

Klimaschutzszenario 2050

Zusammenfassung

Berlin, 15.04.2014

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

Hauptansprechpartner

Julia Repenning
Lukas Emele
Öko-Institut e.V.

Sibylle Braungardt
Wolfgang Eichhammer
Fraunhofer ISI

Öko-Institut e.V.

Büro Berlin
Schicklerstraße 5-7
D-10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0
Fax +49 30 405085-388

www.oeko.de

Fraunhofer ISI

Breslauer Str. 48
D-76139 Karlsruhe
Telefon +49 721 6809-203
Fax +49 721 6809-272

www.isi.fhg.de

Bearbeitet von**Öko-Institut e.V.**

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

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung

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

dezentec

Uwe Athmann

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Gesamte Treibhausgasemissionen (ohne LULUCF und internationalen Luft- und Seeverkehr)	10
Abbildung 3-1:	Stromerzeugung und Stromimport, 2010-2050	11
Abbildung 3-2:	Veränderung des Stromverbrauchs, 2010-2050	13
Abbildung 3-3:	Veränderung des Endenergieverbrauchs von Wohn- und Gewerbegebäuden	14
Abbildung 3-4:	Veränderung des Endenergieverbrauchs sowie Reduktion der THG-Emissionen im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistung (einschließlich Gebäuden im GHD-Sektor)	16
Abbildung 3-5:	Veränderung des Endenergieverbrauch sowie Reduktion der THG-Emissionen im Sektor Industrie	17
Abbildung 3-6:	Veränderung des Endenergieverbrauch sowie Reduktion der THG-Emissionen im Verkehr (ohne internationalen Luft- und Schiffsverkehr)	20
Abbildung 3-7:	Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft	22
Abbildung 3-8:	Treibhausgasemissionen und -einbindung im LULUCF-Sektor	23
Abbildung 4-1:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in den Endverbrauchssektoren	25
Abbildung 4-2:	Energetische Nutzung von Biomasse im Vergleich	27
Abbildung 4-3:	Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der gesamten energiebedingten Treibhausgasemissionen	28
Abbildung 6-1:	Dynamik der Emissionsreduktion	32
Abbildung 7-1:	Erforderliche Maßnahmen für eine 80-90-prozentige Reduktion der Treibhausgasemissionen	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Zieldatensatz des Energiekonzepts 2010/2011 und Rahmenvorgaben für die Klimaschutzszenarien	7
Tabelle 2-1:	Emissionsreduktionen bis 2050	9
Tabelle 3-1:	Primärenergiebedarf der Wohn- und Gewerbegebäude	15
Tabelle 5-1:	Qualitative Zusammenfassung der gesamtwirtschaftlichen Effekte bis 2050	29

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-CO₂-Treibhausgase (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.

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 bestätigt¹. 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?
- 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

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

Kernenergie ist für Deutschland ein umfassender Satz von energie- und klimapolitischen Zielen etabliert worden, der die kurz-, mittel- und langfristige Perspektive adressiert.

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

	Treibhausgas-emissionen	Erneuerbare Energien		Minderung Energiebedarf				Steigerung Energieproduktivität
		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 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 *Politiksznarien 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 Politiksznarien 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

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

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

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

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 CO₂-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 CO₂-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.

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 CO₂-Äq. gegenüber 1990 erbringen. Davon entfallen allein 326 Mio. t CO₂-Äq. auf die Kraftwerke der öffentlichen Stromversorgung⁶. Die zweitgrößten absoluten Reduktionen kommen aus der Industrie; die verbrennungs- und prozessbedingten Emissionen werden hier um zusammen 231 Mio. t CO₂-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 2-1: Emissionsreduktionen bis 2050

Sektor	1990	2050			Änderung ggü. 1990		
		AMS (2012)	KS 80	KS 90	AMS (2012)	KS 80	KS 90
	Mio. t CO ₂ -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	<i>keine sinnvolle Angabe möglich</i>		
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 %.

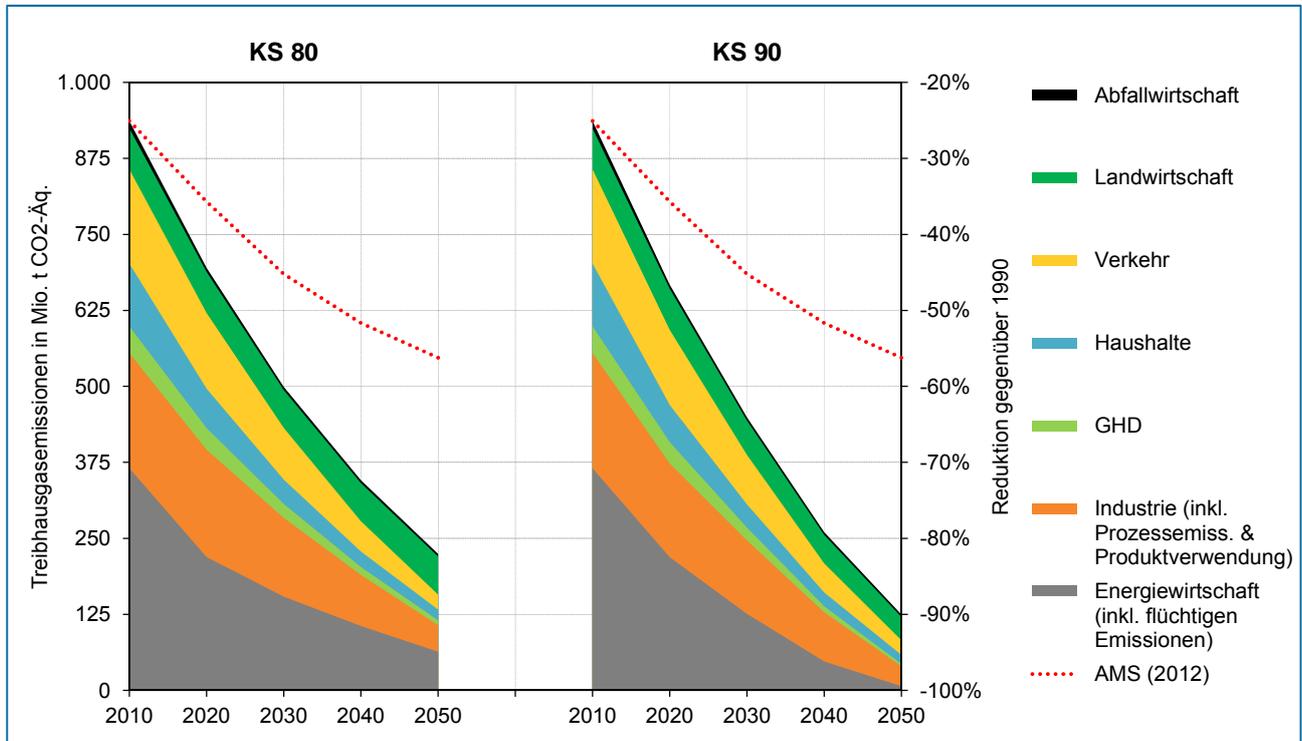
Die Landwirtschaft trägt im KS 90 mit einer zusätzlichen Reduktion um 24 Mio. t CO₂-Äq. gegenüber dem KS 80 am zweitstärksten zur weiteren Reduktion im KS 90 bei. Sie wird nur noch von der Energiewirtschaft übertroffen, der die THG-Emissionen im KS 90 gegenüber dem KS 80 um weitere 57 Mio. t CO₂-Äq. 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 Treibhausgasenke 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 2-1: 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.

