauch kontinuierlich bis 2050 ansteigt, können auch die Ziele für die regenerative Stromerzeugung nur bis 2030, danach aber nicht mehr erreicht werden. Dadurch, dass selbst im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) mehr regenerativer Strom erzeugt wird, als es nach dem Energiekonzept erforderlich wäre, kann sogar das Ziel von 18 % regenerativer Anteil am Bruttoendenergieverbrauch erreicht werden. Da sich aber nicht nur der der Ausbau von Wind und Photovoltaik sondern aller erneuerbaren Energien danach deutlich abflacht, kann der weitere Zielpfad nicht erreicht werden.

9.2 Klimaschutzszenario 80

Im Klimaschutzszenario 80 werden bis 2020 alle Ziele mit Ausnahme des Ziels zur Steigerung der Energieproduktivität erreicht. Dass die Energieproduktivität von 2008 bis 2020 nur um 1,7 % p.a. statt wie vom Energiekonzept vorgegeben nicht erreicht wurde, liegt an den Nachwirkungen der Wirtschaftskrise, denn von 2008 bis 2010 sank die Energieproduktivität um 0,7 % p.a. Betrachtet man nur den Zeitraum von 2010 bis 2020, so steigt die Energieproduktivität um 2,2 % p.a., womit das Ziel des Energiekonzepts erreicht würde.

Bei der Interpretation der langfristigen Ziele bezüglich der erneuerbaren Anteile von Bruttoendenergiebedarf und Stromerzeugung ist zu beachten, dass ab 2030 relevante Mengen an regenerativem Strom importiert werden (Tabelle 9-2). Die erneuerbaren Anteile der Stromimporte wurden nicht zur Ermittlung der Zielerreichung bezüglich der Anteile erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch bzw. an der Stromerzeugung berücksichtig. Die in der Tabelle 9-1 aufgeführten Zahlen bezüglich der erneuerbaren Anteile stellen also eine konservative Interpretation des Ziels dar. Da die erneuerbaren Anteile des Stromimports durchweg höher liegen als die der erneuerbare Anteile der inländischen Stromerzeugung, würde eine Berücksichtigung des Importstroms in allen drei Szenarien zu höheren erneuerbaren Anteilen im Sinne der Zielerreichung führen.

Tabelle 9-2 Gesamte und erneuerbare Stromimporte in den Jahren 2020–2050

	2020	2030	2040	2050
	TWh			
Gesamte Stromimporte				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)	0	3	13	23
Klimaschutzszenario 80	0	25	51	76
Klimaschutzszenario 90	0	23	48	74
Stromimporte aus erneuerbaren Energien				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)	0	2	9	12
Klimaschutzszenario 80	0	19	45	71
Klimaschutzszenario 90	0	19	44	70
Erneuerbarer Anteil der Stromimporte				
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)	–	49%	69%	52%
Klimaschutzszenario 80	–	75%	88%	94%
Klimaschutzszenario 90	–	83%	91%	95%

Quelle: Eigene Darstellung

Die Energieeinsparziele für den Verkehr und den Stromverbrauch (ohne Berücksichtigung neuer Stromverbraucher) werden für das Jahr 2050 deutlich erreicht. Unter Berücksichtigung auch neuer Stromverbraucher, wie beispielsweise Elektro-PKW, Wärmepumpen und Wasserstoffherstellung für die Industrie, kann das Stromsparziel nicht erreicht werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass diese neuen Stromverbräuche weniger effiziente fossile Energienutzungen verdrängen.

Da bezüglich des Ziels zur Einsparung von Gebäudewärme erheblicher Interpretationsbedarf besteht, sei an dieser Stelle auf das Kapitel 5.1.6 *Zielerreichung Wärme in Gebäuden* verwiesen.

Insgesamt führen die Maßnahmen im KS 80 zu einer Primärenergieeinsparung von 49 % in 2050 gegenüber 2008, das heißt, dieses Ziel des Energiekonzepts wird nur sehr knapp verfehlt.

Die Summe aller Maßnahmen führt dazu, dass im Klimaschutzszenario 80 in allen Jahren der vorgegebene Zielpfad bezüglich der Treibhausgase erreicht werden kann. Die deutliche Übererfüllung des Treibhausgasziels für das Jahr 2020 (−44 % statt −40 %) lässt sich vor allem aus dem Stromsektor erklären: Während in den Energieszenarien zum Energiekonzept (Prognos, EWI, GWS 2010) für das Jahr 2020 von einem Stromexport von 22,4 TWh ausgegangen wird,[88] liegt der Stromexport im Klimaschutzszenario 80 bei null. Des Weiteren liegt dem KS 80 mit 41 % ein deutlich höherer Anteil regenerativer Energien zugrunde, als es das Ziel der Bundesregierung von 35 % vorgibt. Außerdem ist die Stromeinsparung der Endverbrauchssektoren mit 12 % (klassische Verbraucher) bzw. 11 % (alle Verbraucher höher als das Ziel von 10 %. Da der Ausbau der regenerativen Energien im Stromsektor durch das Szenario A der Leitstudie 2011 (DLR, IWES, IfnE 2012) vorgegeben ist, führen diese drei Effekte dazu, das insgesamt

[88] Dies entspricht dem Stromexport des Jahres 2008, welches das Basisjahr der Energieszenarien ist (Prognos, EWI, GWS 2010).

etwa zusätzliche 60 TWh fossile Stromerzeugung verdrängt werden. Diese Verdrängung fossil erzeugten Stroms entspricht einer zusätzlichen Emissionsminderung von über 50 Mio. t CO_2-Äq bzw. etwa zusätzlichen 4 Prozentpunkten Emissionsminderung gegenüber 1990, wie die Abschätzung in Tabelle 9-3 zeigt.[89]

Tabelle 9-3 Abschätzung zusätzlicher Emissionsminderungen im Stromsektor für das Jahr 2020 des KS 80 gegenüber dem Energiekonzept

Effekt	Energie	Emissionsänderung	Kyoto-Prozente
	TWh	Mio. t CO2-Äq	
Vermiedene Stromexporte	22,4	19,6	1,6%
Zusätzliche Erneuerbare Stromerzeugung	29,4	25,7	2,1%
Reduktion Stromverbrauch	9,8	8,5	0,7%
Summe	**61,5**	**53,9**	**4,3%**

Quelle: Eigene Darstellung

9.3 Klimaschutzszenario 90

Im Klimaschutzszenario 90 können die fast alle Ziele des Energiekonzepts erreicht werden. Teilweise werden die Ziele auch deutlich überfüllt, wie beispielsweise für 2050 ein erneuerbarer Anteil am Bruttoendenergieverbrauch von 76 % statt den vorgegebenen 60 % oder eine Minderung des Endenergieverbrauchs im Verkehr von 57 % statt 40 %. Nicht erreicht werden die Ziele für den EE-Anteil am BEV für das Jahr 2020 sowie für die Minderung des Energiebedarfs für Gebäudewärme und des gesamten Stromverbrauchs im Jahr 2050. Es gilt das im vorhergehenden Kapitel 9.2 beschriebene entsprechend.

Einerseits werden die Ziele bezüglich erneuerbaren Anteilen an der Stromerzeugung und am Bruttoendenergieverbrauch und Energieverbrauchssenkung sowie der Steigerung der Energieproduktivität teilweise deutlich überschritten. Andererseits werden in den nicht-energiebezogenen Sektoren auch deutlich Emissionsminderungsmaßnahmen durchgeführt werden. Daher kann im Klimaschutzszenario 90 das Klimaschutzszenario 80 deutlich übertroffen werden. Das 80-%-Einsparziel des KS 80 für 2050 wird im KS 90 beinahe schon 2040 erreicht, daher können bis 2050 die Emissionen sogar um 90 % reduziert werden, womit das Ziel des Klimaschutzszenario 90s genau erfüllt werden kann. Auch unter Berücksichtigung der Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs sowie LULUCF sinken die Emissionen im Klimaschutzszenario 90 um etwa 90 % gegenüber dem Jahr 1990.

[89] Es handelt sich hier um eine möglichst einfache Abschätzung einzelner Effekte. Die Einzeleffekte sind in der Tabelle einfach aufsummiert. Bei einer kompletten und detaillierten Modellierung können sich die Einzeleffekte gegenseitig verstärken oder auch abschwächen. Der in dieser Abschätzung verwendete Emissionsfaktor von 0,876 kg CO_2-Äq/kWh_{el} für verdrängten fossilen Strom entspricht dem im KS 80 für 2020, bestehend aus etwa 45 % Braunkohle, 25 % Steinkohle und 30 % Erdgas.

10 Fazit: Wie können die Energiekonzept-Ziele erreicht werden?

Im vorigen Kapitel wurde analysiert, inwiefern die angestrebten Ziele in den drei untersuchten Szenarien erreicht werden können. In diesem Kapitel wird zusammenfassend dargestellt, welche Maßnahmen in den einzelnen Sektoren zum Erreichen dieser Ziele erforderlich sind. In Abbildung 10-1 sowie in den folgenden Abschnitten werden diese Maßnahmen überblickhaft dargestellt; eine detaillierte Diskussion der Maßnahmen ist den Kapiteln 5 und 6 zu entnehmen.

Eine gesamtwirtschaftliche Modellierung der Szenarien wurde zwar vorgenommen, ist aber nicht Bestandteil dieses Berichts.

Abbildung 10-1: Erforderliche Maßnahmen für eine 80- bis 90prozentige Reduktion der Treibhausgasemissionen

Quelle: Eigene Berechnungen

10.1 Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) werden nur diejenigen energie- und klimapolitischen Maßnahmen und Entscheidungen berücksichtig, die bis Oktober 2012 beschlossen bzw. implementiert wurden. Darüber hinaus werden keine Maßnahmen berücksichtigt. Die im Energiekonzept der Bundesregierung verankerten Ziele werden in diesem Szenario klar verfehlt – da es jedoch den Ausgangspunkt für die anderen bei-

den Szenarien bildet, in denen ambitioniertere Ziele verfolgt werden, sind im Folgenden die wesentlichen Entwicklungen in den einzelnen Sektoren kurz dargestellt.

Gebäude

Sowohl im Haushalts- als auch im Dienstleistungssektor sinkt die Endenergienachfrage im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 deutlich ab (um 37% im Haushalts- und 56% im Dienstleistungssektor). Ursachen hierfür sind die im Rahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV) vereinbarten Mindestenergiestandards für Neubauten und Sanierungen und die Förderprogramme der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA).

Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

In diesem Sektor steigt der Stromverbrauch von etwa 128 TWh in 2010 auf etwa 155 TWh in 2050, was einem Zuwachs von gut 20% entspricht. Dieser Anstieg ist vorwiegend durch den vermehrten Einsatz energieintensiver Anwendungen wie Rechenzentren/Servern, IKT, Klimatisierung sowie kältetechnischen Anwendungen in Supermärkten zurückzuführen. Eine wichtige Rolle spielt außerdem die Zunahme der Anzahl der Erwerbstätigen als zentralen Treiber des Energiebedarfs im tertiären Sektor um etwa 7% von 2010 bis 2050.