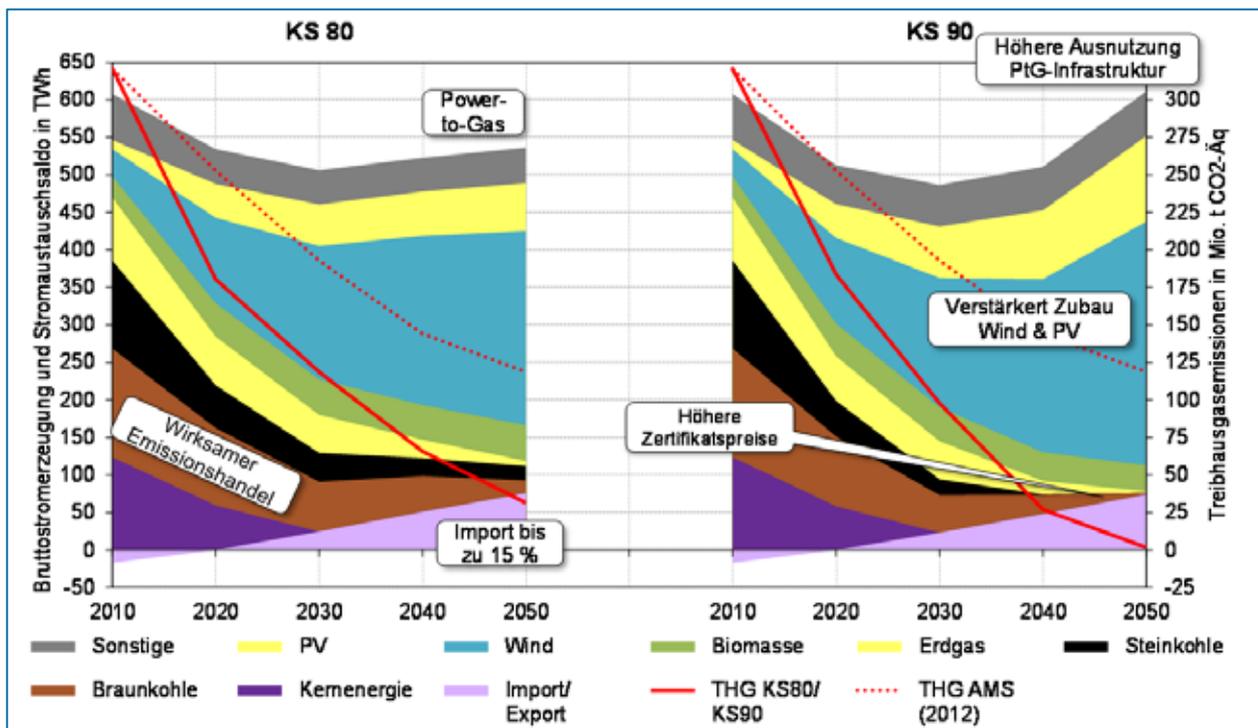
3.1. Stromverbrauch und -erzeugung

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

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.

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 3-1: 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.

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.

- 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 von 17 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:

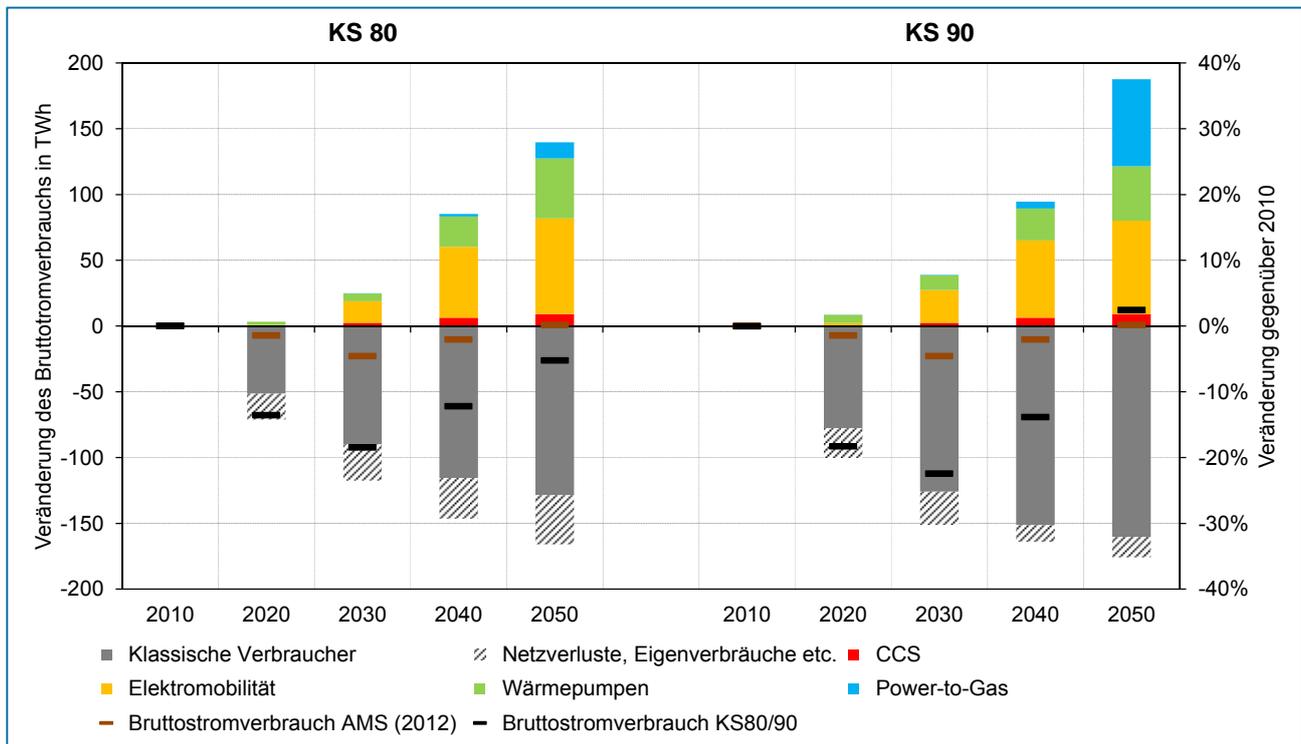
- Durch stärkeres Ansteigen der Zertifikatspreise auf 200 €/EUA im Jahr 2050 kommt es zu einem noch deutlicheren Rückgang der fossilen Stromerzeugung. Im Jahr 2050 wird nur noch etwas mehr als 1 TWh aus fossilen Energieträgern erzeugt.
- Gleichzeitig steigt durch einen stärkeren Ausbau von Wind und PV 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.

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 3-2: 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 CO₂ 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

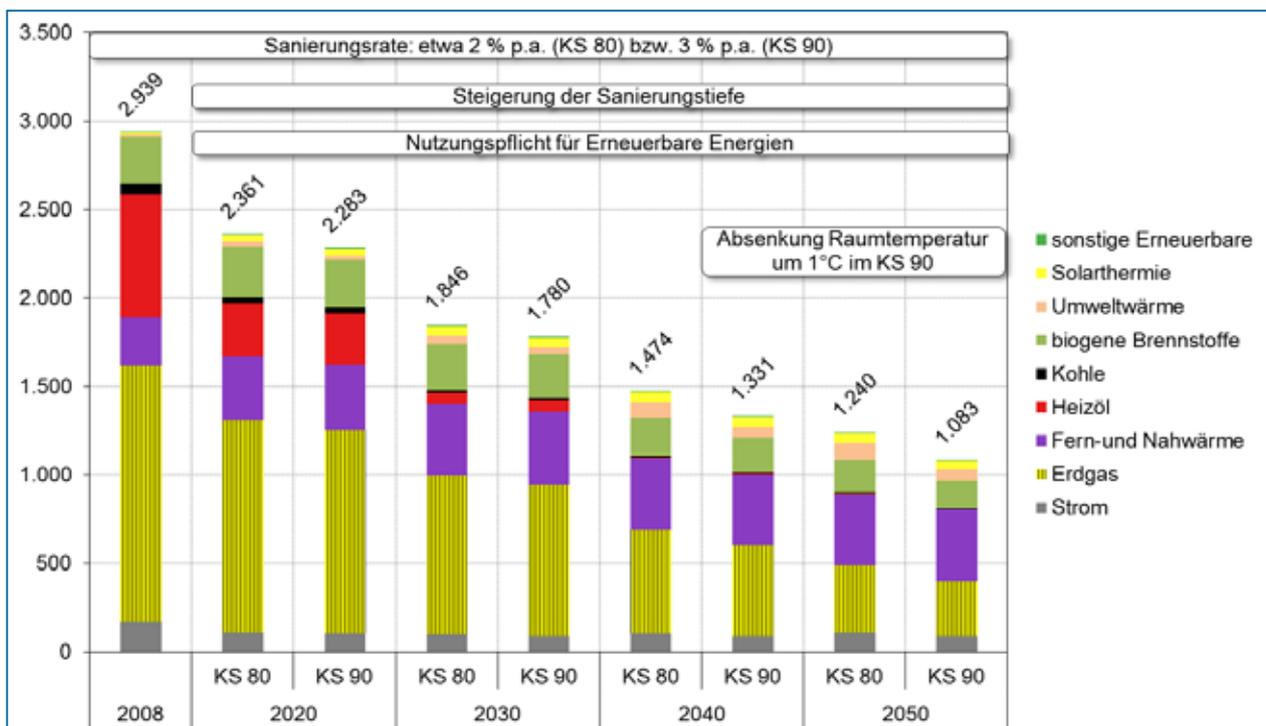
Im Jahr 2050 wird der Gebäudebestand zu einem Drittel aus Gebäuden bestehen, die es heute noch nicht gibt. Der Ersatz alter Gebäude durch neue Gebäude mit besserer Wärmedämmung führt zu Einsparungen von etwa 30 % der Energie, die heute noch für Raumwärme und Warmwasser benötigt wird, wobei sich zwischen 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 3-3: 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 Primärenergiebedarfs¹⁰ nach EnEV im KS 90 erreicht.

Tabelle 3-1: 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

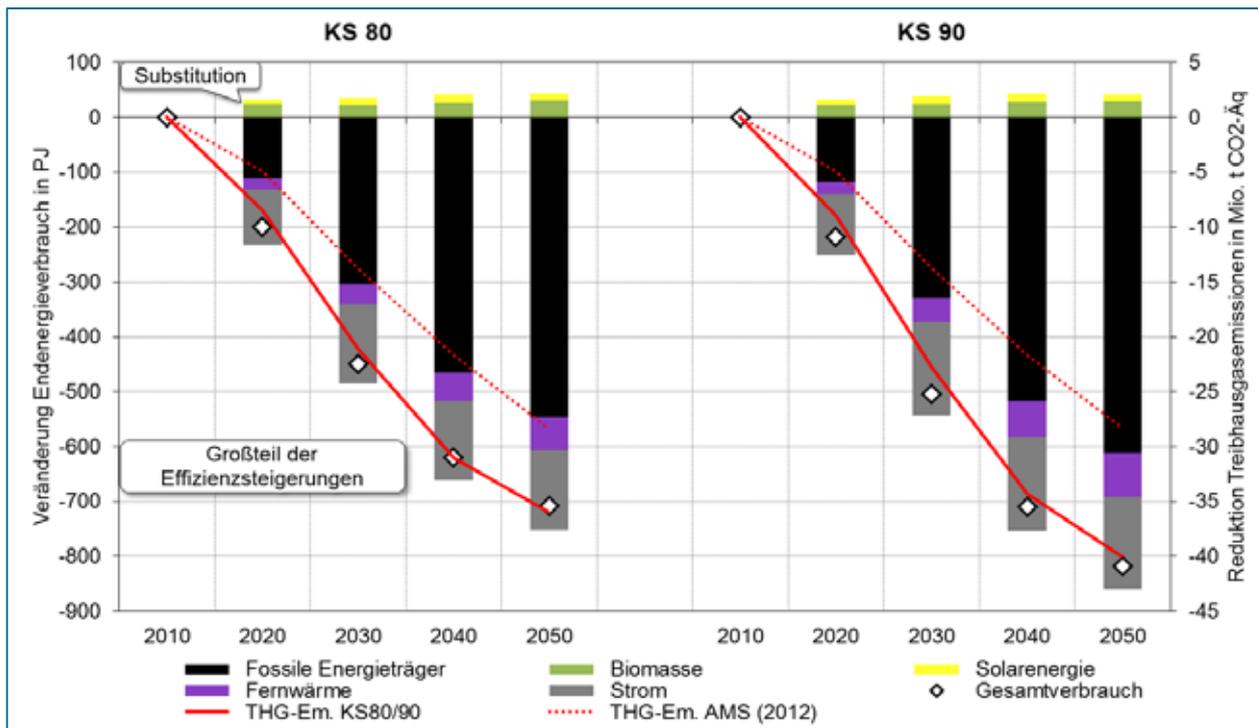
⁹ Eine klimabedingte Verringerung der Gradzahltag ist im Szenario nicht berücksichtigt, so dass die Suffizienzmaßnahmen sich durch die ansteigende Außentemperatur teilweise relativieren. Allerdings müsste der umgekehrte Effekt im Bereich der Klimaanlage berücksichtigt werden.