Die Nachfrage nach anderen Energieträgern geht hingegen leicht zurück, und es findet ein langsamer, aber kontinuierlicher Wechsel hin zu Erneuerbaren Energieträgern statt.

Industrie

Im Industriesektor fällt der Endenergiebedarf leicht ab (um 9% von 2010 bis 2050). Dies ist in erster Linie auf ein nur moderates Wirtschaftswachstum und eine Stagnation der energieintensiven Branchen zurückzuführen.

Die Bedeutung von Kohle, Heizöl, Erdgas und sonstigen Gasen (vorwiegend Gichtgas) nimmt ab, während Erneuerbare Energien und die Nutzung von Abfällen leicht zulegen. Der Stromverbrauch bleibt näherungsweise konstant, nimmt aber anteilig an Bedeutung zu. Diese Verschiebung zwischen den Brennstoffen ist zu einem Großteil durch strukturelle Verschiebungen und ein Wachstum dienstleistungsbasierter Industrien auf Kosten energieintensiver Industriezweige bedingt.

Verkehr

Die Verkehrsnachfrage steigt sowohl im inländischen Personenverkehr (+25%) als auch im Güterverkehr (+29%) deutlich an. Im Personenverkehr sind als wesentliche Ursachen die Zunahme der Wegelängen, ansteigende Motorisierungsraten sowie sinkende Kilometerkosten durch Effizienzsteigerungen im Fahrzeugbereich zu nennen. Der motorisierte Individualverkehr behält seine dominierende Rolle bei.

Im Güterverkehr gibt es - korrespondierend zum Wirtschaftswachstum - besonders auf den grenzüberschreitenden Relationen weiteres Wachstum. Luft- und Seeverkehr verzeichnen starke Wachstumsraten.

Der Energieverbrauch konventioneller Pkw reduziert sich bis zum Jahr 2050 um über 40%. Die übrigen Verkehrsmittel verzeichnen moderate Effizienzsteigerungen in der Größenordnung um 30%. Der Anteil der Elektrofahrzeuge bleibt verhältnisweise gering.

Der Biokraftstoff-Anteil im Straßenverkehr beträgt ab 2020 14% und verharrt bis zum Jahr 2050 auf diesem Niveau.

Strom

Es wird davon ausgegangen, dass die aktuell implementierten Politiken und Maßnahmen fortbestehen:

- Für den Emissionshandel wird von einer vollständigen Auktionierung der Zertifikate ausgegangen. Der CO_2-Zertifikatepreis steigt von 30 €/EUA im Jahr 2030 auf 50 €/EUA im Jahr 2050.
- Es werden die zurzeit gültigen Regelungen für die Ermittlung der Entgelte für vermiedene Netznutzung für dezentrale Erzeugung, für die Förderung neuer KWK-Anlagen (KWKG) sowie für den Kernenergieausstieg berücksichtigt.
- Die Stromnachfrage aus den klassischen Endverbrauchssektoren (ohne Elektromobilität) sinkt leicht (Rückgang um weniger als 10 % zwischen 2010 und 2050).
- Die installierte Leistung aus erneuerbaren Energien entwickelt sich gemäß Leitstudie 2011.
- Bis 2020 ist eine Stromleitung nach Norwegen mit einer Leistung von 1,4 GW installiert. Darüber hinaus findet kein weiterer Ausbau grenzüberschreitender Leitungskapazitäten statt.
- Die Stromnachfrage aus Elektrofahrzeugen mit Lademanagement steigt bis zum Jahr 2050 auf 40 TWh/a an.
- Es findet eine überwiegend inländische Bedarfsdeckung statt. Stromimporte spielen nur eine untergeordnete Rolle.

10.2 Klimaschutzszenario 80

In diesem Szenario wurden eine Reihe von Maßnahmen angenommen, die dazu führen, dass bis zum Jahr 2050 eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 80% erreicht wird und auch die anderen im Energiekonzept festgelegten Ziele nach Möglichkeit eingehalten werden. Diese Maßnahmen gehen deutlich über den durch das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) abgebildeten Status Quo hinaus. Sie werden im Folgenden für die einzelnen Sektoren zusammengefasst:

Gebäudesektor

Im Gebäudesektor wurde die Sanierungsrate deutlich erhöht. Gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) erfolgte eine Verdopplung der energetischen Sanie-

rungsrate des Gebäudebestands auf 2% pro Jahr. Gleichzeitig wurden durch technologischen Fortschritt und Anpassung der Mindestanforderungen die Optionen, die für die Gebäudesanierung zu Verfügung stehen, verbessert.

Zusätzlich wurde angenommen, dass eine Minimalverpflichtung für die Nutzung erneuerbarer Energieträger nicht nur für Neubauten, sondern – im Falle einer Sanierung – auch für Bestandsgebäude wirksam wird.

Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Im diesem Sektor sinkt der Strombedarf bis 2050 um etwa 28% (relativ zu 2010). Dieser drastische Rückgang stellt eine Umkehr des im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) beobachteten Trends dar. Getrieben wird diese Entwicklung durch eine ambitionierte Umsetzung von Effizienzmaßnahmen, die schnelle Verbreitung hocheffizienter Geräte sowie ein verändertes Verhalten beim Nutzen von Energiedienstleistungen.

Es werden ausschließlich Effizienzmaßnahmen durchgeführt, die wirtschaftlich realisierbar sind – allerdings wird davon ausgegangen, dass alle über die reine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hinausgehenden Hemmnisse zügig beseitigt werden. Daher wird ein großer Teil der Effizienzpotenziale bereits in den nächsten beiden Dekaden erschlossen.

Im Bereich der technischen Anwendungen spielen vor allem Einsparpotenziale im Beleuchtungsbereich eine wichtige Rolle. Bis 2030 sind hocheffiziente LED Beleuchtungen und Licht- sowie Bewegungsabhängige Steuerungen weitgehend verbreitet.

Die Verhaltensänderungen bei der Nutzung von Energiedienstleistungen spiegeln sich unter anderem in einem niedrigeren Beleuchtungsbedarf und einer langsameren Verbreitung von elektrischen Anwendungen wider.

Industrie

Im Industriesektor werden Minderungspotenziale erschlossen, die weit über das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) hinausgehen. Sowohl Strombedarf als auch Endenergiebedarf werden signifikant reduziert, und der Anteil CO_2-armer Energieträger steigt deutlich.

Dies setzt eine umfangreiche Reduktion vorhandener Hemmnisse voraus. Insbesondere die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen durch die investierenden Unternehmen ist in Klimaschutzszenario 80 und Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) unterschiedlich: Während im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nur Maßnahmen mit einer Amortisationszeit von unter einem Jahr durchgeführt werden, steigt diese Schwelle im Klimaschutzszenario 80 auf sieben Jahre und länger. Dies führt unter anderem zu einer schnelleren Diffusion von Technologien zur Abwärmenutzung und von Wärmepumpen im Bereich der Niedertemperaturwärme. Auch die Einsparpotenziale bei industriellen Dampferzeugern und Dampfverteilnetzen sowie bei elektrischen Querschnittstechnologien werden umfangreicher und zügiger erschlossen.

Der verstärkte Einsatz CO_2-armer Energieträger wird durch den Preis für Emissionszertifikate angereizt, der im Klimaschutzszenario 80 deutlich höher ist als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012).

Für alle Potenziale gilt jedoch, dass der „natürliche“ Investitionszyklus größtenteils unbeeinflusst bleibt: Ein Austausch von Anlagen vor Ablauf ihrer technischen Lebensdauer findet nur in geringem Maße statt. Unwirtschaftliche Maßnahmen werden nicht umgesetzt.

Für prozessbedingte Emissionen wird ab dem Jahr 2030 schrittweise die Abscheidung und Sequestrierung von CO_2 (CCS) eingeführt. Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2050 die Emissionen in den betroffenen Sektoren vollständig abgeschieden werden. Dabei bleibt CCS auf die Sektoren beschränkt, in denen CO_2 in besonders hohen Konzentration anfällt Dies gilt insbesondere für Hochofenprozess, Prozesse in der Zementindustrie sowie die Synthese von Wasserstoff.

Verkehr

Im Klimaschutzszenario 80 ist eine Reihe von Maßnahmen hinterlegt.

Die Lkw-Maut wird ab 2015 auf alle Lkw mit einer Nutzlast von mehr als 3,5t erweitert und bis zum Jahr 2050 schrittweise auf 0,5€/km angehoben. Die Kraftstoffsteuern werden deutlich erhöht. Der Endkundenpreis je Liter Benzin steigt dadurch bis zum Jahr 2050 auf 2,65 $€_{2010}$ und damit deutlich stärker als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012). Im Personenverkehr wird von einer umfassenden Änderung des Mobilitätsverhaltens jüngerer Generationen ausgegangen. Dies verschiebt die Verkehrsmittelwahl zu Gunsten des öffentlichen und des nicht-motorisierten Verkehrs. Die Wegelängen bleiben hierbei – verglichen mit dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) – konstant.

Die Förderung des schienengebundenen Verkehrs führt vor allem im Güterverkehr zu einer deutlichen Verlagerung: Die Verkehrsleistung auf der Schiene liegt in 2050 bei 206 Mrd. tkm - der Anteil der Schiene am Modal Split erhöht sich somit von 17% (2010) auf 25% (2050).

Elektromobilität spielt im Personenverkehr eine dominierende Rolle. Dabei erreichen Plug-In-Hybride einen größeren Anteil als reine Elektrofahrzeuge. Verbesserte Batterietechnologien und höhere Reichweiten führen bei Plug-In-Hybridfahrzeugen jedoch zu einem steigenden elektrischen Fahranteil (2050: 80%). Bis zum Jahr 2050 vergrößert sich die vollständig oder teilweise elektrisch angetriebene PKW-Flotte auf 31 Mio. Fahrzeuge. Im Vergleich zum Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) gibt es deutlich stärkere Effizienzsteigerungen bei LKWs (-40% statt -30%) und im Luftverkehr (-1,5% p.a. statt -1% p.a.). Der Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehr steigt deutlich an und erreicht im Jahr 2050 insgesamt rund 700 PJ.

Strom

Im Klimaschutzszenario 80 werden grundsätzlich die Politiken und Maßnahmen des Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)s übernommen, jedoch an einigen Stellen verschärft, um die Ziele des Energiekonzepts zu erreichen:

Im Rahmen einer ambitionierten Klimapolitik steigt der CO_2-Preis deutlich an. Die Preise für Emissionszertifikate erreichen Werte von 50 €/EUA im Jahr 2030 bzw. 130 €/EUA im Jahr 2050.

Die Stromnachfrage in den klassischen Endverbrauchssektoren sinkt stark (Rückgang um mehr als 20 % zwischen 2010 und 2050). Davon ausgenommen ist der Verkehrssektor – hier ist auf Grund der zunehmenden Bedeutung der Elektromobilität von einer gegenteiligen Entwicklung auszugehen.