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.

3.3. Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistung – Geräte und Prozesse

Die THG-Emissionen des GHD-Sektors gehen im Klimaschutzszenario 80 im Zeitraum von 2010 bis 2050 von 44 auf 8 Mio. t CO₂-Äq. zurück. Dies entspricht einer Reduktion um 81 %. Im Klimaschutzszenario 90 sinken sie um 40 auf 4 Mio. t CO₂-Äq. Die Reduktion beträgt hier 91 %. Aber auch im AMS (2012) sinken bereits die Emissionen 28 auf 16 Mio. t CO₂-Äq., also um 64 %.

Abbildung 3-4: 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.

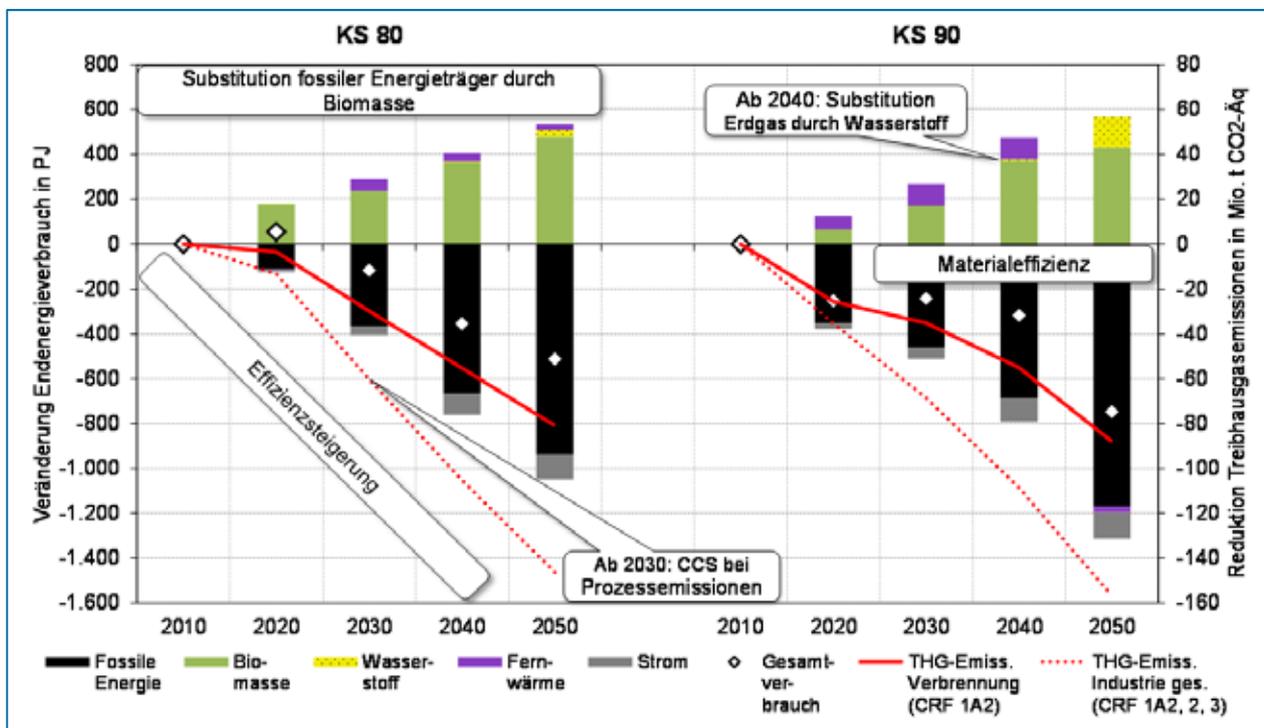
Das Klimaschutzszenario 90 zeigt bezüglich des Strombedarfs nur eine geringfügig niedrigere Entwicklung als das KS 80. Zwar sind die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit der Einsparmaßnahmen nochmals gesunken (Diskontierungsraten von 10 %), jedoch sind über die bereits im KS 80 sehr ambitionierten 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 CO₂-Äq. zurück. Dies entspricht einer Reduktion um 70 %. Im Klimaschutzszenario 90 sinken sie um 88 auf 27 Mio. t. CO₂-Äq. Die Reduktion beträgt hier 77 %. Im AMS (2012) hingegen sinken diese Emissionen nur um 22 auf 93 Mio. t CO₂-Äq., also um 19 %.

Abbildung 3-5: Veränderung des Endenergieverbrauches 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Zertifikatspreise sind.

Der verstärkte Einsatz CO₂-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 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

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

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, Sauerstoffverzehrkatoden 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 CO₂-Emissionen und Bedeutung von CCS

Im Industriesektor entstehen neben energiebedingten CO₂-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 CO₂ (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 CO₂ in besonders hohen Konzentration anfällt. Im Gegensatz dazu kommt im KS 90 CCS auch in Sektoren mit niedrigeren absoluten Emissionen und mittlerer CO₂-Konzentration zum Einsatz.

Im [Klimaschutzszenario 80](#) wird CCS nur in Industriebranchen mit hohen absoluten Prozessemissionen eingesetzt, sofern das CO₂ 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

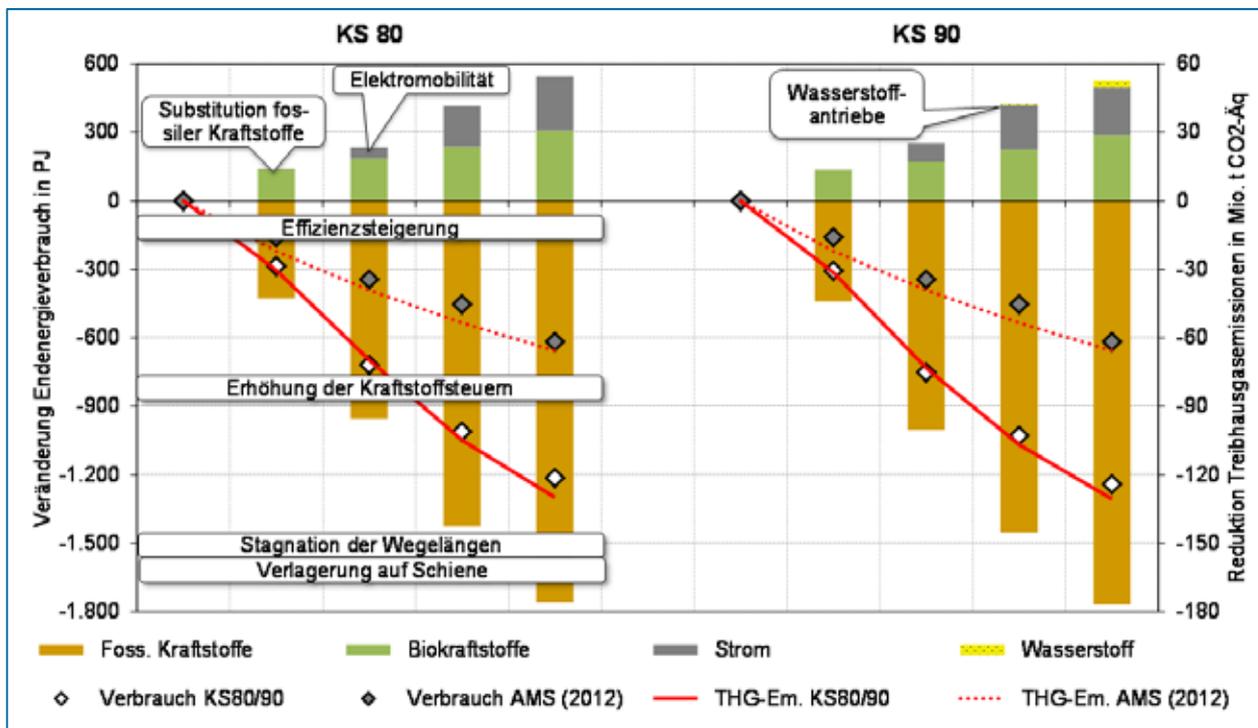
stattfindet. Insgesamt werden so 62 Mio. t CO₂ im Jahr 2050 abgeschieden. Die Freisetzung der prozessbedingten Emission von CO₂ in die Atmosphäre wird bis 2050 um 91 % gesenkt.

Im Klimaschutzszenario 90 kommt CCS auch in Branchen mit niedrigeren absoluten Emissionen und mittlerer CO₂-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 CO₂ industrieller Treibhausgase geringer. Insgesamt wird im KS 90 die prozessbedingte Emission von CO₂ in die Atmosphäre bis 2050 sogar um 96 % gesenkt. Auch in Biomasseumwandlungsanlagen fällt CO₂ 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 CO₂ als treibhausgasneutral zu betrachten ist.¹² Insgesamt werden 8,5 Mio. t CO₂ im KS 90 von Biogas- und Bioethanolanlagen abgeschieden. Die gesamte per CCS abgeschiedene CO₂-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 CO₂-Äq. zurück. Im Klimaschutzszenario 90 sinken die Emissionen nur noch unwesentlich mehr. Im AMS (2012) hingegen sinken diese Emissionen nur auf 136 Mio. t CO₂-Äq.

Abbildung 3-6: Veränderung des Endenergieverbrauches sowie Reduktion der THG-Emissionen im Verkehr (ohne internationalen Luft- und Schiffsverkehr)



Quelle: Eigene Berechnungen

¹² Allerdings verursacht der Anbau von Biomasse CH₄- und N₂O-Emissionen, die entsprechend im Landwirtschaftssektor zu berücksichtigen sind.

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 CO₂-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.

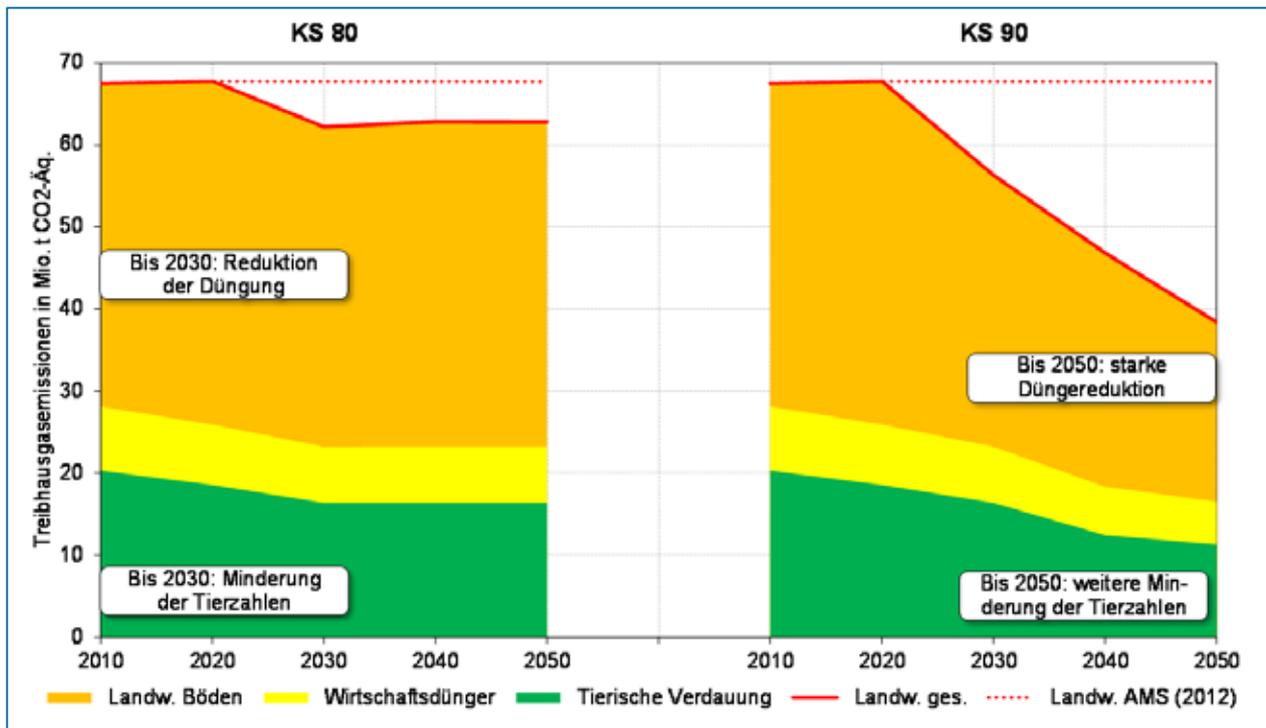
Zusätzlich zur Verteuerung des motorisierten individuellen Verkehrs und des Straßengüterverkehrs wird ein Bündel verschiedener Effizienztechnologien, darunter Leichtbau, Hybridisierung, Rückgewinnung von Bremsenergie und Verbesserung der Aerodynamik im Straßengüterverkehr realisiert. In beiden Klimaschutzszenarien 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 CO₂-Äq. Die Reduktion beträgt hier 43 %. Im AMS (2012) hingegen bleiben diese Emissionen konstant.

Abbildung 3-7: 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 CO₂-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.