Der Ausbau der Kapazitäten für erneuerbare Stromerzeugung entwickelt sich gemäß der Leitstudie 2011. Um die Flexibilität des Gesamtsystems zu verbessern und die Integration des wachsenden Anteils erneuerbarer Stromerzeugung zu gewährleisten, wird eine Reihe von Maßnahmen durchgeführt:

- Für KWK-Anlagen wird bis zum Jahr 2030 eine weitgehende Einführung von Wärmespeichern zur Flexibilisierung angenommen.
- Die Pumpspeicherkapazität wird deutlich ausgebaut und erreicht bis zum Jahr 2050 einen Wert von 11 GW.
- Um Speicherkapazitäten in Skandinavien zu erschließen, wird die Übertragungskapazität zwischen Deutschland und Norwegen bis zum Jahr 2050 schrittweise um 1,4 GW pro Dekade erhöht.
- Die flexible Stromnachfrage aus Elektrofahrzeugen mit Lademanagement steigt deutlich auf bis zu 70 TWh im Jahr 2050.
- Langfristig erfolgt ein Einstieg in die „Power-to-Gas“-Strategie zur Nutzung von Dargebotsspitzen.

Die Bedeutung der Netto-Stromimporte nimmt zu: Es werden 2030 bis zu 5%, 2040 bis zu 10% und 2050 bis zu 15% des deutschen Strombedarfs durch Importe gedeckt.

10.3 Klimaschutzszenario 90

Im Klimaschutzszenario 90 werden die höchsten klima- und energiepolitischen Anforderungen gestellt: Wie im Klimaschutzszenario 80 sind alle im Energiekonzept formulierten Ziele zu erfüllen. Darüber hinaus wird eine über das Klimaschutzszenario 80 hinausgehende Minimierung der Treibhausgasemissionen gefordert (bis zum Jahr 2050 um 90% gegenüber 1990). Gegenüber dem Klimaschutzszenario 80 entspricht dies im Jahr 2050 einer Halbierung der noch vorhandenen Emissionen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine Reihe von zusätzlichen Maßnahmen erforderlich, die im Folgenden zusammengefasst werden.

Gebäude

Zur weiteren Reduktion der Emissionen wurde die Sanierungsrate für Bestandsgebäude auf 3% pro Jahr erhöht und liegt damit um den Faktor drei höher als im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012). Darüber hinaus wird eine Verhaltensänderung in Bezug auf die Nutzung von Heizwärme angenommen, die sich in einer Absenkung der Innentemperatur von Gebäuden um 1°C widerspiegelt. Die zusätzlichen Minderungspotenzi-

ale, die durch diese Maßnahmen gegenüber dem Klimaschutzszenario 80 erschlossen werden können, sind jedoch begrenzt.

Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Auch im GHD-Sektor sind gegenüber dem Klimaschutzszenario 80 nur noch wenige Minderungspotenziale erschließbar. Bezüglich der Stromnachfrage sind, auch bei reduzierten Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen, kaum Reduktionen über die bereits im Klimaschutzszenario 80 sehr ambitionierten Einsparungen hinaus zu erreichen.

Lediglich beim Brennstoffbedarf zeigt sich ein anderes Bild als im Klimaschutzszenario 80. Hier ist bis 2050 der Großteil auf Erneuerbare Energien umgestellt.

Industrie

Im Klimaschutzszenario 90 werden sowohl Strombedarf als auch Brennstoffbedarf bis zum Jahr 2050 drastisch reduziert. Um dies zu ermöglichen, ist eine konsequente Umsetzung von Effizienzmaßnahmen erforderlich, die weit über das heutige Niveau hinausgehen. Es wird davon ausgegangen, dass 50% der Unternehmen bereit sind, auch Effizienzmaßnahmen mit Amortisationszeiten von über 11 Jahren umzusetzen.

Der Endenergiebedarf im Industriesektor sinkt im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 um 34%. Im Jahr 2050 sind Strom, Erdgas, Fernwärme und erneuerbare Energien die zentralen Energieträger.

Der Strombedarf kann gegenüber dem Klimaschutzszenario 80 nur leicht reduziert werden. Für den Bedarf anderer Energieträger zeigt sich ein anderes Bild. Gerade im Bereich der Niedertemperaturwärme und der nicht am Emissionshandel teilnehmenden Industrien können hier Potenziale erschlossen werden, die deutlich über die im Klimaschutzszenario 80 realisierten Einsparungen hinausgehen:

- Im Bereich der Abwärmenutzung (inkl. Wärmepumpen) werden auch Maßnahmen mit einer Amortisationszeit von deutlich mehr als fünf Jahren umgesetzt.
- Bei Einsparoptionen im Prozessbereich wird angenommen, dass 50% der Unternehmen auch Amortisationszeiten von mehr als elf Jahren akzeptieren. Darüber hinaus werden Verfahren berücksichtigt, die sich bisher noch in der Entwicklung befinden (z.B. CO_2-arme Zementherstellung, Endabmessungsnahes Stahlgießen, Sauerstoffverzehrkathoden bei der Chlorherstellung, innovative Papiertrocknungsverfahren, Magnetheizer beim Aluminiumverarbeiten).
- Auch für Unternehmen, die nicht am Europäischen Emissionshandelssystem teilnehmen, wird angenommen, dass ein beschleunigter Wechsel zu emissionsarmen Energieträgern stattfindet. Hierfür sind (monetäre) Anreize zum Brennstoffwechsel erforderlich, die ähnlich hoch wie die Preise für CO_2-Zertifikate sind.
- Die Steigerung der Materialeffizienz führt zu einem Rückgang der Produktion von energieintensiven Grundstoffen von ca. 5%. Darüber hinaus findet eine

Verschiebung zu Sekundärprozessen (Papier, Stahl, Aluminium, Kupfer) und Ersatzstoffen (Ersatz für Klinker bei der Zementherstellung) statt.

Durch Umsetzung dieser Maßnahmen ist der Brennstoffbedarf im Klimaschutzszenario 90 an der unteren Grenze angelangt. Ohne signifikante technologische Durchbrüche erscheint eine weitere Reduktion der Energienachfrage und Emissionsminderung im Industriesektor nicht realistisch.

Die Nutzung von CCS wird auf Sektoren (z.B. Rußkonzentration) ausgeweitet, in denen CO2 in niedrigeren Konzentrationen anfällt.

Verkehr

Das Klimaschutzszenario 90 unterscheidet sich vom Klimaschutzszenario 80 im Wesentlichen durch eine stärkere Nutzung fiskalischer Instrumente des motorisierten Individualverkehrs. Dies bewirkt eine noch weiter gehende Verlagerung hin zu öffentlichen und nicht motorisierten Verkehrsmitteln. Darüber hinaus wird von einem verstärkten Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen ausgegangen. Beide Effekte sind jedoch verhältnismäßig gering.

Strom

Auch im Stromsektor müssen einige der bereits im Klimaschutzszenario 80 umgesetzten Maßnahmen deutlich verschärft werden, um die zusätzlichen Emissionsminderung bis zum Jahr 2050 zu erreichen:

- Der CO_2-Preis steigt im Rahmen einer weiter verschärften Klimapolitik auf 200 €/EUA im Jahr 2050.
- Die Stromnachfrage aus den klassischen Endverbrauchssektoren sinkt sehr stark. (Rückgang um ca. 30 % zwischen 2010 und 2050). Diese Entwicklung gilt nicht für die Stromnachfrage aus dem Verkehrssektor, die wegen der wachsenden Bedeutung der Elektromobilität deutlich ansteigt.
- Der Ausbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten übersteigt die in der Leitstudie 2011 formulierten Annahmen deutlich. Im Jahr 2050 erreicht die installierte Leistung von Windkraft und Photovoltaik 105 GW bzw. 120 GW.
- Die Höhe der Investitionen in Flexibilitätsmaßnahmen (Pumpspeicherkraftwerke, Power-to-Gas) bleibt gegenüber dem Klimaschutzszenario 80 unverändert. Allerdings werden die verfügbaren Kapazitäten deutlich häufiger eingesetzt.
- Die Stromnachfrage aus Elektrofahrzeugen mit Lademanagement steigt auf ca. 60 TWh im Jahr 2050 und liegt damit auf Grund der allgemein reduzierten Nachfrage im Transportsektor leicht niedriger als im Klimaschutzszenario 80.
- Der Importanteil bleibt gegenüber dem Klimaschutzszenario 80 unverändert.

Die Szenarien lassen sehr deutlich zwei Erkenntnisse zu:

Erstens: Unter technischen, überwiegend auch wirtschaftlichen Aspekten sind die ambitionierten Ziele des Energiekonzepts erreichbar. Mangelnde Emissionsminderungspotentiale stehen somit dem Energiekonzept nicht entgegen.

Zweitens: Es wird keinen marktendogenen Prozess zur Verwirklichung der von der Bundesregierung in ihrem Energiekonzept verfolgten Ziele geben. Auch die bisher umgesetzten Maßnahmen werden dazu bei weitem nicht ausreichen wie das unter diesen Voraussetzungen untersuchte Klimaschutzszenario 80 deutlich erkennen lässt.

Daraus folgt auch, dass im Hinblick auf die Zielerreichung noch ein erheblicher politischer Handlungsbedarf besteht. Davon kann auch kein Sektor ausgenommen werden. Instrumentell steht dafür auch ein breites Spektrum zur Verfügung, von dem soweit wie möglich auf der aggregierten Ebene wie sektorspezifisch Gebrauch gemacht werden muss. Die vorliegende Studie liefert dazu wichtige Anhaltspunkte.

11 Referenzen

11.1 Literatur

Ahrens et al. 2012: Potenziale des Radverkehrs für den Klimaschutz. Dresden.

Arndt et al. 2012: Mobilitätsverhalten in Deutschland – Aufbereitung und Auswertung von Mobilitätskennwerten. Berlin.

Barthel, C., Franke, M., Müller, P., & Dittmar, C. 2010: Analyse der Vorstudien für Wohnungslüftung und Klimageräte - Veröffentlichung im Rahmen des Projektes "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess) - Arbeitspaket 14. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) 1995: Digitale Bodenübersichtskarte der BRD (BUEK 1000); Maßstab: 1:1.000.000, Hannover. http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Sammlungen-Grundla-gen/GG_geol_Info/NichtPublizieren/Deutschland/GK1000/gk1000_node.html

Buhaug, O. et al. 2009: Second IMO GHG Study 2009. International Maritime Organization (Hg.). London.

BITKOM (Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.) 2008: Die Zukunft der digitalen Consumer Electronics. BITKOM, Berlin.

BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (Hrsg.) 2001: Aufnahmeanweisung für die Bundeswaldinventur II (2001 - 2002), 2. korrigierte, überarbeitete Ausgabe, Mai 2001, Bonn.

BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) 2012b: Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland. Wirtschaftsverlag NW GmbH Bremerhafen.

BMI (Bundesministerium des Inneren) 2013: Migrationsbericht des Bundesamtes für Migration und Flüchtlinge im Auftrag der Bundesregierung. Migrationsbericht 2011, Berlin.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2006: Siedlungsabfallentsorgung in Deutschland. 1. September 2006. Berlin. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_siedlungsabfallentsorgung_2006.pdf.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2007: Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. BMU, Berlin. http://www.cbd.int/doc/world/de/de-nbsap-01-de.pdf

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2007: RECCS - Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS). Wuppertal.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2011: Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011. Berlin, Oktober 2011.

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie); BMU (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2010: Energiekonzept. für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.