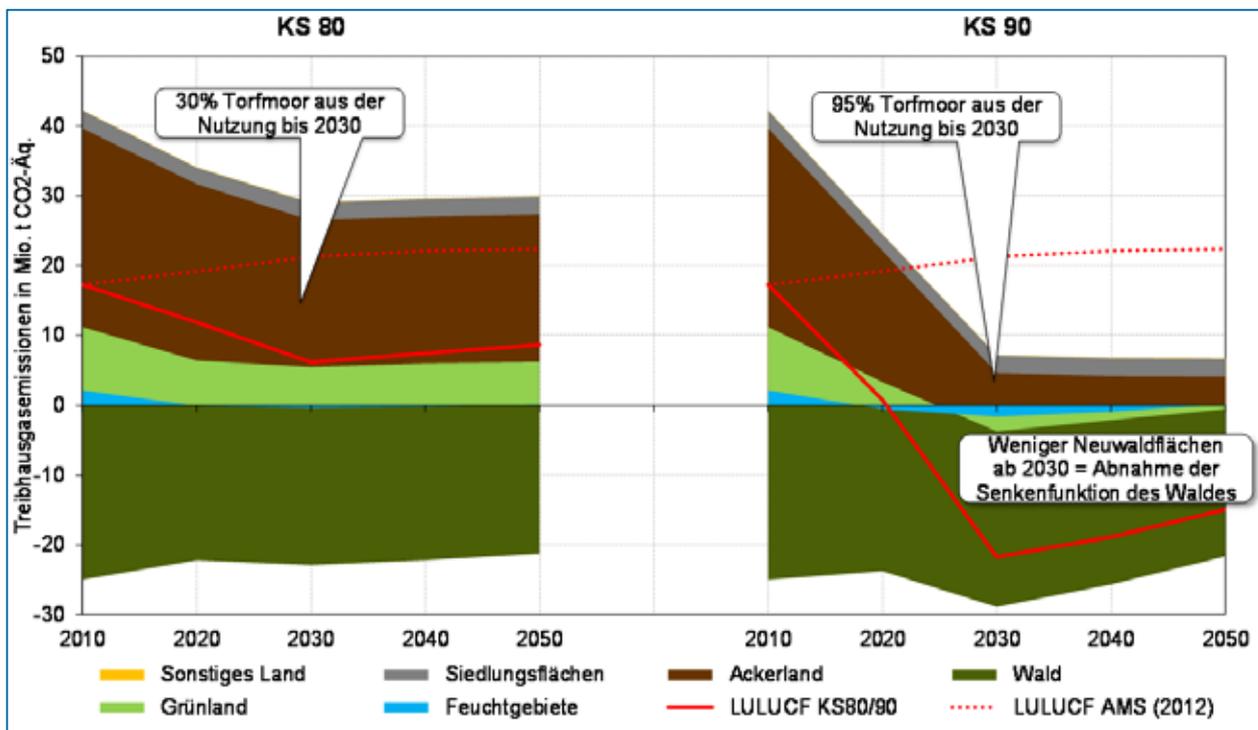
Das [Klimaschutzszenario 90](#) berücksichtigt im Wesentlichen die gleichen Stellschrauben wie das KS 80 jedoch unter verschärften Bedingungen:

- 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 Düngemittleinsatzes 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 CO₂. Übertrifft die Einbindung von CO₂ 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 CO₂-Äq. Durch die beschriebenen Entwicklungen sinken die Emissionen im KS 80 auf 9 Mio. t CO₂-Äq. bis 2050. Im KS 90 hingegen bekommt der LULUCF-Sektor eine Senkenfunktion: es werden im Jahr 2050 etwa 15 Mio. t CO₂-Äq. gebunden. Im AMS (2012) hingegen steigen die LULUCF-Emissionen nur um 5 auf 22 Mio. t CO₂-Äq.

Abbildung 3-8: 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 beschriebenen Einsatz von CCS zur Reduktion der CO₂-Emissionen aus industriellen Prozessen, sind weitere Maßnahmen zur Reduktion der prozessbedingten CH₄- und N₂O-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 N₂O-Emissionsminderung wirksam. Die prozessbedingten CH₄- und N₂O-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 CO₂- und N₂O-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).

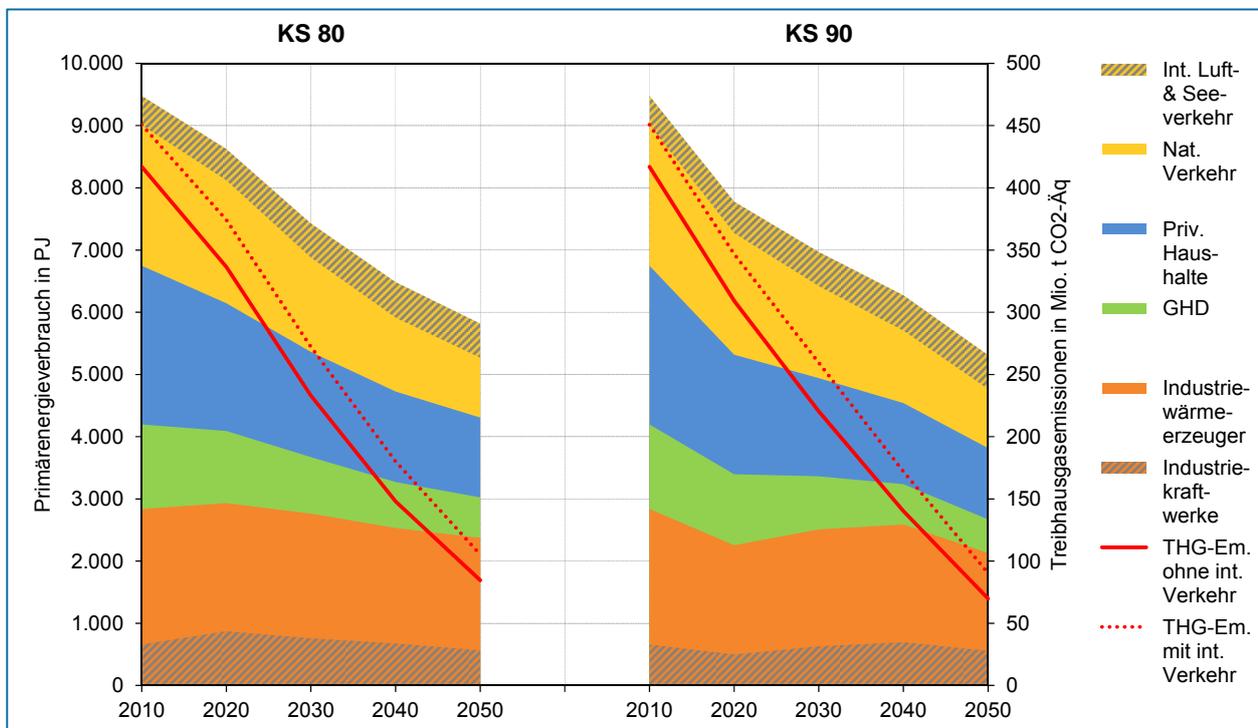
Um die Emission fluoriertener Treibhausgase (teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe, HFKW; perfluorierte Kohlenwasserstoffe, FKW; Schwefelhexafluorid, SF₆) zu reduzieren, werden in den Klimaschutzszenarien – zusätzlich zu den bereits beschlossenen Maßnahmen – eine Reihe von Einzelmaßnahmen angenommen: 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 SF₆ als Schutzgas in der Magnesiumproduktion. Im KS 90 wird zusätzlich auf SF₆ 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 Deponiegaseraffassung, 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 4-1: Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in den Endverbrauchssektoren



Quelle: Eigene Berechnungen

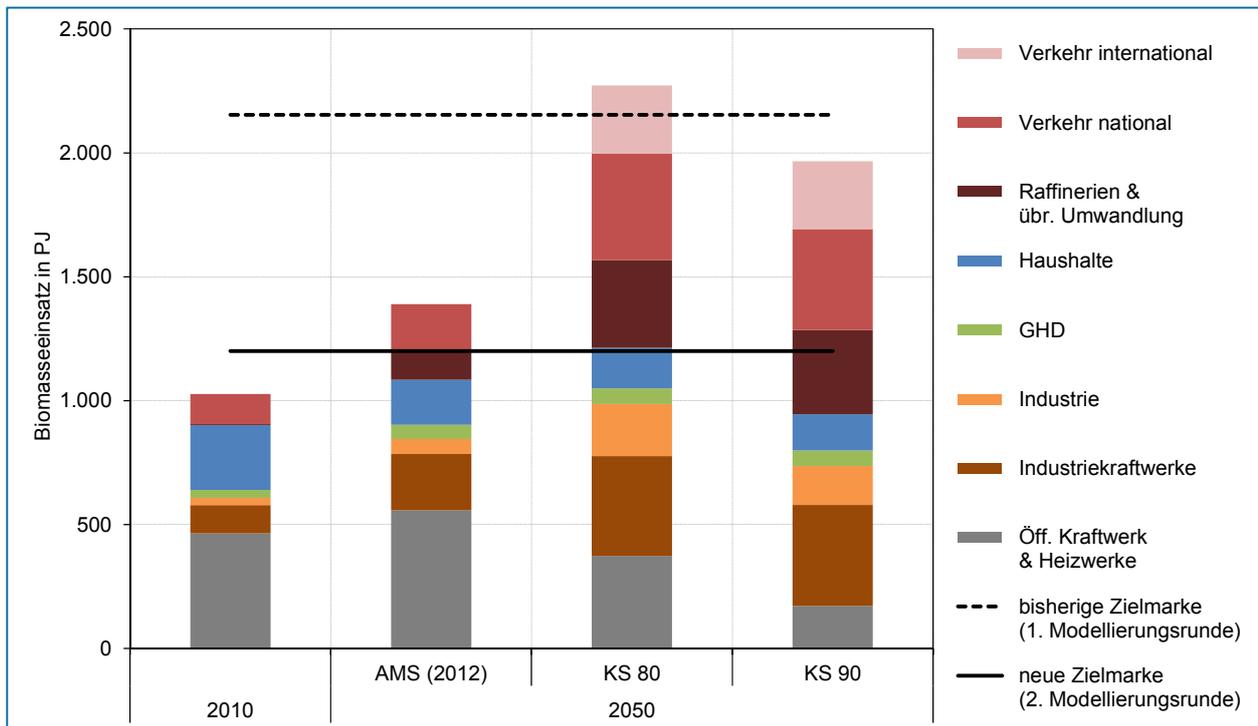
Da neben Energieeinsparung in den genannten Sektoren auch ein Wechsel hin zu emissionsarmen oder -freien Energieträgern stattfindet, ist der Rückgang der Treibhausgasemissionen mit 77 % (KS 80) bzw. 80 % größer als die Einsparung an Endenergie. Ohne Berücksichtigung des internationalen Verkehrs, dessen 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 4-2). 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 Fernwärmeerzeugung 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 Wärmebereitstellung 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 4-2: Energetische Nutzung von Biomasse im Vergleich

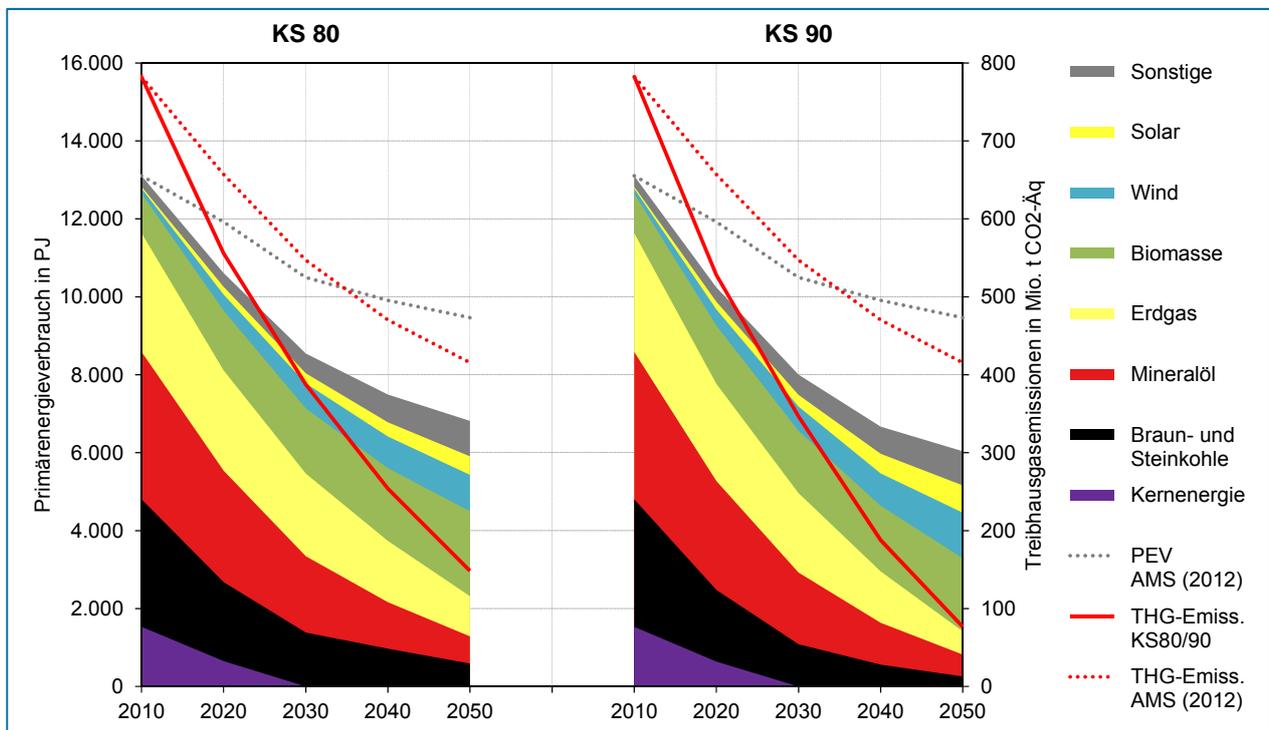


Quelle: Eigene Berechnungen

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 4-3: 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 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: 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 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.

Die Implementierung der Klimaschutzmaßnahmen bewirkt ein stärkeres Wachstum des Bruttoinlandsproduktes 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 Energiekonzeptziele

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.

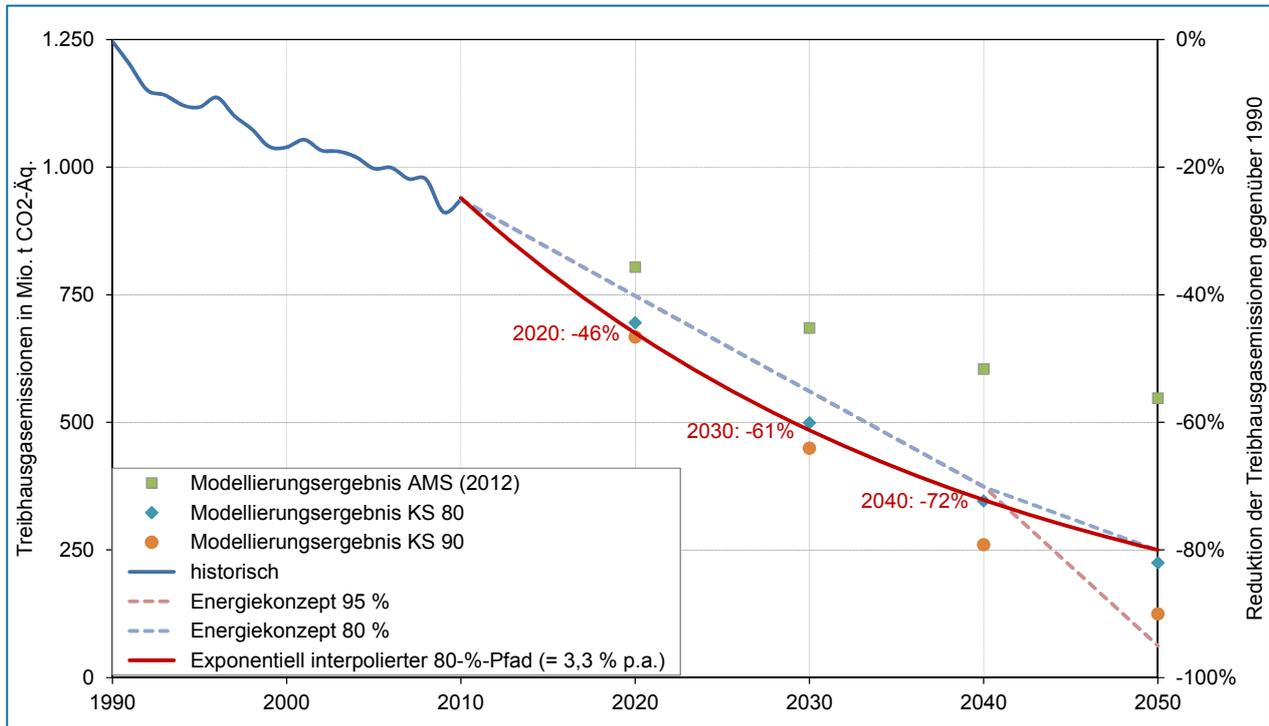
6.1. Klimaschutz: Ambitionierte Zwischenziele sind wichtig

Abbildung 6-1 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 6-1: 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 Endenergiebedarf¹⁴ (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.

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.

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.

Die Ergebnisse der Szenariorechnungen unterstreichen die Forderung nach einem klimaneutralen Gebäudebestands als Beitrag zum CO₂-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 CO₂-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 7-1 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 CO₂-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.

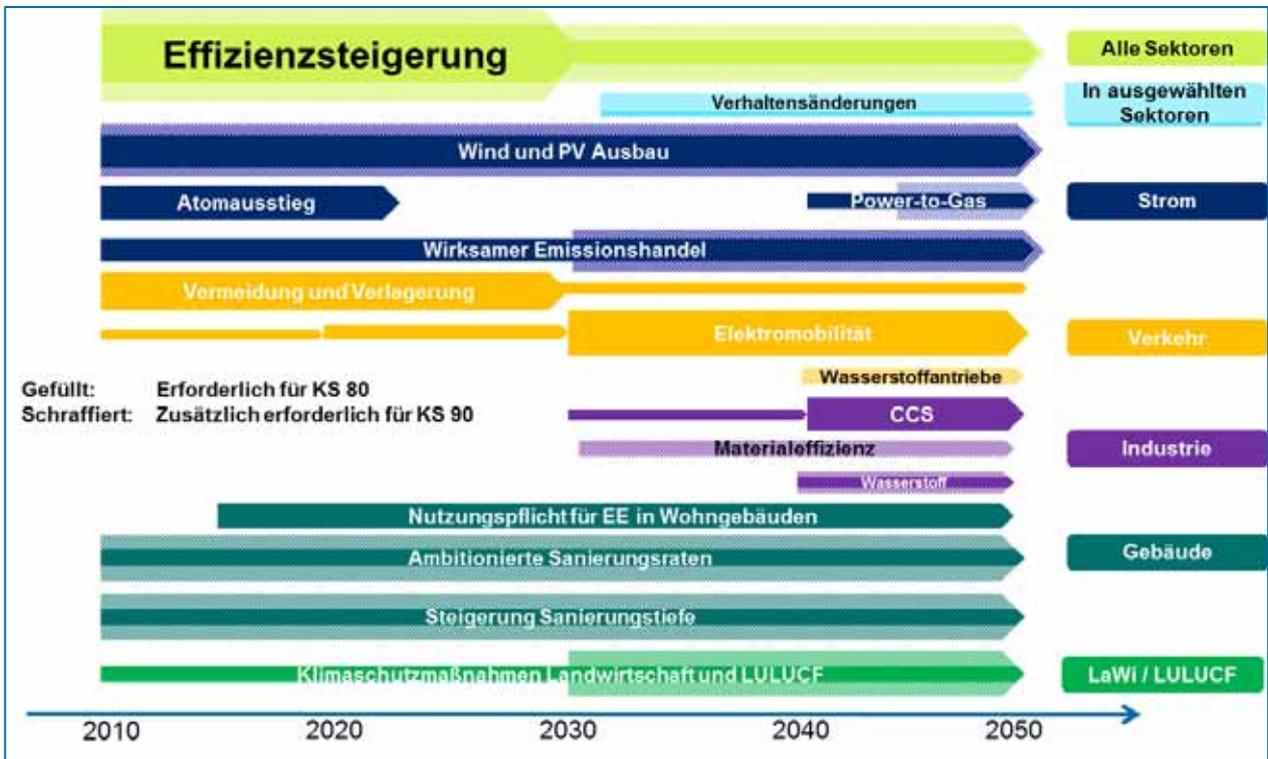
Für industrielle Verbraucher wird -- zusätzlich zu den kurz- bis mittelfristigen Effizienzsteigerungen – ab 2030 eine deutliche Steigerung der Materialeffizienz im KS 90 zu verzeichnen sein. Ab 2030 spielt bei der Vermeidung von Prozessemissionen in beiden Klimaschutzszenarien auch die Abscheidung und 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 7-1: 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 Klimaschutzziele 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.