Bundesagentur für Arbeit 2010: Beschäftigungsstatistik: Umstellung der Klassifikation der Wirtschaftszweige von WZ 2003 auf WZ 2008. Statistik der Bundesagentur für Arbeit. Nürnberg.

Bundesrepublik Deutschland 2010: Nationaler Aktionsplan für erneuerbare Energie gemäß der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. August 2010.

CDU (Christlich Demokratische Union Deutschlands), CSU (Christlich-Soziale Union in Bayern), FDP (Freie Demokratische Partei) 2009: Wachstum. Bildung. Zusammenhalt. Der Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und FDP. 17. Legislaturperiode. 26. Oktober 2009.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 1990-2010: Fachserie 19, Reihe 2.1 Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 2001-2010: Fachserie 19, Reihe 1 Abfallentsorgung.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 2003: Klassifikation der Wirtschaftszweige mit Erläuterungen. Ausgabe 2003. Wiesbaden.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 2007: Nachhaltige Abfallwirtschaft in Deutschland.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 2010: Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Bevölkerungsfortschreibung 2010. Fachserie 1 Reihe 1.3. Wiesbaden.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 2011b: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Inlandsproduktberechnungen – Detaillierte Jahresergebnisse 2011. Fachserie 18 Reihe 1.4. Wiesbaden.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 2012a: Varianten der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 2012b: Verkehr – Verkehr Aktuell 02/2012. Fachserie 8 Reihe 1.1. Wiesbaden.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 2012c: Genesis Online Datenbank Code 8100-0103, VGR des Bundes - Bruttowertschöpfung (nominal/preisbereinigt) Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 2013a: Bevölkerung und Erwerbstätigkeit. Vorläufige Ergebnisse der Bevölkerungsfortschreibung auf Grundlage des Zensus 2011. Statistisches Bundesamt Wiesbaden.

Destatis (Statistisches Bundesamt) 2013b: Bruttoinlandsprodukt 2012 für Deutschland.

Diefenbach, N.; Cischinsky, H. et al; IWU (Institut Wohnen und Umwelt GmbH) 2010: Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt.

Diefenbach, N.; Loga, T. 2011: Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU.

Diekmann, J. et al. 1999: Energie-Effizienz-Indikatoren: statistische Grundlagen, theoretische Fundierung und Orientierungsbasis für die politische Praxis. Heidelberg: Physica-Verlag.

DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung), FhG-ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung), Öko-Institut, und Forschungszentrum Jülich 1999: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO_2-Emissionen in Deutschland bis zum Jahr 2020. Politikszenarien für den Klimaschutz. Edited by B. Stein, G.; Strobel. Schriften Jülich: Forschungszentrums Jülich.

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrtechnik) 2004: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Stuttgart.

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), Fraunhofer IWES (Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik), IFNE (Ingenieurbüro für neue Energien) 2010: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global (Leitstudie). BMU Berlin.

Doll et al. 2012: Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr. Karlsruhe.

Drösler M. et al. 2011: Klimaschutz durch Moorschutz in der Praxis. Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundprojekt „Klimaschutz - Moornutzungsstrategien“ 2006-2010. Arbeitsberichte aus dem vTI-Institut für Agrarrelevante Klimaforschung, Institut für Agrarrelevante Klimaforschung (AK), Johann Heinrich von Thünen Institut (vTI), Braunschweig.

EC (European Commission) 2009a: A sustainable future for transport – Towards an integrated, technology-led and user-friendly system. Luxembourg, 2009

EC (European Commission) 2009b: Gesundheitscheck der Gemeinsamen Agrarpolitik. http://ec.europa.eu/agriculture/healthcheck/index_de.htm

EC (European Commission) 2011: Transitional Union-wide rules for harmonised free allocation of emission allowances pursuant to Article 10a of Directive 2003/87/EC of the European Parliament and the Council.

EEA (European Environmental Agency) 2006: How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? EEA Report, 7/2006, Luxembourg.

Ehrentraut, O., Heidler, M. 2007: Demografisches Risiko für die Staatsfinanzen? Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnungen im Vergleich. Diskussionsbeitrag Nr. 20 des Forschungszentrums Generationenverträge der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg

Elite, Magazin für Milcherzeuger 2013: „MLP Jahresabschluss“. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_siedlungsabfallentsorgung_2006.pdf.

ErP Preparatory Studies 2007a, Lot 3: Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors. Final Report.

ErP Preparatory Studies 2007b, Lot 5: "Televisions". Final Report.

ErP Preparatory Studies 2007c, Lot 6: "Standby and offmode losses". Final Report.

ErP Preparatory Studies 2008a, Lot 10: Residential room conditioning conditioning appliances (airco and ventilation). Final Report.

ErP Preparatory Studies 2008b, Lot 13: "Domestic refrigerators and freezers". Final report.

ErP Preparatory Studies 2008c, Lot 14: "Domestic dishwashers and washing machines". Final report.

ErP Preparatory Studies 2008d, Lot 18: "Complex set-top boxes". Final report.

ErP Preparatory Studies 2008e, Lot 19: "Domestic lighting". Final report.

ErP Preparatory Studies 2009, Lot 16: "Household tumble driers". Final report.

Eurostat 2012: NUTS - Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik. Luxemburg.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 2008a: Statistical Yearbook 2007-2008. Tabelle D1 “Dietary energy protein and fat consumption” http://www.fao.org/economic/ess/publications-studies/statistical-yearbook/fao-statistical-yearbook-2007-2008/d-consumption/en/.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 2008b: Food Security Statistics 2008. “Food consumption pattern of main food groups, Dietary Protein (07.08.2008)”: http://www.fao.org/economic/ess/food-security-statistics/en/.

Fleiter, T.; Schlomann, B.; Eichhammer, W. (eds.) (2013): Energieverbrauch und CO2 Emissionen industrieller Prozesstechniken - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Flessa, H. et al. 2012: Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. Johann Heinrich von Thünen-Institut Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (vTI). Landbauforschung, Sonderheft 361, Braunschweig.

Follmer et al. 2010: Mobilität in Deutschland 2008. Methodenbericht. Bonn und Berlin.

Follmer et al. 2010: Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. Bonn und Berlin.

Fraunhofer IZM (Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration) & Fraunhofer ISI (Institut für System und Innovationsforschung) 2009: Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Studie im Auftrag des BMWi., Fraunhofer, Berlin, Karlsruhe.

Georg-August-Universität und von Thünen Institut 2013: Milchtrends. Informationen zur Milchproduktion. http://www.milchtrends.de/index.php?id=7820.

GFK (Gesellschaft für Konsumforschung) 2010: GfK Retail Panel Haushaltsgeräte Deutschland 1998-2008 – Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschine, Kühlschrank, Gefrierschrank, Kochen und Klimaanlagen, Nürnberg.

Gores, S., und L. Emele. 2012: "Graue Wolken nach einem guten Jahr." Energie & Management. 15. Dezember 2012, S. 30-31.

Gschrey, B. und Schwarz, W.: Projections of global emissions of fluorinated greenhouse gases in 2050, UBA Climate Change 17/2009.

Hacker, F. et al. 2011: Marktpotenziale und CO_2-Bilanz von Elektromobilität – Arbeitspakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Berlin.

Hartkopf, T. et al. 2012. "Lastmanagementpotenziale der stromintensiven Industrie zur Maximierung des Anteils Regenerativer Energien im bezogenen Strommix."

IER (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung), RWI (Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung), & ZWE (Zentrum für europäische Wirtschaftsforschung) 2010: Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 – Energieprognose 2009. Stuttgart, Essen, Mannheim.

IFEU (Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg) 2003: Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissionsermittlung an internationale Richtlinien. Teil Abfall/Abwasser. Heidelberg.

IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) 2011: Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMOD, Version 5.2) für die Emissionsberichterstattung 2012 (Berichtsperiode 1990-2012) – Endbericht. FKZ 363 01 370 (im Auftrag des Umweltbundesamtes). Heidelberg.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Mitigation of Climate Change. Waste management and mitigation costs and potentials. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IWU (Institut Wohnen und Umwelt GmbH) (Hg.) 2003: Deutsche Gebäudetypologie. Systematik und Datensätze. Darmstadt.

Jochem et al. 2009: Adaptation and Mitigation Strategies Supporting European Climate Policy. Deliverable M1.2. Report of the Reference and 2°C Scenario for Europe.

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

Knopf, S. et al. 2010: Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO_2-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 60 (4), S. 76–80, zuletzt geprüft am 25.07.2013.

Kollas, C.; et al. 2009: Bioenergy potential in Germany - assessing spatial patterns of biomass production with aspen short-rotation coppice. In: International Agrophysics 23 (4), S. 343–352.

Krail, M. 2009: System-Based Analysis of Income Distribution Impacts on Mobility Behaviour. Karlsruher Beiträge zur wirtschaftspolitischen Forschung Band 28. Karlsruhe.

Lehr et al. 2011: Die Modelle ASTRA und PANTA RHEI zur Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Wirkungen umweltpolitischer Instrumente – ein Vergleich. gws Discussion Paper 2011/4. Osnabrück.

Mehlhart G., Ustohalova, V. 2012: Unterlagen zum Workshop über Landfill Mining – Option oder Fiktion ? Öko-Institut e.V., Februar 2012.

MiD (Mobilität in Deutschland) 2008: Ergebnisbericht – Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. Bonn und Berlin.

Mock, P. et al. 2013: From laboratory to road. A comparison of official and ‘real-world’ fuel consumption and CO2 values for cars in Europe and the United States. 2013.

MoP (Mobilitätspanel) 2008: Bearbeitete Version „Deutsches Mobilitätspanel – wissenschaftliche Begleitung und erste Auswertungen“. Institut für Verkehrswesen – Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.

Müller-Syring, Gert, Marco Henel, Wolfgang Köppel, Herwig Mlaker, Michael Sterner, and Thomas Höcher. 2013. “Entwicklung von Modularen Konzepten Zur Erzeugung , Speicherung Und Einspeisung von Wasserstoff Und Methan Ins Erdgasnetz”. Bonn.

Nitsch, J. et al. 2012. “Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und Global.”

NRC (National Research Council) 2010: Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty-Vehicles. Washington.

OECD. (Organisation for Economic Co-operation and Development) 2012a: Medium and long-term scenarios for global growth and imbalances. OECD Economic Outlook (Vol. 2012, pp. 191-224).

Offermann, F. et al. 2012: vTI-Baseline 2011-2021: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. Braunschweig: vTI, 82 Seiten, Landbauforschung vTI agriculture and forestry research - Sonderheft 355.

Öko-Institut 2004: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Verbundprojekt gefördert vom BMU im Rahmen des ZIP. Darmstadt.

Öko-Institut 2012: Potenziale und Chancen der Technologie zur CO_2-Abtrennung und –Ablagerung (CCS) für industrielle Prozessemissionen, Kurzstudie die Umweltstiftung WWF Deutschland, Berlin.

Öko-Institut et al. 2013: Politikszenarien für den Klimaschutz VI - Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030; UBA Climate Change Nr. 04/2013.

Öko-Recherche 2011: „Projektionen zu den Emissionen von HFKW, FKW und SF6 für Deutschland bis zum Jahr 2050"; UBA Climate Change Nr. 21/2011.

Olonschek, M. et al. 2011. Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change. Energy Policy (9) 4795-4806.

Paulus, M., and F. Borggrefe. 2011. "The Potential of Demand-side Management in Energy-intensive Industries for Electricity Markets in Germany." Applied Energy 88 (2): 432–441. doi:10.1016/j.apenergy.2010.03.017.

Peter, M. et al. 2012: Auswirkungen der Einführung der Luftverkehrsteuer auf die Unternehmen des Luftverkehrssektors in Deutschland Ex-Post-Analyse nach einem Jahr. Zürich.

Pötsch, O. 2010: Annahmen zur Geburtenentwicklung in der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

Prognos & EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln) 2006: Auswirkungen höherer Ölpreise auf Energieangebot und –Nachfrage. Ölpreisvariante der Energiewirtschaftlichen Referenzprognose 2030. EWI, Prognos, Köln, Basel.

Prognos 2007: Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen, Prognos, Basel, Berlin.

Prognos, EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln), & GWS (Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung mbH) 2010: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung., Prognos, EWI, GWS. Basel, Köln, Osnabrück.

Prognos & Öko-Institut 2009: Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Prognos, Ökö-Institut. Basel, Berlin.

Prognos; TU München Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik; Fraunhofer ISI (2011): Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen 2008, Prognos, TU München Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Fraunhofer ISI: Berlin, Karlsruhe, München.

Radke et al. 2012: Verkehr in Zahlen 2012/2013. DVV Media Group. Hamburg.

Ragwitz, M. et al. 2009: “EmployRES - The impact of renewable energy policy on economic growth and employment in the European Union”. Final report of EmployRES on behalf of the European Commission DG TREN, Karlsruhe.

Reiser, M. et al. 2010: In situ Aerobisierung von Altdeponien – das Projekt Deponie Dorfweiher. (http://www.lubw.baden-wuert-tenerg.de/servlet/is/76356/takag_2010_tania_ber_20.pdf?command=downloadContent&filename=takag_2010_tania_ber_20.pdf).

Rösemann, C. et al. 2012: Calculation of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2010. Methods and data. Landbauforschung - vTI Agriculture and Forestry Research, Sonderheft 343.

Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung 2011: Herausforderungen des demographischen Wandels. Expertise im Auftrag der Bundesregierung. Statistisches Bundesamt Wiesbaden.

Schliesinger, M.; Lindenberger, D. et al; EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln); GWS (Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung); Prognos (Prognos AG) 2010: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Projekt Nr. 12/10 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Basel, Köln, Osnabrück.

Schlomann, B.; Gruber, E.; Geiger, B.; Kleeberger, H.; Herzog, T.; Konopka, D.-M. (2009): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) für die Jahre 2004 bis 2006, Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Schmid, C.; Brakhage, A.; Radgen, P.; Layer, G.; Arndt U.; Carter, J.; Duschl, A.; Lilleike, J.; Nebelung, O. (2003): Möglichkeiten, Potenziale, Hemnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs branchenübergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch, Karlsruhe/ München: Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung; Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) 2007: Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten. Berlin 2007.

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

Smokers, R. et al. 2012: Support for the revision of regulation on CO_2 emissions from light commercial vehicles. Delft. 2012.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2009: Demografischer Wandel in Deutschland. Auswirkungen auf die Zahl der Erwerbspersonen. Heft 4. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart.

StBA (Statistisches Bundesamt Deutschland) 2010: Produktionsdatenbank (Prodcom). http://www.eds-destatis.de/de/theme4/prodcom.php. 2010. StBA.

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) 2012: Zukunft der Automobilindustrie. Arbeitsbericht Nr. 152. 2012.

UBA (Umweltbundesamt) 2010a: Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz. Umweltbundesamt (UBA) Dessau-Roßlau.

UBA (Umweltbundesamt) 2010b: "Energieziel 2050: 100% Strom aus Erneuerbaren Quellen". Dessau-Roßlau. http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3997.pdf.

UBA (Umweltbundesamt) 2012a: Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2012. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2010. Dessau-Roßlau.

UBA (Umweltbundesamt) 2012b: Datenauszug aus dem Zentralen System Emissionen (ZSE) vom 01.10.2012. Dessau-Roßlau.

UBA 2012c: CRF-Inventarmeldung an UNFCCC vom April 2012; http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/zip/deu-2012-crf-13apr.zip

UBA (Umweltbundesamt) 2013a: Daten zur Umwelt – Stickstoffüberschüsse. http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2879.

UBA (Umweltbundesamt) 2013b: „Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewbility" - RENEWBILITY II Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs. UFOPLAN 37 10 96 175.

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

Universität Hohenheim 2011: „ Tierhaltung und Methan – Sind Rinder Klimakiller?". http://www.um.badenwuerttemberg.de/servlet/is/76282/Vortrag%2011.pdf?command=downloadContent&filename=Vortrag%2011.pdf. April 2011.

Vortisch, P. et al. 2012: Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – wissenschaftliche Begleitung und erste Auswertungen. Bericht 2011/2012: Alltagsmobilität und Tankbuch. Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.

Wardman, M. 1998: The Value of Travel Time – A Review of British Evidence. Journal of Transport Economics and Policy 32, Pt. 3; 1998.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) 2009: Welt im Wandel - Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung. Berlin.

Weber, L. 2012: Demographic Change and Economic Growth. Simulations on Growth Models. Physika-Verlag, Heidelberg.

Wolf, S.; Lambauer, J.; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A. (2012): Industrial heat pumps in Germany - Potentials and the rational use of energy: eceee summer study industry 2012, Arnhem, 11-14 September 2012.

WWF (World Wide Fund for Nature) 2009: Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Berlin 2009.

ZSW (Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung), Fraunhofer IWES (Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik), and SolarFuel. 2011. "Verbundprojekt „Power-to-Gas": Errichtung Und Betrieb Einer Forschungsanlage Zur Speicherung von Erneuerbarem Strom Als Erneuerbares Methan Im 250 kWel-Maßstab."

ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie) 2009: Zahlenspiegel des deutschen Elektro-Hausgerätemarktes 2005-2008. ZVEI, Frankfurt.

50Hertz Transmission, Amprion, TenneT, & TransnetBW. 2013: Netzentwicklungsplan Strom 2013 - Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber.

11.2 Deutsche Gesetze und Verordnungen

17. BImSchV: Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen).

30. BImschV: Dreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen.

AbfAblV: Abfallablagerungsverordnung (Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen).

DepV - Deponieverordnung 2009: Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27.04.2009), BGBl. I, Nr. 22, S. 900.

KrW-/AbfG: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes).

TASi: Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen).

WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz).

Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser.

Anhang 1 Verzeichnis der Abkürzungen, Akronyme und Symbole

$	US-Dollar
%	Prozent
€	Euro
KS 90	Klimaschutzszenario 90
a	annum (lat. Jahr)
AbfAblV	Abfallablagerungsverordnung
AEO	Annual Energy Outlook
AG	Arbeitsgemeinschaft
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AtG	Atomgesetz
BASF	Badische Anilin- & Soda-Fabrik
bbl	Barrel
BEA	Bureau of Economic Analysis
BEV	Battery Electric Vehicle (batterieelektrische Fahrzeuge)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BlmSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
bzw.	beziehungsweise
C	Carbon
ca.	circa
CCS	Carbon Capture and Storage
CDM	Clean Development Mechanism
CH4	Methan
CO2	Kohlendioxid
CO2-Äqu.	Kohlendioxid-Äquivalent
CPS	Current Policy Scenario
CRF	Common Tabular Format
d.h.	das heißt
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
AMS (2012)	Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)
EC	European Commission

EDL	Energiedienstleistung
EDV	elektronische Datenverarbeitung
EE	erneuerbare Energien
EEA	European Environment Agency
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
EIA	Energy Information Administration
EJ	Exajoule
ELER	Der Europäische Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
EnEV	Energieeinsparverordnung
ErP	Energy-related Prodcuts
EU	European Union
EUA	European Union Allowances
EUMENA	Europe, Middle East & North Africa (Europa, Naher Osten, Nordafrika)
EU ETS	European Union Emissions Trading System
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln
FAO	Food and Agriculture Organization (Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation)
F-Gase	flourierte Treibhausgase (FKW, HFKW, SF6)
FKW	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
GAMS	General Algebraic Modeling System
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GFK	Gesellschaft für Konsumforschung
Gg	Gigagramm
ggf	gegebenenfalls
ggü.	gegenüber
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (Dienstleistungssektor)
GJ	Gigajoule
Gt	Gigatonnen
GW	Giga-Watt
GWP	Global Warming Potential (spezifisches Treibhausgaspotential)
GWS	Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung
ha	Hektar
HFKW	Teilhalogenierte Fluor-Kohlenwasserstoffe
HH	Haushalte
ICCT	International Council for Clean Technology
IE	Included Elsewhere
IEA	International Energy Agency
IFEU	Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IMO	International Maritime Organization

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ICE ECX	IntercontinentalExchange European Climate Exchange
inkl.	inklusive
Intl.	international
ISI	Institut für System- und Innovationsforschung
IWU	Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
JI	Joint Implementation
KBA	Kraftfahrzeugbundesamts
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kg	Kilogramm
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
KIT	Karlsruher Instituts für Technologie
Km	Kilometer
KONTIV	Kontinuierliche Erhebung zum VerkehrsVerhalten
KrW	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kt	Kilotonne
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LED	Light Emitting Diode (Leuchtdiode)
LKW	Lastkraftwagen
LNF	Landwirtschaftliche Nutzfläche
LNG	Liquified Natural Gas (Flüssigerdgas)
LULUCF	Land use, land use change, forestry (Landnutzung, Landnutzungsänderungen, Forstwirtschaft)
m2	Quadratmeter
MBA	Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlange
MENA	Middle East and North Africa
Mg	Milligramm
MiD	Mobilität in Deutschland
Mio.	Millionen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MM	Mit Maßnahmen
MoP	Mobilitätspanel
Mrd.	Milliarde
KS 80	Klimaschutzszenario 80
MW	Mega-Watt
MWh	Mega-Watt pro Stunde
MWM	Mit weiteren Maßnahmen
N	Stickstoff
N2O	Lachgas
NA	Not applicable

NACE	Statistical classification of economic activities in the European Union
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NIR	National Inventory Report
NPS	New Policy Scenario
NO	Not Occuring
NUTS2-Zone	Nomenclature des unités territoriales statistiques (Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik Zone 2)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLED	organic light emitting diode (organische Leuchtdiode)
OPEC	Organisation of the Petroleum Exporting Countries (Organisation erdölexportierender Länder)
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
p.a.	per annum (jährlich)
p.P.	pro Person
PEV	Primärenergieverbrauch
PHEV	Plug-In-Hybridfahrzeugen
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PJ	Petajoule
pkm	Personenkilometer
PKW	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik/Fotovoltaik
REEV	Range Extender Electric Vehicle
s.o.	siehe oben
SF6	Schwefelhexafluorid
sh.	Siehe hinten
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
t	Tonne
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
THG	Treibhausgase
TJ	Tetra Jule
tkm	Tonnenkilometer
TNS	Taylor Nelson Sofres
TREMOD	Transport Emission Model
TU	Technische Universität
TWh	Terawattstunde
u.	und
u.a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (UN Klimarahmenkonvention)

v.	von
v.a.	vor allem
VEM	Vattenfall Europe Mining
vgl.	vergleiche
vs.	versus
vTI	Heinrich von Thünen Institut
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WWF	World Wide Fund for Nature
WZ	Wirtschaftszweige
z.B.	zum Beispiel
ZSE	Zentralen System Emissionen
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

Anhang 2 Komponenten- und Sensitivitätsanalyse

Die in dem vorliegenden Bericht diskutierten Szenarien basieren auf einer Vielzahl von Parametern, deren langfristige Projektion naturgemäß mit Unsicherheiten behaftet ist. Die modellierten Emissionstrajektorien reagieren mehr oder weniger sensitiv auf die Variation dieser Eingangsparameter. In diesem Anhang wird dieser Zusammenhang exemplarisch dargestellt, indem die Sensitivität der Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen bezüglich der Annahmen zur wirtschaftlichen Entwicklung untersucht wird. Diese Sensitivitätsanalyse basiert methodisch auf einer Komponentenanalyse für die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80 sowie im Klimaschutzszenario 90.[90]

In der Komponentenanalyse wird die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen in die Beiträge verschiedener Basisindikatoren zerlegt. Unterschieden werden dabei die folgenden Komponenten:

- der Einfluss der demographischen Entwicklung,
- der Beitrag des wirtschaftlichen Wachstums,
- der Effekt einer veränderten Energieproduktivität[91],
- der Beitrag durch die Veränderungen des Anteils nicht-fossiler Energieträger,
- die Auswirkungen des veränderten Mixes der fossilen Energieträger.

Abbildung A-2 1 zeigt das Ergebnis der Komponentenanalyse für die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80. Es wird dargestellt, welche Anteile der Emissionsminderung bezogen auf das Basisjahr 2008 auf die verschiedenen Indikatoren zurückzuführen ist. Für die einzelnen Komponenten sind unterschiedliche Entwicklungsmuster festzustellen:

---

[90] Das hier genutzte Verfahren der Komponentenzerlegung ist eine Weiterentwicklung des Ansatzes, der bei Diekmann et al. (1999) beschrieben ist. In der hier gezeigten Analyse werden jedoch neben den energiebedingten CO_2-Emissionen auch die energiebedingten CH_4- und N_2O-Emissionen berücksichtigt. Die der Berechnung zugrunde liegende Angabe für das deutsche Bruttoinlandsprodukt im Jahr 1990 wurde vom DIW Berlin geschätzt, entsprechende Daten liegen aus der amtlichen Statistik nicht vor. Aus Konsistenzgründen wurde die Komponentenanalyse mit den Emissionswerten für die energiebedingten Emissionen, einschließlich der Emissionen aus dem internationalen Luftverkehr, aber ohne Emissionen aus dem internationalen Seeverkehr durchgeführt (die Vergleichsgröße Primärenergieverbrauch im Inland erfasst den Energiebedarf des gesamten Luftverkehrs, aber nicht die Hochseebunkerungen).

[91] Ein nicht zu vernachlässigender Beitrag zur Erhöhung der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität ergibt sich aus den energiestatistischen Konventionen für die primärenergieseitige Bewertung von erneuerbaren Energien und Kernenergie. Eine Bereinigung der Komponentenanalyse um diese statistischen Artefakte wurde nicht vorgenommen.

- Der deutliche Rückgang der Bevölkerungszahl um ca. 10 Mio. Einwohner bis zum Jahr 2050 (siehe Kapitel 4.1.1) führt zu einer Reduktion der energiebedingten Emissionen. Für das Jahr 2050 beträgt dieser Effekt 122 Mio. t CO_{2eq}.
- Als klar emissionserhöhende Komponente wirkt das Wirtschaftswachstum. Der Beitrag liegt hier bei knapp 280 Mio. t CO_{2eq}. für den Zeitraum 2008 bis 2020 und bei fast 747 Mio. t CO_{2eq} für den Zeitraum bis 2050.
- Entgegengesetzt wirkt die Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität. Der effizientere Einsatz von Energie führt zu einem Minderungsbeitrag von 347 Mio. t CO_{2eq} für den Zeitraum bis 2020 von etwa 566 Mio. t CO_{2eq} für den Zeitraum bis 2050.
- Durch den Ausstieg aus der Kernenergienutzung und dem Ausbau erneuerbarer Energieerzeugung steigt der Anteil nicht-fossiler Energieträger an der Primärenergienutzung. Dieser Effekt ist bis zum Jahr 2020 noch begrenzt (101 Mio. t CO_{2eq}), steigt aber langfristig deutlich an und leistet für den Zeitraum bis 2050 einem Minderungsbeitrag von fast 515 Mio. t CO_{2eq}.
- Für die Emissionsintensität der fossilen Energien ergibt sich für den Zeitraum 2010 bis 2020 ein Minderungsbeitrag von 63 Mio. t CO_{2eq} für den Zeitraum 2050 beläuft sich dieser Beitrag auf etwa 216 Mio. t CO_{2eq}.

Abbildung A-2 1 Komponentenanalyse für die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen (Klimaschutzszenario 80)

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

In Abbildung A-2 2 sind die Ergebnisse einer entsprechenden Komponentenanalyse für die Entwicklung der energiebedingten Emissionen im Klimaschutzszenario 90 zusammengestellt. Die zusätzlichen Emissionsminderungen (verglichen mit dem Klimaschutzszenario 80) betragen 28 Mio. t CO_{2eq} für das Jahr 2020 und 72 Mio. t CO_{2eq} für das Jahr 2050.

- Die Erhöhung der Energieproduktivität führt zu Minderungseffekten von 364 Mio. t CO_{2eq} (bis zum Jahr 2020) bzw. 517 Mio. t CO_{2eq} (bis zum Jahr 2050). Verglichen mit dem Klimaschutzszenario 80 entspricht dies bis zum Jahr 2020 einer zusätzlichen Minderung von 17 Mio. t CO_{2eq}. Über den gesamten Zeitraum bis zum Jahr 2050 hinweg betrachtet, fällt der Minderungseffekt jedoch um 47 Mio. t CO_{2eq} geringer aus als im Klimaschutzszenario 80.
- Der verstärkte Ausbau erneuerbarer Energien bewirkt (verglichen mit dem Klimaschutzszenario 80) einen zusätzlichen Minderungsbeitrag von 8 Mio. t CO_{2eq} für das Jahr 2020 und 57 Mio. t CO_{2eq} für den Zeitraum bis zum Jahr 2050.
- Die weitergehende Dekarbonisierung des Mixes fossiler Brennstoffe führt zu einem Minderungsbeitrag von 66 Mio. t CO_{2eq} (bis zum Jahr 2020) bzw. 280 Mio. t CO_{2eq} (bis zum Jahr 2050). Dies entspricht im Vergleich zum Klimaschutzszenario 80 einer zusätzlichen Minderung von 3 Mio. t CO_{2eq} für das Jahr 2020 und 64 Mio. t CO_{2eq} für das Jahr 2050.
- Die Minderungsanteile für demographische und wirtschaftliche Entwicklung sind für beide Szenarien identisch.

Abbildung A-2 2 Komponentenanalyse für die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen (Klimaschutzszenario 90)

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Auf Grundlage dieser Komponentenanalyse wurde eine Sensitivitätsrechnung für die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes durchgeführt, die sowohl das Klimaschutzszenario 80 als auch das Klimaschutzszenario 90 einbezieht. Es wurde untersucht, wie sich die energiebedingten Emissionen bei optimistischeren Annahmen bezüglich des Wirtschaftswachstums entwickeln würden. Hierfür wurde das in Kapitel 4.1.2 diskutierte OECD-Szenario (OECD 2012a) verwendet, in dem das jährliche Wirtschaftswachstum um 0,3% höher liegt als in dem für diese Studie verwendeten Referenzszenario.

Für die Sensitivitätsrechnung auf der aggregierten Ebene wird unterstellt, dass sich im Gesamtsystem nur die Wirtschaftsentwicklung ändert. Die gesamtwirtschaftliche Energieproduktivität, der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieeinsatz und die CO_2-Intensitität des verbleibenden Einsatzes fossiler Brennstoffe bleiben unverändert.

Die Ergebnisse der Analyse sind in Abbildung A-2 3 und Tabelle A-2 1 dargestellt. Sowohl im Klimaschutzszenario 80 als auch im Klimaschutzszenario 90 führt ein rascheres Wirtschaftswachstum (erwartungsgemäß) zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen. Dieser Effekt liegt in einer Größenordnung von 16,7-17,5 Mio. t CO_{2eq} im Jahr 2020 und 11,4-20,4 Mio. t CO_{2eq} im Jahr 2050. Bezogen auf 1990 entspricht dieser einer Abnahme der relativen Emissionsminderungen um 1,3-1,4 Prozentpunkte in 2020 bzw. 0,9-1,6 Prozentpunkte in 2050. Mit zunehmender Energieproduktivität und mit abnehmender THG-Intensität der Primärenergienutzung wirkt sich zusätzliche wirtschaftliche Aktivität weniger stark auf die Gesamtemissionen aus – daher ist der Effekt

im Klimaschutzszenario 90 kleiner als im Klimaschutzszenario 80 und nimmt in beiden Szenarien über die Zeit hinweg ab.

Abbildung A-2 3 Auswirkungen des Wirtschaftswachstums auf die langfristige Reduktion der Gesamtemissionen (ohne internationalen Verkehr / LULUCF)

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle A-2 1 Auswirkungen des Wirtschaftswachstums auf die langfristige Reduktion der Gesamtemissionen

	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	Mio. t CO_2-Äqu.						
Gesamtemissionen:							
KS 80 (Referenz)	1.039,0	997,3	936,5	695,0	499,8	346,9	224,3
KS 80 (hohes Wirtschaftswachstum)				712,5	525,2	372,7	244,7
KS 80 (Differenz)				17,5	25,4	25,8	20,4
KS 90 (Referenz)	1.039,0	997,3	936,5	667,1	449,0	260,9	124,6
KS 90 (hohes Wirtschaftswachstum)				683,7	471,9	280,5	136,0
KS 90 (Differenz)				16,7	22,9	19,6	11,4
Reduktion gegenüber 1990:							
KS 80 (Referenz)	*-16,6%*	*-20,0%*	*-24,8%*	*-44,2%*	*-59,9%*	*-72,2%*	*-82,0%*
KS 80 (hohes Wirtschaftswachstum)				*-42,8%*	*-57,9%*	*-70,1%*	*-80,4%*
KS 90 (Referenz)	*-16,6%*	*-20,0%*	*-24,8%*	*-46,5%*	*-64,0%*	*-79,1%*	*-90,0%*
KS 90 (hohes Wirtschaftswachstum)				*-45,1%*	*-62,1%*	*-77,5%*	*-89,1%*
Anmerkung: Emissionen aus internationalem Luft- und Schifffahrtsverkehr sowie LULCF sind nichtberücksichtigt.							

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass hinsichtlich der Sensitivität der Emissionsentwicklung die gesamtwirtschaftliche Entwicklung (mit Blick auf die gesamten energiebedingten Emissionen) durchaus von Bedeutung ist. Die Wechselwirkungen zwischen Wirtschaftsentwicklung und Entwicklung der Treibhausgasemissionen sowie die Wirkungen der in den verschiedenen Szenarien abgebildeten energie- und klimapolitischen Maßnahmen verdeutlicht die besondere Rolle von Maßnahmen, die auf diejenigen Sektoren abzielen, die besonders sensitiv auf unterschiedliche Entwicklungen des Wirtschaftswachstums reagieren, d.h. v.a. den Stromsektor (auf der Angebots- und Nachfrageseite) sowie den Personen- und Güterverkehr.

Anhang 3 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach Verursachern (Verursacherbilanz)

Anhang 3-1 Methodik der Emissionsbilanzierung nach Verursachern

Die Treibhausgasemissionen im Hauptteil dieses Berichts sind entsprechend der Logik des Nationalen Inventarberichts bilanziert. Diese bilanziert Emissionen am Ort ihrer physischen Entstehung und nicht bei ihren eigentlichen Verursachern, also den Nachfragern eines bestimmten Produktes oder einer Energiedienstleistung. Daher enthalten die im Hauptteil für die Endverbrauchssektoren ausgewiesen Treibhausgasemissionen weder die Emissionen für die Strom- und Fernwärmeproduktion noch die der vorgelagerten Produktionsketten wie der Raffinerien und anderen Anlagen des Umwandlungssektors. Ebenso unberücksichtigt bleiben flüchtige Emissionen des Energiesektors, aus Industrieprozessen und aus der Produktverwendung.

In der Verursacherbilanz werden diese Emissionen den Sektoren entsprechend der in Tabelle A-3 1 dargestellten Zuordnungsmatrix den Endverbrauchssektoren anteilig zugewiesen. Die Zuordnung erfolgt dabei über die sektorspezifischen Energieverbräuche. Die Emissionen der Abfall- und Landwirtschaft werden weiterhin getrennt ausgewiesen. Die Emissionen der Kraftwerke (öffentliche Kraftwerke, Raffineriekraftwerke, Kraftwerke des übrigen Umwandlungssektors) und Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) werden über die Stromverbräuche auf die Endverbrauchssektoren zugeteilt, die Emissionen der öffentlichen Heizwerke über die Fernwärmebedarfe. Die Emissionen der Raffineriewärmeerzeuger werden über die Mineralölverbräuche und die Emissionen der Wärmeerzeuger des übrigen Umwandlungssektors über die Biokraftstoff- und Gichtgasverbräuche verteilt. Die flüchtigen Emissionen der Energiebereitstellung werden den Gesamtendenergieverbräuchen der einzelnen Sektoren zugeteilt. Wie bereits am Begriff erkennbar, werden Industrieprozesse ausschließlich bei Industrie berücksichtigt. Ebenso werden Emissionen aus der Produktverwendung der Industrie zugeordnet, einzige Ausnahme bildet hier Narkosegas, das dem Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) zugeordnet wird. Die Emissionen der Land- und der Abfallwirtschaft werden einerseits nicht auf die Endverbrauchssektoren aufgeteilt, andererseits werden diesen auch keine weiteren Emissionen zugeordnet. Die Emissionen der Land- und Abfallwirtschaft sind in der Verursacherbilanz also identisch zu den Emissionen des Hauptteils dieses Berichts.

Zu Details der Zuordnung der Emissionen auf die Endverbrauchssektoren siehe auch die Anmerkungen in der Tabelle A-3 1. Die Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs werden in dieser Verursacherbilanz nicht berücksichtigt, Verkehr meint in dieser Betrachtung also ausschließlich nationalen Verkehr. Ebenso unberücksichtigt bleiben die Emissionen von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF).

Tabelle A-3 1 Zuordnungsmatrix der Verursacherbilanz

		ÖffKW	ÖffHW	RaffKW	Raff-Werz	Übr-UmKW	Übr-UmWErz	REA	Flücht. Em. Energie	Ind.-proz.	Produkt-verwen-dung
Haushalte	Gesamt								X		
	Strom	X		X		X		X			
	Fernwärme		X								
	Öl				X						
	Biokraftstoffe										
	Gichtgas										
GHD	Gesamt								X		X
	Strom	X		X		X		X			
	Fernwärme		X								
	Öl				X						
	Biokraftstoffe						X				
	Gichtgas						X				
Verkehr	Gesamt								X		
	Strom	X		X		X		X			
	Fernwärme		X								
	Öl				X						
	Biokraftstoffe						X				
	Gichtgas						X				
Industrie	Gesamt								X	X	X
	Strom (6)	X		X		X		X			
	Fernwärme		X								
	Öl				X						
	Biokraftstoffe						X				
	Gichtgas						X				
Anmerkungen				1		2	3	4			5

Anmerkungen:

1: Raffineriekraftwerke (RaffKW) dienen einerseits der Stromproduktion, andererseits sind sie Hilfsanlagen bei der Mineralölraffination. Da eine weitere Aufteilung nicht ohne weiteres möglich ist, werden die Emissionen der RaffKW

2: Kraftwerke des übrigen Umwandlungssektors (ÜbrUmKW) dienen einerseits der Stromproduktion, andererseits sind sie Hilfsanlagen bei der Umwandlung von Primär- in Sekundärenergieträger. Da eine weitere Aufteilung nicht ohne weiteres möglich ist, werden die Emissionen der ÜbrUmKW komplett über den Stromverbrauch aufgeteilt.

3: Im übrigen Umwandlungssektor sind Gichtgas und Biokraftstoffproduktion dominierend. Daher erfolgt die Aufteilung der Emissionen der übrigen Umwandlungswärmeerzeuger (ÜbrUmWErz) über Gichtgas und Biokraftstoffe.

4: Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) kommen zwar nicht nur bei der Stromerzeugung in Kraftwerken vor, sondern auch in anderen Anlagen des Energiesektors. Allein die öffentlichen Kraftwerke (ÖffKW) etwa 80 % der gesamten Emissionen des Umwandlungssektors aus und die REA hingegen nur etwa 0,3 %. Daher erscheint ein weiterer Split dieser geringen Emissionen angesichts der anderern Vereinfachungen bei der Zuordnung der Emissionen unnötig.

5: Narkosegas wird dem Sektor GHD zugeordnet, die übrigen Emissionen aus der Produktverwendung der Industrie.

6: Bei der Emissionsaufteilung der Strombereitstellung wird berücksichtigt, dass in der Industrie ein nicht unerheblicher Anteil des benötigten Stroms in Industriekraftwerken (IKW) eigenproduziert wird.

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 3-2 Verursacherbilanz für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)

In Tabelle A-3 2 und Abbildung A-3 1 sind die Ergebnisse der Verursacherbilanz für das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) grafisch und numerisch dargestellt. Der größte Teil der Emissionen wird durch die Industrie verursacht. Im Jahr 2010 verursachte die Industrie etwa 316 Mio t CO2-Äq. Diese Emissionen sinken auf 291 Mio t CO_2-Äq bis zum Jahr 2020 und auf 207 Mio t CO_2-Äq bis zum Jahr 2050. Dies entspricht einem Rückgang von 8 % bis 2020 und 34 % bis 2050 im Vergleich zu 2010.

Die zweitmeisten Emissionen waren mit 211 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2010 den Haushalten zuzuordnen. Bis 2020 sinken die durch die Haushalte verursachten Emissionen auf 155 Mio t CO_2-Äq (−27 %) und bis 2050 auf 85 Mio t CO_2-Äq (−60 %). Der Verkehr verursachte im Jahr 2010 mit 182 Mio t CO2-Äq die drittmeisten Emissionen. Sie sinken auf 160 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2020 und 121 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2050. Da die Verkehrsemissionen mit −12 % (2020) bzw. −34 % (2050) langsamer sinken als die Haushaltsemissionen wird der Verkehrssektor im Jahr 2050 zum (nach der Industrie) zweitbedeutendsten Emissionsverursacher. Der Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) verursachte 2010 etwa 148 Mio t CO_2-Äq, die auf 122 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2020 und 62 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2050 sinken. Damit weist der GHD-Sektor mit 18 % im Jahr 2020 und 58 % im Jahr 2050 eine etwas geringere Emissionsminderungsdynamik als der Haushaltssektor auf. Die Emissionen aus der Landwirtschaft bleiben mit 67 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2010 bzw. 68 Mio t CO_2-Äq in den Jahren 2020 und 2050 quasi konstant. Mit einem Rückgang von 32 % im Jahr 2020 und 58 % im Jahr 2050 weist der Abfallsektor kurzfristig die höchste Minderungsdynamik auf, allerdings liegt dies mit 12 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2010, 8 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2020 und 5 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2050 absolut auf einem niedrigen Niveau.

Abbildung A-3 1 Darstellung der gesamten Treibhausgasemissionen im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) nach Verursachern, 2010–2050

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle A-3 2 Aufteilung der gesamten Treibhausgasemissionen nach Verursachern im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010–2050

Sektoren	2010	2020	2030	2040	2050
Emissionen nach Sektoren in Mt CO2-Äq					
Energiesektoren	354	289	231	197	175
Industrie	115	113	105	97	93
GHD	44	39	30	22	16
Haushalte	103	75	57	46	38
Verkehr	155	133	116	101	89
Flüchtige Emissionen aus Energiesektoren	11	8	8	6	5
Industrieprozesse	73	69	61	58	57
Produktverwendung	2	2	2	2	2
Landwirtschaft	67	68	68	68	68
Abfallwirtschaft	12	8	7	6	5
Summe	937	804	685	604	547
Absolute Emissionen nach Verursachern in Mt CO2-Äq					
Haushalte	211	155	120	99	85
GHD	148	122	92	74	62
Verkehr	182	160	149	137	121
Industrie	316	291	250	221	207
Landwirtschaft	67	68	68	68	68
Abfallwirtschaft	12	8	7	6	5
Summe	937	804	685	604	547
Relative Emissionen nach Verursachern					
Haushalte	22,5%	19,3%	17,5%	16,3%	15,5%
GHD	15,8%	15,1%	13,5%	12,2%	11,3%
Verkehr	19,1%	19,6%	21,4%	22,5%	21,9%
Industrie	33,7%	36,2%	36,4%	36,6%	37,8%
Landwirtschaft	7,2%	8,4%	9,9%	11,2%	12,4%
Abfallwirtschaft	1,3%	1,0%	1,0%	0,9%	0,9%
Summe	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung A-3 2 ist die Aufteilung der durch die verschiedenen Sektoren verursachten Emissionen relativ dargestellt. Den größten Anteil der Emissionen verursachte im Jahr 2010 die Industrie mit etwa 34 %. Dieser Anteil steigt bis 2050 auf 38 %. Die Haushalte verursachten 2010 etwa 23 % der Emissionen, 2050 hingegen nur noch gut 15 %.Der Anteil der Emissionen, der durch den Verkehr verursacht wird, steigt von gut 19% auf knapp 22 %. Gewerbe, Handel und Dienstleistungen verursachen 2010 noch knapp 16 % der Emissionen, 2050 hingegen nur noch gut 11 %. Der Anteil der Landwirtschaft an den Emissionen steigt von 7 % auf 12 % und der Anteil der Abfallwirtschaft sinkt von etwas über 1 % im Jahr 2010 auf etwas unter 1 % im Jahr 2050.

Abbildung A-3 2 Relative Anteile der Treibhausgasemissionen nach Verursachern im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012), 2010–2050

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 3-3 Verursacherbilanz für das Klimaschutzszenario 80

Auch für das Klimaschutzszenario 80 wurde eine Verursacherbilanz erstellt, die Ergebnisse sind in Tabelle A-3 3 und Abbildung A-3 3 dargestellt. Im KS 80 sinken die der Industrie zuzuordnenden Emissionen von 20 % auf 252 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2020 und 81 % auf 61 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2050 schneller als im AMS (2012). Anders als im AMS (2012) weisen die Haushalte im KS 80 langfristig eine niedrigere Dynamik bei der Emissionsreduktion auf als der GHD-Sektor. Während die den Haushalten zuzuordnenden Emissionen um 39 % auf 129 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2020 und um 84 % auf 33 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2050 sinken gegenüber 2010, reduzieren sich die entsprechenden Emissionen des GHD-Sektors um 38 % auf 91 Mio t CO_2-Äq (2020) bzw. um 87 % auf 19 Mio t CO_2-Äq (2050). Auch die Verkehrsemissionen sinken im KS 80 stärker als im AMS (2012), 2020 sind dem Verkehr noch Emissionen in Höhe von 149 Mio t CO_2-Äq (−18 %) und 2050 von 44 Mio t CO_2-Äq (−76 %) zuzuordnen. Nahezu unverändert im KS 80 gegenüber dem AMS (2012) sind die Emissionen der Abfallwirtschaft mit 7 Mio. t CO_2-Äq (−47 %) im Jahr 2020 und 4 Mio. t CO2-Äq (−65 %) im Jahr 2050.

Abbildung A-3 3 Darstellung der gesamten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80 nach Verursachern, 2010–2050

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle A-3 3 Aufteilung der gesamten Treibhausgasemissionen nach Verursachern im Klimaschutzszenario 80, 2010–2050

Sektoren	2010	2020	2030	2040	2050
Emissionen nach Sektoren in Mt CO2-Äq					
Energiesektoren	354	212	149	102	61
Industrie	115	111	85	60	34
GHD	44	36	23	13	8
Haushalte	103	65	40	25	18
Verkehr	155	124	85	50	25
Flüchtige Emissionen aus Energiesektoren	11	8	6	4	3
Industrieprozesse	73	63	42	22	7
Produktverwendung	2	2	2	2	2
Landwirtschaft	67	68	62	63	63
Abfallwirtschaft	12	7	5	5	4
Summe	937	695	499	346	225
Absolute Emissionen nach Verursachern in Mt CO2-Äq					
Haushalte	211	129	81	54	33
GHD	148	91	57	34	19
Verkehr	182	149	109	74	44
Industrie	316	252	183	116	60
Landwirtschaft	67	68	62	63	63
Abfallwirtschaft	12	7	5	5	4
Summe	937	695	499	346	225
Relative Emissionen nach Verursachern					
Haushalte	22,5%	18,6%	16,3%	15,6%	14,9%
GHD	15,8%	13,1%	11,5%	9,7%	8,5%
Verkehr	19,1%	21,1%	21,7%	21,2%	19,6%
Industrie	33,7%	36,2%	36,7%	33,6%	26,9%
Landwirtschaft	7,2%	9,8%	12,5%	18,2%	28,0%
Abfallwirtschaft	1,3%	0,9%	1,1%	1,4%	1,9%
Summe	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung A-3 4 ist die Aufteilung der durch die verschieden Sektoren verursachten Emissionen relativ dargestellt. Den größten Anteil der Emissionen verursachte im Jahr 2010 die Industrie mit knapp 34 %. Dieser Anteil steigt zunächst bis 2030 auf knapp 37 %, sinkt dann aber bis 2050 auf 27 %. Die Haushalte verursachten 2010 etwa 23 % der Emissionen, 2050 hingegen nur noch etwa 15 %; bezüglich der relativen Anteile des Haushaltssektors gibt es also kaum Unterschiede zwischen AMS (2012) und KS 80. Der Anteil der Emissionen, der durch den Verkehr verursacht wird, steigt von 19 % im Jahr 2010 zunächst auf knapp 22 % im Jahr 2030, sinkt dann aber wieder auf etwa 19 % im Jahr 2050 ab. Gewerbe, Handel und Dienstleistungen verursachen 2010 noch fast 16 % der Emissionen, 2050 hingegen nur noch knapp 9 %. Der Anteil der Landwirtschaft an den Emissionen vervierfacht sich von 7 % auf 28 % und der Anteil der Abfallwirtschaft steigt von gut 1 % auf knapp 2 %.

Abbildung A-3 4 Relative Anteile der Treibhausgasemissionen nach Verursachern im Klimaschutzszenario 80, 2010–2050

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 3-4 Verursacherbilanz für das Klimaschutzszenario 90

Ebenso wie für das AMS (2012) und das KS 80 wurde auch für das Klimaschutzszenario 90 eine Verursacherbilanz erstellt, die Ergebnisse sind in Tabelle A-3 3 und Abbildung A-3 5 dargestellt. Im KS 90 sinken die der Industrie zuzuordnenden Emissionen gegenüber 2010 von 24 % auf 241 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2020 und 89 % auf 34 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2050 deutlich stärker als im AMS (2012) und KS 80. Ebenso wie im KS 80 weisen die Haushalte im KS 90 langfristig eine niedrigere Dynamik bei der Emissionsreduktion auf als der GHD-Sektor: Während die den Haushalten zuzuordnenden Emissionen um 45 % auf 117 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2020 und um 92 % auf 17 Mio t CO_2-Äq im Jahr 2050 sinken gegenüber 2010, reduzieren sich die entsprechenden Emissionen des GHD-Sektors um 40 % auf 89 Mio t CO_2-Äq (2020) bzw. um 97 % auf 5 Mio t CO_2-Äq. Auch die Verkehrsemissionen sinken im KS 90 stärker als im KS 80 und AMS (2012), 2020 sind dem Verkehr noch Emissionen in Höhe von 147 Mio t CO_2-Äq (−24 %) und 2030 von 25 Mio t CO_2-Äq (−86 %) zuzuordnen. Die Emissionen der Landwirtschaft bleiben bis 2020 etwa konstant, sinken dann aber bis 2050 auf 38 Mio t CO_2-Äq (−43 %). Quasi unverändert im KS 90 gegenüber dem KS 80 sind die Emissionen der Abfallwirtschaft.

Abbildung A-3 5 Darstellung der gesamten Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 90 nach Verursachern (2010–2050)

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle A-3 4 Aufteilung der gesamten Treibhausgasemissionen nach Verursachern im Klimaschutzszenario 90, 2010–2050

Sektoren	2010	2020	2030	2040	2050
Emissionen nach Sektoren in Mt CO2-Äq					
Energiesektoren	354	212	120	44	5
Industrie	115	89	80	60	27
GHD	44	35	21	10	4
Haushalte	103	61	38	23	15
Verkehr	155	123	81	48	24
Flüchtige Emissionen aus Energiesektoren	11	7	5	3	2
Industrieprozesse	73	63	39	19	4
Produktverwendung	2	2	2	2	2
Landwirtschaft	67	68	56	47	38
Abfallwirtschaft	12	7	5	4	4
Summe	937	667	449	260	125
Absolute Emissionen nach Verursachern in Mt CO2-Äq					
Haushalte	211	117	67	34	17
GHD	148	89	48	18	5
Verkehr	182	147	104	60	25
Industrie	316	241	168	96	35
Landwirtschaft	67	68	56	47	38
Abfallwirtschaft	12	7	5	4	4
Summe	937	667	449	260	125
Relative Emissionen nach Verursachern					
Haushalte	22,5%	17,5%	14,9%	13,1%	13,9%
GHD	15,8%	13,3%	10,7%	7,1%	4,1%
Verkehr	19,1%	21,7%	22,9%	22,9%	20,0%
Industrie	33,7%	36,1%	37,5%	36,9%	27,7%
Landwirtschaft	7,2%	10,2%	12,5%	18,0%	30,8%
Abfallwirtschaft	1,3%	1,0%	1,2%	1,7%	3,1%
Summe	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung A-3 6 ist die Aufteilung der durch die verschieden Sektoren verursachten Emissionen relativ dargestellt. Den größten Anteil der Emissionen verursachte im Jahr 2010 die Industrie mit etwa 34 %. Dieser Anteil steigt zunächst bis 2040 auf fast 37 %, kann dann aber bis 2050 deutlich auf etwa 28 % absinken. Die Haushalte verursachen 2010 etwa 23 % der Emissionen, 2050 hingegen nur noch etwa 14 %. Der Anteil der Emissionen, der durch den Verkehr verursacht wird, steigt von 19 % bis auf 23 % im Jahr 2040, sinkt dann aber auf 20 % im Jahr 2050. Gewerbe, Handel und Dienstleistungen verursachen 2010 noch knapp 16 % der Emissionen, 2050 hingegen nur noch 4 %. Der Anteil der Landwirtschaft an den Emissionen legt sehr stark von gut 7 % (2010) auf knapp 31 % zu. Der Anteil der Abfallwirtschaft verdreifacht sich von gut 1 % auf über 3 %.

Abbildung A-3 6 Relative Anteile der Treibhausgasemissionen nach Verursachern im Klimaschutzszenario 90, 2010–2050

Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang 3-5 Vergleich der Szenarien

Vergleicht man die zusätzlichen Emissionsminderungen von Klimaschutzszenario 80 und 90, gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) (Abbildung A-3 7), so zeigt sich, dass der größte Anteil der zusätzlichen Emissionsminderungen durch die Industrie verursacht wird. Dabei ist hervorzuheben, dass die Industrie im KS 90 gegenüber dem KS 80 für noch einmal deutlichere Emissionsminderungen verantwortlich ist. Der zweitgrößte Minderungsanteil wird durch den Verkehr verursacht, auch hier sind die Minderungsbeiträge im KS 90 noch einmal deutlich größer. Die Beiträge zur Emissionsminderung von Haushalten und GHD sind im KS 80 und KS 90 jeweils ähnlich groß, aber auch hier im KS 90 ausgeprägter. Für die Landwirtschaft hingegen sind im KS 80 kaum Minderungsbeiträge über das AMS (2012) hinaus erkennbar. Im Gegensatz dazu steht das KS 90, in dem die Landwirtschaft insbesondere 2040 und 2050 deutlich zur Emissionsminderung beiträgt. Die Unterschiede in der Abfallwirtschaft zwischen AMS (2012), KS 80 und KS 90 hingegen sind nur gering.

Abbildung A-3 7 Zusätzliche Verminderung von Treibhausgasemissionen im Klimaschutzszenario 80-Szenario und im Klimaschutzszenario 90 gegenüber dem Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) in der Verursacherbilanz

Quellen: Berechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut