

## Klimaschutzszenario 2050

Zusammenfassung des 2. Endberichts

Berlin, 26.11.2015

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

**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](http://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](http://www.isi.fhg.de)



**Bearbeitet von**

**Öko-Institut e.V.**

|                  |                      |
|------------------|----------------------|
| Julia Repenning  | Hauke Hermann        |
| Lukas Emele      | Wolfram Jörß         |
| Ruth Blanck      | Sylvie Ludig         |
| Günter Dehoust   | Charlotte Loreck     |
| Hannah Förster   | Margarethe Scheffler |
| Benjamin Greiner | Katja Schumacher     |
| Ralph Harthan    | Kirsten Wiegmann     |
| Klaus Henneberg  | Carina Zell-Ziegler  |

**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     |

**Hans-Joachim Ziesing**

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis                                     | 5         |
| Tabellenverzeichnis                                       | 5         |
| <b>1. Einleitung</b>                                      | <b>6</b>  |
| <b>2. Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele</b>    | <b>9</b>  |
| <b>3. Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen</b> | <b>10</b> |
| <b>4. Beitrag der Sektoren zur Zielerreichung</b>         | <b>16</b> |
| 4.1. Energiewirtschaft und Industriekraftwerke            | 16        |
| 4.1.1. Stromverbrauch                                     | 16        |
| 4.1.2. Stromerzeugung                                     | 18        |
| 4.1.3. Übrige Energiewirtschaft und flüchtige Emissionen  | 22        |
| 4.2. Gebäudebereich – Wärmebereitstellung                 | 23        |
| 4.3. Haushalte und GHD – Geräte und Prozesse              | 26        |
| 4.4. Industrie  | 28        |
| 4.4.1. Energieverbräuche und energiebedingte Emissionen   | 28        |
| 4.4.2. Industrieprozesse                                  | 30        |
| 4.5. Verkehr  | 32        |
| 4.6. Landwirtschaft und LULUCF                            | 35        |
| 4.6.1. Landwirtschaft                                     | 35        |
| 4.6.2. LULUCF   | 38        |
| <b>5. Bedarf an erneuerbaren Energien</b>                 | <b>41</b> |
| <b>6. Ökonomische Aspekte stringenten Klimaschutzes</b>   | <b>46</b> |
| 6.1. Ökonomische Auswirkungen                             | 46        |
| 6.2. Finanzierung von Klimaschutz                         | 48        |
| <b>7. Fazit</b>   | <b>50</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Abbildung 2-1: | Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele für das Jahr 2050, Zielmarke 80%-Minderung  | 9  |
| Abbildung 3-1: | Gesamte Treibhausgasemissionen (ohne LULUCF und ohne internationalen Luft- und Seeverkehr), 2010-2050  | 11 |
| Abbildung 3-2: | Relative Minderung der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990   | 12 |
| Abbildung 3-3: | Gesamte Treibhausgasemissionen (ohne LULUCF und ohne internationalen Luft- und Seeverkehr), 1990-2050  | 15 |
| Abbildung 4-1: | Veränderung des Stromverbrauchs im KS 80 und KS 95, 2008-2050  | 17 |
| Abbildung 4-2: | Stromerzeugung und Stromimport im KS 80 und KS 95, 2010-2050   | 21 |
| Abbildung 4-3: | Energieverbrauch der Gebäude im KS 80 und KS 95, 2008-2050   | 24 |
| Abbildung 4-4: | Veränderung des Endenergieverbrauchs von Geräten und Prozessen in privaten Haushalten, 2010-2050   | 27 |
| Abbildung 4-5: | Veränderung des Endenergieverbrauchs von Geräten und Prozessen im GHD-Sektor 2020 bis 2050 im Vergleich zu 2010  | 28 |
| Abbildung 4-6: | Veränderung des Endenergieverbrauchs sowie Reduktion der THG-Emissionen im Sektor Industrie 2020 bis 2050 im Vergleich zu 2010   | 29 |
| Abbildung 4-7: | Veränderung des Endenergieverbrauchs sowie Reduktion der THG-Emissionen im Verkehr im KS 80 und KS 95 (ohne internationalen Luft- und Schiffsverkehr) 2020 bis 2050 im Vergleich zu 2010 | 33 |
| Abbildung 4-8: | Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft im KS 80 und im KS 95   | 36 |
| Abbildung 4-9: | Treibhausgasemissionen und -einbindung im LULUCF-Sektor im KS 80 und KS 95, 2010-2050  | 40 |
| Abbildung 5-1: | Entwicklungen der erneuerbaren Anteile am Energieverbrauch in den Szenarien im Vergleich zu den Zielpfaden des Energie- und Klimaschutzkonzepts, 2010-2050                               | 41 |
| Abbildung 5-2: | Entwicklungen der erneuerbaren Stromerzeugung und des Bruttostromverbrauchs, 2010-2050   | 42 |
| Abbildung 5-3: | Entwicklung des Primärenergieverbrauchs, 2010-2050   | 44 |
| Abbildung 5-4: | Vergleich der inländisch verfügbaren und der eingesetzten Biomasse im Jahr 2050 in den verschiedenen Szenarien   | 45 |

## Tabellenverzeichnis

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Tabelle 1-1: | Zieldatensatz des Energiekonzepts 2010/2011 bzw. des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und Rahmenvorgaben für die Klimaschutzszenarien | 7  |
| Tabelle 3-1: | Treibhausgasemissionen 1990 und 2050 sowie relative Emissionsreduktionen zwischen 1990 und 2050                                    | 10 |

## 1. Einleitung

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 Transformation eine besondere Rolle zu. Sie sind angesichts ihrer langen Industrialisierungsgeschichte überwiegend verantwortlich für den bereits eingetretenen wie auch den absehbaren Klimawandel. Gleichzeitig verfügen sie insbesondere 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 in den letzten Jahren im Bereich der Klima- und Energiepolitik sehr weitreichende langfristige Ziele gesetzt und mit dem im September 2010 veröffentlichten Energiekonzept und den weitergehenden energiepolitischen Beschlüssen aus 2011 zur Energiewende für die Bereiche Klimaschutz, Energie und Verkehr erste Schritte für die Erarbeitung entsprechender Umsetzungsstrategien für den Zeithorizont bis zur Mitte des Jahrhunderts unternommen. Die Bundesregierung hat im Dezember 2014 ein Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 mit zusätzlichen Maßnahmen beschlossen, damit das Treibhausgasminderungsziel von 40% bis 2020 im Vergleich zu 1990 sicher erreicht werden kann. Darüber hinaus plant die Bundesregierung für 2016 einen Klimaschutzplan 2050 zu erarbeiten, der die weiteren Reduktionsschritte im Lichte der europäischen Ziele und der Ergebnisse der Pariser Klimaschutzkonferenz 2015 bis zum Ziel im Jahr 2050 beschreibt und in einem breiten Dialogprozess mit Maßnahmen unterlegt. Aktuell findet dazu ein breiter Dialog- und Beteiligungsprozess statt.

Mit dem Projekt „Klimaschutzszenario 2050“ soll das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit in diesem Prozess unterstützt werden.

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. Die Ergebnisse der zweiten Modellierungsrunde sollen unter anderem wissenschaftliche Grundlage für die Erarbeitung des Klimaschutzplans 2050 sein.

Die Ergebnisse der ersten Modellierungsrunde wurden im August 2014 veröffentlicht. Die Ergebnisse der zweiten Modellierungsrunde liegen nun vor und werden hier beschrieben. Es 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 1-1: Zieldatensatz des Energiekonzepts 2010/2011 bzw. des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und Rahmenvorgaben für die Klimaschutzszenarien**

|       | Senkung Treibhausgasemissionen | Erneuerbare Anteile |                      | Senkung Energieverbrauch |                            |                    |                      | Steigerung Energieproduktivität |
|-------|--------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|
|       |                                | Bruttoendenergie    | Bruttostromverbrauch | Primärenergie            | Gebäude-Wärme <sup>a</sup> | Endenergie Verkehr | Bruttostromverbrauch |                                 |
| 2020  | min. -40%                      | 18%                 | 35%                  | -20%                     | -20%                       | -10%               | -10%                 | 2,1% p.a.                       |
| 2025  |                                |                     | 40% bis 45%          |                          |                            |                    |                      |                                 |
| 2030  | min. -55%                      | 30%                 | 50%                  |                          |                            |                    |                      |                                 |
| 2035  |                                |                     | 55% bis 60%          |                          |                            |                    |                      |                                 |
| 2040  | min. -70%                      | 45%                 | 65%                  |                          |                            |                    |                      |                                 |
| 2045  |                                |                     |                      |                          |                            |                    |                      |                                 |
| 2050  | -80% bis -95%                  | 60%                 | 80%                  | -50%                     | -80%                       | -40%               | -25%                 |                                 |
| Basis | 1990                           |                     |                      | 2008                     | 2008                       | 2005               | 2008                 | 2008                            |

<sup>a</sup> Minderung Endenergiebedarf im Jahr 2020, Minderung nichterneuerbarer Primärenergiebedarf im Jahr 2050

Quelle: BMU (2011)<sup>1</sup>, §1 EEG (2014)

Folgende Szenarien wurden in der zweiten Modellierungsrunde 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.
- 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 das Mindestziel einer Minderung von 80% in Ansatz gebracht wird.
- Das Klimaschutzszenario 95 (KS 95): In diesem Szenario sollte bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 95 % gegenüber 1990 erreicht werden.

In der ersten Modellierungsrunde wurde ebenfalls ein AMS (2012) und ein KS 80 erstellt (mit identischen Definitionen wie in der zweiten Runde), statt eines KS 95 wurde aber ein weniger

<sup>1</sup> BMU (2011): Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011. Berlin, Oktober 2011.

ambitioniertes Klimaschutzszenario 90 (KS 90) mit einer Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 um 90 % gegenüber 1990 modelliert.

In der zweiten Modellierungsrunde wurden im Vergleich zur ersten Modellierungsrunde eine Reihe von Anpassungen und Optimierungen vorgenommen:

- Die demographischen und gesamtwirtschaftlichen Rahmendaten sowie die Entwicklung der Primärenergiepreise und Treibhausgaszertifikatepreise wurden aktualisiert.
- Verschärfung des THG-Minderungszieles für das Jahr 2050 von 90% auf 95%: In der zweiten Modellierungsrunde wird analysiert, wie die Obergrenze des im Energiekonzept formulierten Minderungsziels der Bundesregierung umgesetzt werden kann. Dieser zusätzliche Vermeidungsschritt stellt für die meisten Sektoren eine anspruchsvolle Aufgabe dar.
- Die THG-Minderungsziele von 80% sowie 95% werden diesmal sowohl ohne als auch mit Einbeziehung von internationalem Luft- und Seeverkehr und von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (Land use, land-use change and forestry, LULUCF) erreicht.
- Die Ausbaupfade für erneuerbare Stromerzeugung wurden nicht auf die Vorgaben der Leitstudie beschränkt, sondern sie wurden konsistent zu den Szenario-Daten im Rahmen der Modellierung ermittelt.
- Die Nachhaltigkeitsanforderungen für die Nutzung von Biomasse wurde grundlegend überarbeitet. Dies resultiert (gegenüber den Szenarien in der ersten Modellierungsrunde) nahezu in einer Halbierung des verfügbaren Biomassepotenzials.

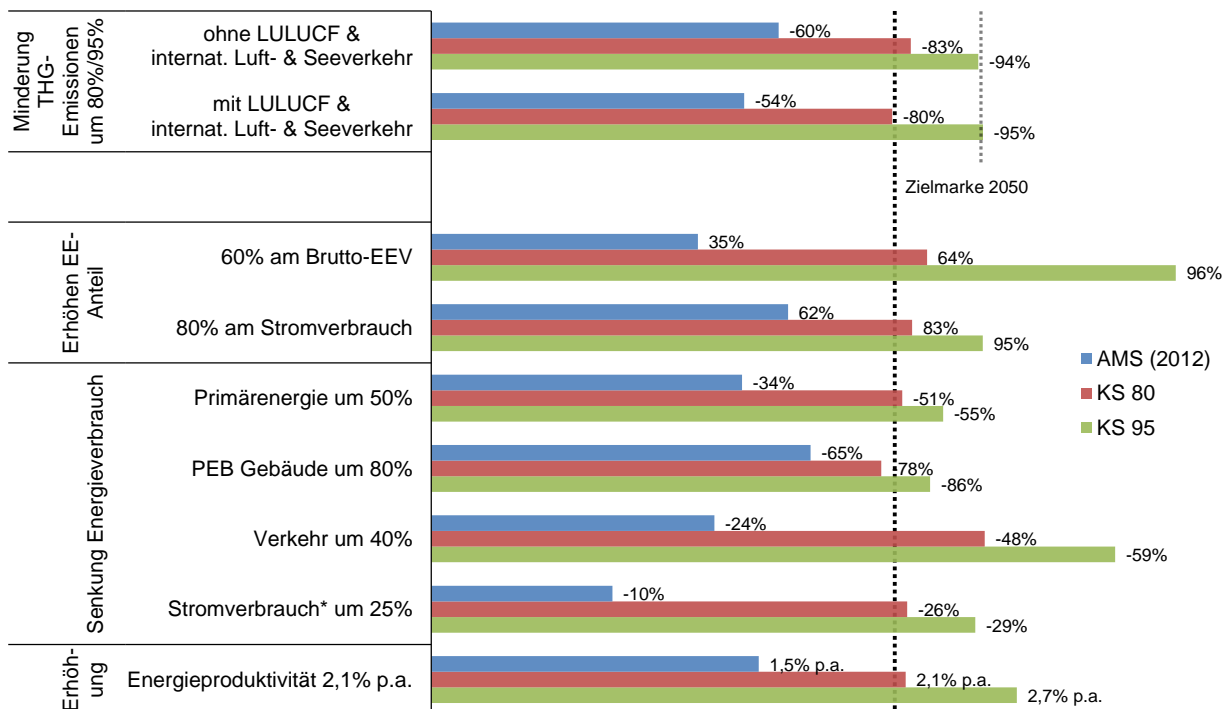
Eine vollständige und detaillierte Darstellung aller Ergebnisse und Szenarien sowie der vollständigen Beschreibung der verwendeten Methodik findet sich in der Langfassung der Studie. In der hier vorliegenden Zusammenfassung werden nur die wesentlichen Ergebnisse der beiden Klimaschutzszenarien (KS 80 und KS 95) präsentiert. Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele. Kapitel 3 stellt die Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen dar. Kapitel 4 diskutiert die wesentlichen Entwicklungen in den einzelnen Sektoren sowie deren Beitrag zur Zielerreichung. In Kapitel 5 ist der Bedarf an erneuerbaren Energien innerhalb der Szenarien sowie die Entwicklung des gesamten Primärenergieverbrauchs dargestellt. In Kapitel 6 werden die ökonomischen Auswirkungen der Klimaschutzszenarien sowie Fragen der Finanzierung diskutiert. Im letzten Kapitel 7 werden Schlussfolgerungen gezogen und daraus wichtige Anhaltspunkte für Meilensteine und Politikinstrumente abgeleitet.



## 2. Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele

Eine vergleichende Darstellung darüber, welche Ziele für das Jahr 2050 in welchem Szenario unter- oder übertroffen werden, bietet Abbildung 2-1.

**Abbildung 2-1: Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele für das Jahr 2050, Zielmarke 80%-Minderung**



Anmerkung: \* klassischer Stromverbrauch ohne neue Verbrauchergruppen (Wärmepumpen, Elektro-Straßenfahrzeuge, CCS, Power-to-Gas/-Liquid für Endverbraucher, Power-to-Heat für Fernwärmenetze);

LULUCF = Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (Land use, land-use change and forestry), EEV = Endenergieverbrauch, PEB = Primärenergiebedarf

Quelle: Modellierungsergebnisse von Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Im AMS (2012), welches die Entwicklung der Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen auf Basis der derzeit existierenden Politiken und Maßnahmen widerspiegelt, werden für 2050 alle Energieziele verfehlt und folglich auch das Klimaschutzziel nicht erreicht. Die Erhöhung des erneuerbaren Anteils am Bruttostromverbrauch sowie die Reduktion des Primärenergiebedarfs der gebäude reichen noch am nächsten an das zu erreichende Ziel heran.

Im KS 80 werden die meisten Ziele für 2050 erreicht. Lediglich das Ziel der Senkung des nichterneuerbaren Primärenergiebedarfs der Gebäude wird mit einer Lücke von 2 Prozentpunkten verfehlt. Im Gegenzug dazu wird das Ziel der Senkung des Endenergieverbrauchs im Verkehr um 8 Prozentpunkte übererfüllt. In ihrer Gesamtwirkung scheinen die Energieziele das Klimaschutzziel der Senkung der Treibhausgasemissionen um 80 % gegenüber dem Jahr 1990 gut zu stützen.

Um das Ziel einer Reduktion der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 95 % gegenüber 1990 zu erreichen, müssen im KS 95 alle Ziele deutlich übererfüllt werden. Einerseits fällt die Zielübererfüllung im Verkehr (Senkung des Endenergieverbrauchs um 59 % statt um 40 %) sehr

hoch aus. Andererseits verdeutlichen die Ergebnisse des KS 95, dass die Treibhausgasemissionen nur dann um insgesamt 95 % absinken können, wenn die erneuerbaren Anteile am Bruttoendenergie- sowie am Bruttostromverbrauch deutlich überschritten werden (96 % statt 60 % beim Bruttoendenergieverbrauch und 95 % statt 80 % beim Bruttostromverbrauch). Aus den insgesamt höheren Endenergieeinsparungen im KS 95 ergibt sich, dass auch das Ziel der Steigerung der Energieproduktivität deutlich übertroffen wird.

### 3. Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen

Der Zeitnahabschätzung des Umweltbundesamts zufolge wurde im Jahr 2014 bereits eine Reduktion der Treibhausgasemissionen in der klassischen Abgrenzung<sup>2</sup> um 338 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. bzw. 27 % gegenüber 1990 erreicht. In dieser Abgrenzung sind allerdings die Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) sowie die Emissionen aus dem internationalen zivilen Luft- und Seeverkehr klassischerweise ausgeklammert und werden nur nachrichtlich angeführt. Unter Berücksichtigung der Emissionen aus dem internationalen zivilen Luft- und Seeverkehr lag die Emissionsminderung im Jahr 2014 bei 306 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq., was lediglich 25 % entspricht. Werden zusätzlich noch die Emissionen aus dem Sektor LULUCF berücksichtigt, lag die Emissionsminderung im Jahr 2014 bei 322 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq., was lediglich 26 % entspricht. Tabelle 3-1 sowie Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 geben einen Überblick über die Minderungen der Treibhausgasemissionen in den verschiedenen Sektoren bis 2050.

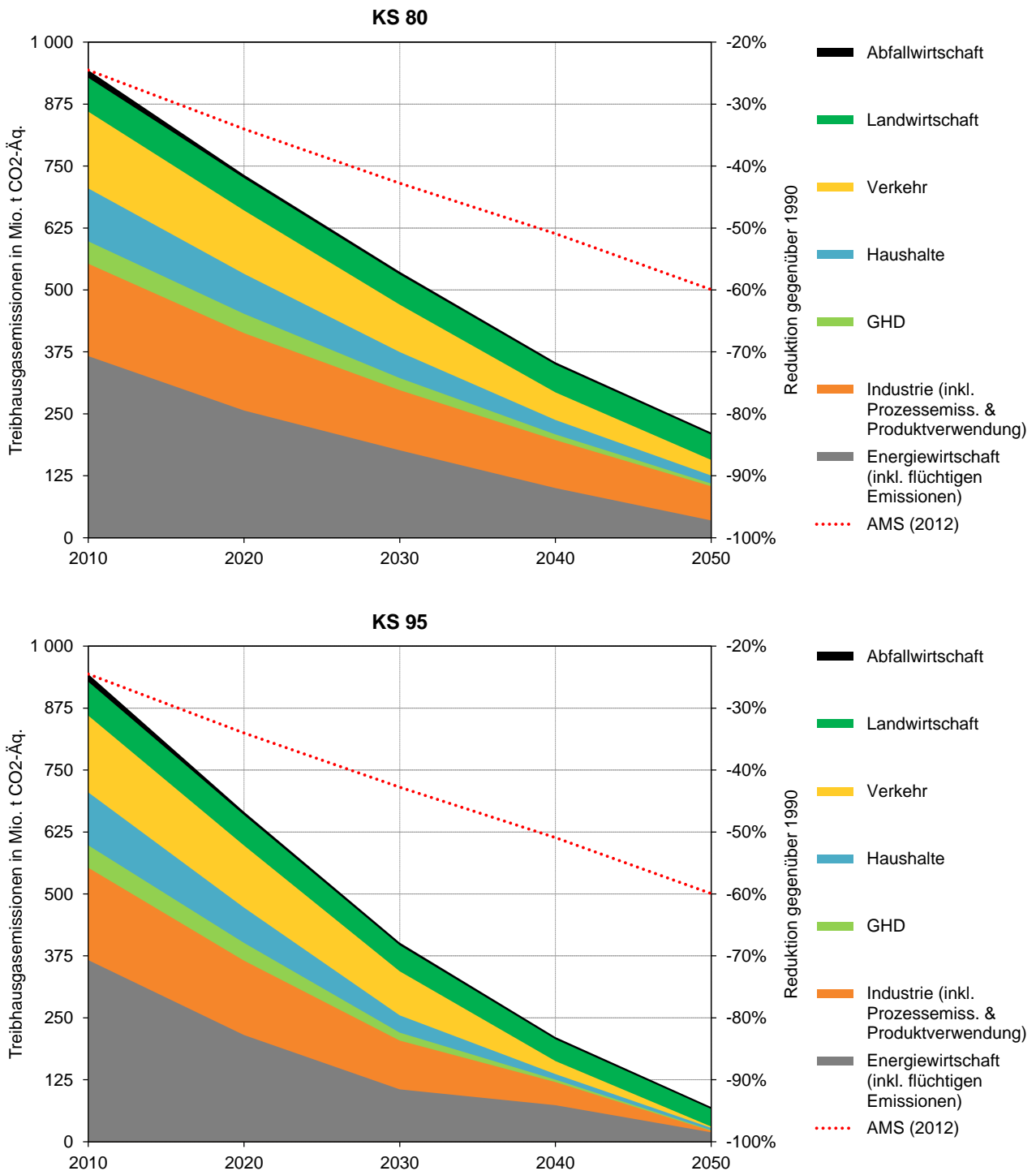
**Tabelle 3-1: Treibhausgasemissionen 1990 und 2050 sowie relative Emissionsreduktionen zwischen 1990 und 2050**

| Sektor  | 1990           | 2050                        |              |             | Änderung                       |               |               |
|---|----------------|-----------------------------|--------------|-------------|--------------------------------|---------------|---------------|
|   |                | AMS (2012)                  | KS 80        | KS 95       | AMS (2012)                     | KS 80         | KS 95         |
|   |                | Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq. |              |             | %                              |               |               |
| Energiewirtschaft                               | 428,1          | 169,7                       | 33,2         | 18,6        | -60,4%                         | -92,2%        | -95,7%        |
| Industrie                                       | 177,3          | 74,9                        | 33,9         | -3,5        | -57,7%                         | -80,9%        | -102,0%       |
| GHD   | 88,7           | 10,2                        | 5,4          | 1,3         | -88,5%                         | -93,9%        | -98,5%        |
| Haushalte                                       | 131,5          | 23,2                        | 16,2         | 4,6         | -82,4%                         | -87,7%        | -96,5%        |
| Verkehr   | 164,7          | 89,6                        | 31,5         | 2,7         | -45,6%                         | -80,9%        | -98,4%        |
| Flüchtige Emissionen aus Energie                | 30,1           | 2,4                         | 1,6          | 0,4         | -91,9%                         | -94,6%        | -98,7%        |
| Industrieprozesse                               | 94,2           | 55,4                        | 36,4         | 4,6         | -41,1%                         | -61,3%        | -95,1%        |
| Produktverwendung                               | 4,5            | 1,9                         | 1,9          | 1,9         | -58,6%                         | -58,6%        | -58,6%        |
| Landwirtschaft                                  | 88,0           | 68,4                        | 51,1         | 35,5        | -22,2%                         | -42,0%        | -59,6%        |
| Abfallwirtschaft                                | 43,2           | 5,1                         | 4,2          | 3,9         | -88,2%                         | -90,2%        | -91,0%        |
| <b>Gesamt</b>                                   | <b>1.250,3</b> | <b>500,8</b>                | <b>215,5</b> | <b>70,0</b> | <b>-59,9%</b>                  | <b>-82,8%</b> | <b>-94,4%</b> |
| <i>Nachrichtlich:</i>                           |                |                             |              |             |                                |               |               |
| Internat. ziviler Luft- & Seeverkehr            | 20,1           | 52,3                        | 35,6         | 12,2        | +159,5%                        | +76,8%        | -39,5%        |
| LULUCF  | -35,8          | 14,7                        | 1,3          | -23,0       | keine sinnvolle Angabe möglich |               |               |
| <b>Gesamt inkl. nachrichtlich</b>               | <b>1.234,6</b> | <b>567,8</b>                | <b>252,4</b> | <b>59,1</b> | <b>-54,0%</b>                  | <b>-79,6%</b> | <b>-95,2%</b> |
| <b>Gesamt inkl. int. Luft- &amp; Seeverkehr</b> | <b>1.270,4</b> | <b>553,1</b>                | <b>251,1</b> | <b>82,1</b> | <b>-56,5%</b>                  | <b>-80,2%</b> | <b>-93,5%</b> |

Farbschema: Grün = Erreichen des 80 bzw. 95 %-igen Minderungsziels, Rot = Unterschreitung des 80 bzw. 95 %-igen Minderungsziels  
 Quelle: Eigene Berechnungen

<sup>2</sup> Im Rahmen des Kyoto-Protokolls werden in nationalen Treibhausgasinventaren und Emissionsreduktionszielen die Emissionen des internationalen Luft- und Schiffsverkehrs nicht berücksichtigt. LULUCF wird bisher nur teilweise angerechnet.

**Abbildung 3-1: Gesamte Treibhausgasemissionen (ohne LULUCF und ohne internationalen Luft- und Seeverkehr), 2010-2050**

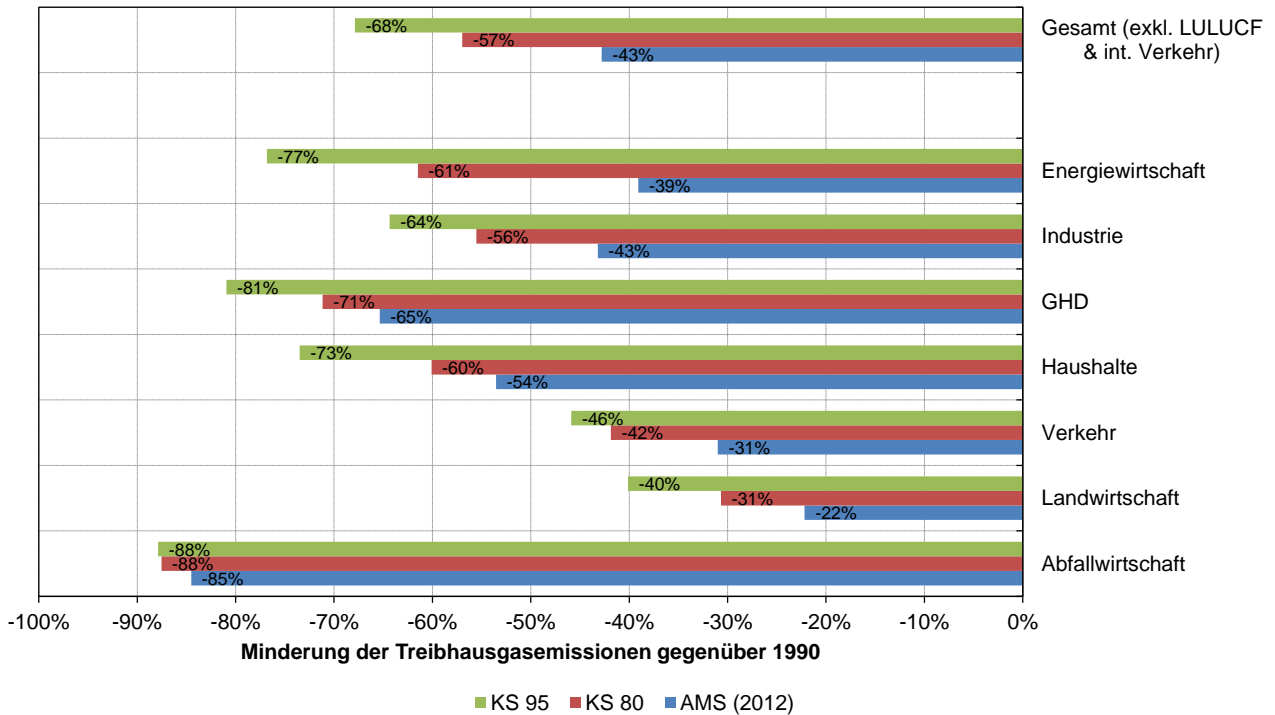


Anmerkung: Die absoluten Treibhausgasemissionen auf der linken Achse sind äquivalent zu den relativen Minderungen auf der rechten Achse.

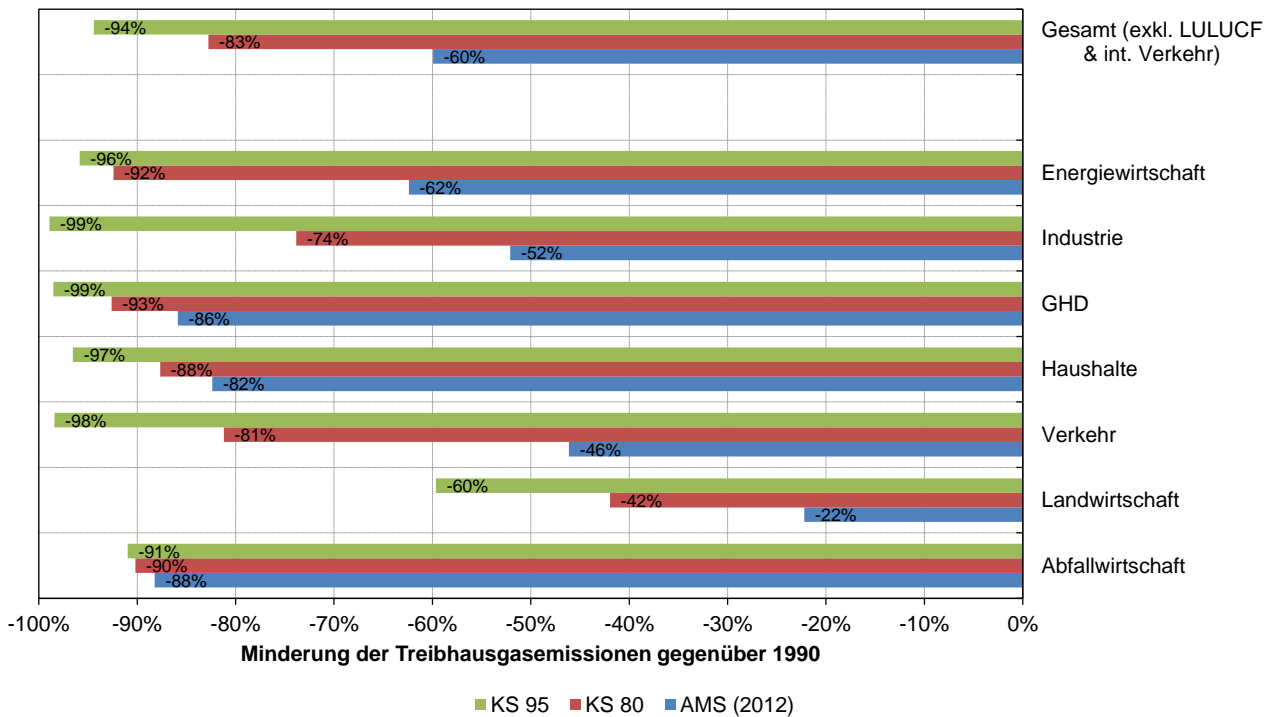
Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3-2: Relative Minderung der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990

2030



2050



Anmerkung: Die Sektoren sind in dieser Abbildung entsprechend dem Klimaschutzaktionsprogramm aggregiert. Daher unterscheiden sich die dargestellten Prozentwerte von den in Tabelle 3-1 dargestellten Werten.

Quelle: Eigene Berechnungen

Im [Aktuelle-Maßnahmen-Szenario \(2012\)](#) sind die Emissionsminderungen in den einzelnen Sektoren sehr unterschiedlich. Die Energiewirtschaft, die 1990 die größte Emissionsquelle darstellte, leistet zwar mit einer Reduktion von 258 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. den absolut größten Minderungsbeitrag, die Reduktion entspricht jedoch lediglich 60 % gegenüber 1990. Die Emissionsminderungen der übrigen Sektoren sind sehr unterschiedlich und reichen von nur 22 % in der Landwirtschaft bis hin zu 92 % bei den flüchtigen Emissionen aus der Energienutzung. Die Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr liegen um 160 % höher als im Jahr 1990. War der LULUCF-Sektor im Jahr 1990 netto noch eine Emissionssenke, ist er im Jahr 2050 eine deutliche Emissionsquelle.

Insgesamt werden im AMS (2012) Emissionsreduktionen von 60 % gegenüber 1990 in der Kyoto-Abgrenzung erzielt, was deutlich unter dem Klimaschutzziel der Bundesregierung in Höhe von 80 bis 95 % Treibhausgasminderung liegt. Unter Berücksichtigung der deutlich steigenden Emissionen aus dem Deutschland zuzurechnenden internationalen Luft- und Schiffsverkehrs sowie den Treibhausgasemissionen aus dem Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF), werden nur noch Emissionsreduktionen von 54 % gegenüber 1990 erzielt.

Im [Klimaschutzszenario 80](#) können die meisten Sektoren ihre Emissionen bis 2050 gegenüber 1990 um 80 % bis 95 % reduzieren, wobei die stärksten relativen Reduktionen im Bereich der flüchtigen Emissionen des Energiesektors (–95 %), im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) (–94 %) und Energiewirtschaft (–92 %) stattfinden. Deutlich geringere relative Reduktionen finden hingegen in den Sektoren Landwirtschaft (–42 %), Produktverwendung (–59 %) und Industrieprozesse (–61 %) statt. Die Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr liegen um 77 % höher als im Jahr 1990.

Die größten absoluten Emissionsreduktionen muss die Energiewirtschaft (Kraft- und Heizwerke, Raffinerien und ähnliches) mit einer Reduktion um 395 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. gegenüber 1990 erbringen. Davon entfallen allein 301 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. auf die Kraftwerke der öffentlichen Stromversorgung. Die zweitgrößten absoluten Reduktionen kommen aus der Industrie; die verbrennungs- und prozessbedingten Emissionen werden hier um zusammen 204 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. reduziert. Bedeutende absolute Reduktionsbeiträge kommen auch aus dem Verkehr, den privaten Haushalten und aus der Landwirtschaft.

In Summe wird im KS 80 bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 83 % gegenüber 1990 erreicht. Unter Berücksichtigung des internationalen Luft- und Schiffsverkehrs wird eine Reduktion um 80 % erreicht. Wenn auch noch LULUCF berücksichtigt wird, werden Reduktionen um knapp 80 % gegenüber 1990 erzielt.

Im [Klimaschutzszenario 95](#) werden weitergehende Emissionsreduktionen erzielt. Dabei tragen einige Sektoren überdurchschnittlich zur Reduktion bei.

Die Energiewirtschaft reduziert die THG-Emissionen in diesem Bereich um 410 Mio t CO<sub>2</sub>-Äq., was einer Reduktion um 96 % gegenüber 1990 entspricht. Davon entfallen 319 Mio t CO<sub>2</sub>-Äq. auf die Kraftwerke der öffentlichen Versorgung. Die flüchtigen Emissionen des Energiesektors sinken sogar um fast 99 %.

Die Emissionen aus der Industrie insgesamt sinken um 270 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq., was einer Reduktion um über 99 % entspricht. Da in diesem Sektor teilweise Biomasseeinsatz und CCS kombiniert wird, sinken die energiebedingten Emissionen der Industrie um 102 %, es entsteht damit sogar eine leichte Emissionssenke. Die prozessbedingten Industrieemissionen sinken um 95 %.

Die Emissionen des GHD-Sektors und des inländischen Verkehrs sinken um etwa 98 %, die Emissionen der privaten Haushalte um 97 %. Die Emissionen der Abfallwirtschaft hingegen sinken nur um 91 %, die der Landwirtschaft nur um 60 % und die der Produktverwendung nur um 59 %. Die Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr können um 39 % gegenüber dem Jahr 1990 gesenkt werden.

Die mit Abstand größten absoluten Emissionsreduktionen im KS 95 gegenüber dem KS 80 treten im Bereich der Industrie (zusätzliche Reduktion um 34 Mio t. CO<sub>2</sub>-Äq. aus energiebedingten und 32 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. aus prozessbedingten Emissionen) und im Verkehr (zusätzliche Reduktion um 29 Mio t CO<sub>2</sub>-Äq. im inländischen Verkehr und 23 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. im internationalen Luft- und Seeverkehr) auf. Eine besondere Bedeutung hat auch die Reduktion um 24 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. im Bereich LULUCF, wodurch der LULUCF-Sektor zur Nettoemissionsenke wird.

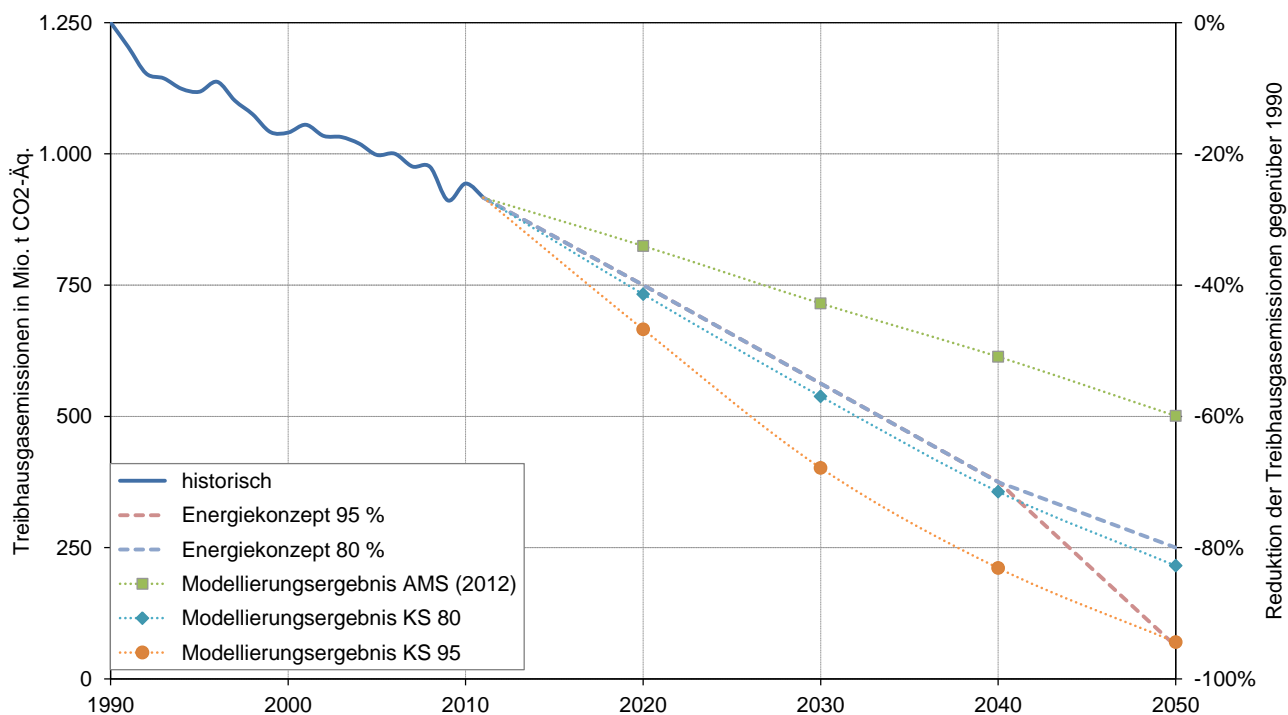
Die Sektoren mit Reduktionen von deutlich mehr als 95 % kompensieren mit ihren überdurchschnittlichen Emissionsreduktionen die Emissionen der Sektoren Landwirtschaft und internationaler Luft- und Seeverkehr, aber auch Abfallwirtschaft und Produktverwendung, die nur unterdurchschnittliche Reduktionsbeiträge aufweisen, um insgesamt bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 95 % gegenüber 1990 zu erzielen.

Die Zwischenziele zur Senkung der Treibhausgasemissionen für die Jahre 2020, 2030 und 2040 sind als Mindestziele im Energiekonzept festgelegt worden (Minderung um jeweils mindestens 40 % bzw. 55 % bzw. 70 %). In diesem Zeitraum bedeutet der Minderungspfad eine Reduktion um 15 Prozentpunkte pro Dekade. Das Minderungsziel für das Jahr 2050 hingegen weist eine Spanne auf (Minderung um 80 bis 95 %). Um von einer Minderung von 70 % ausgehend im Jahr 2040 zu einer Minderung von 95 % im Jahr 2050 entsprechend dem ambitionierten Zielpfad zu gelangen, ist eine Minderung um 25 Prozentpunkte innerhalb einer Dekade (siehe Abbildung 3-3) von Nöten.

Um das Ziel einer Reduktion der THG-Emissionen von 95 % bis 2050 zu erreichen, muss eine Minderung von 80 % bereits zwischen den Jahren 2035 und 2040 erzielt werden, um nicht zwischen 2040 und 2050 überproportional hohe Emissionsminderungen im Vergleich zu den vorhergehenden Dekaden erzielen zu müssen. In beiden Klimaschutzszenarien zeigt sich zudem (wie auch schon in der ersten Modellierungsrunde), dass sich die Minderungen nach 2040 abschwächen. Der Verlauf des KS 95 ist durch anspruchsvolle Wegmarken für die Treibhausgasreduzierung von 65 bis 70 % für 2030 und 80 bis 85 % für das Jahr 2040 gekennzeichnet, um eine THG-Minderung von 95 % im Jahr 2050 zu erreichen. Das KS 95 weist entsprechend bereits 2020 deutlich höhere Minderungen auf, als das KS 80 und erst recht als das AMS (2012), das im Jahr 2050 nur eine Minderung von etwa 60% gegenüber dem Jahr 1990 erzielt.

Die Szenarien zeigen also, dass der vorgegebene Mindestzielpfad für die Jahre 2020 bis 2040 ausreichend ist, um eine Minderung von 80 % bis zum Jahr 2050 zu erreichen. Um allerdings eine Minderung von 95 % bis zum Jahr 2050 zu erreichen, müssen die vorgegebenen Mindestziele deutlich übererfüllt werden.

**Abbildung 3-3: Gesamte Treibhausgasemissionen (ohne LULUCF und ohne internationalen Luft- und Seeverkehr), 1990-2050**



Quelle: UBA (historische Werte) und eigene Berechnungen (Szenarien)

## 4. Beitrag der Sektoren zur Zielerreichung

### 4.1. Energiewirtschaft und Industriekraftwerke

Im Folgenden werden die wesentlichen Treiber und Entwicklungen in der Energiewirtschaft dargestellt. Abschnitt 4.1.1 beschreibt zunächst die wesentlichen Effekte auf der Nachfrageseite (Stromverbrauch). Die Entwicklung der Stromerzeugungsseite wird in Abschnitt 4.1.2 dargestellt. Abschnitt 4.1.3 schließlich umfasst die wesentlichen Treiber und Effekte im Bereich der übrigen Energiewirtschaft.

#### 4.1.1. Stromverbrauch

In allen Szenarien zeigt der Stromverbrauch zwei gegenläufige Trends: Zunächst sinkt die Nachfrage der „klassischen Stromverbraucher“ durch Effizienzmaßnahmen, später kommen jedoch „neue Stromverbraucher“ hinzu, die die anfänglichen Einsparungen kompensieren und im KS 95 sogar übertreffen. Die neue Nachfrage entsteht vor allem durch Elektrifizierungsmaßnahmen in Endverbrauchssektoren (z. B. Elektromobilität und Wärmepumpen), die in einem deutlich längeren Zeithorizont wirksam sind als die Effizienzmaßnahmen. Es ist sinnvoll, diese Entwicklungen getrennt zu diskutieren, um die ökonomischen Signale eines zunächst sinkenden Stromverbrauchs richtig zu interpretieren und den langfristigen Strukturwandel im Blick zu behalten.

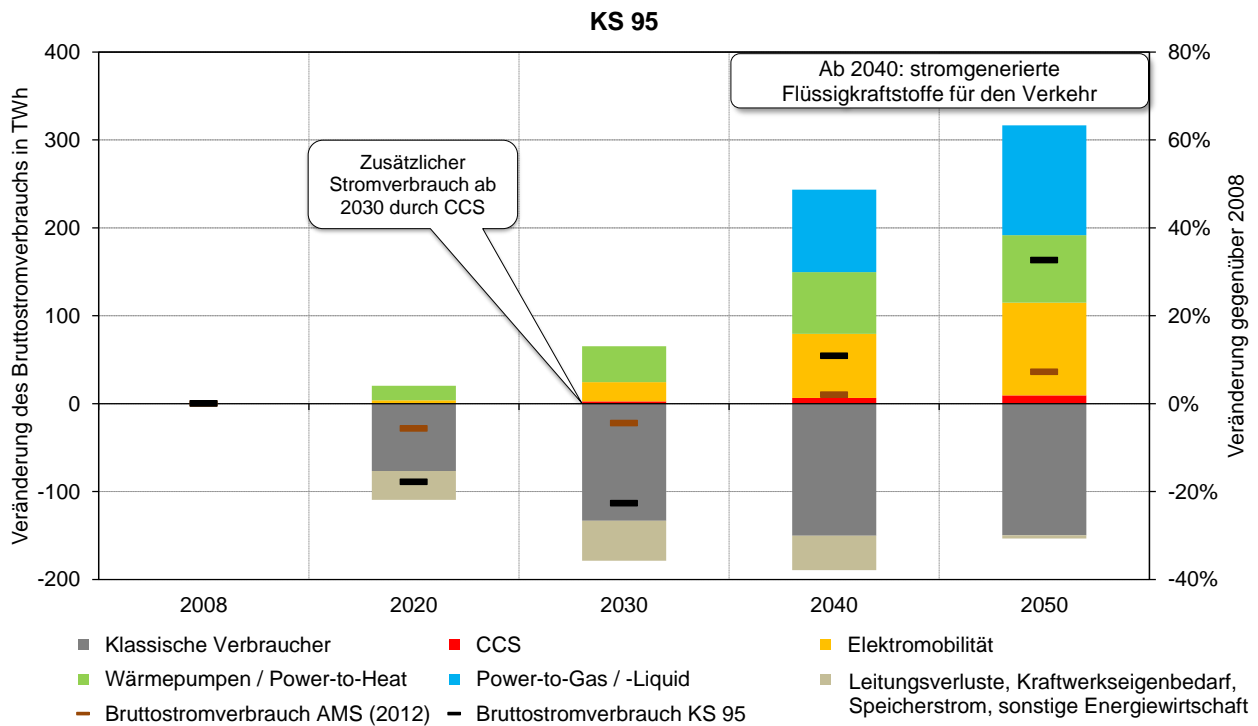
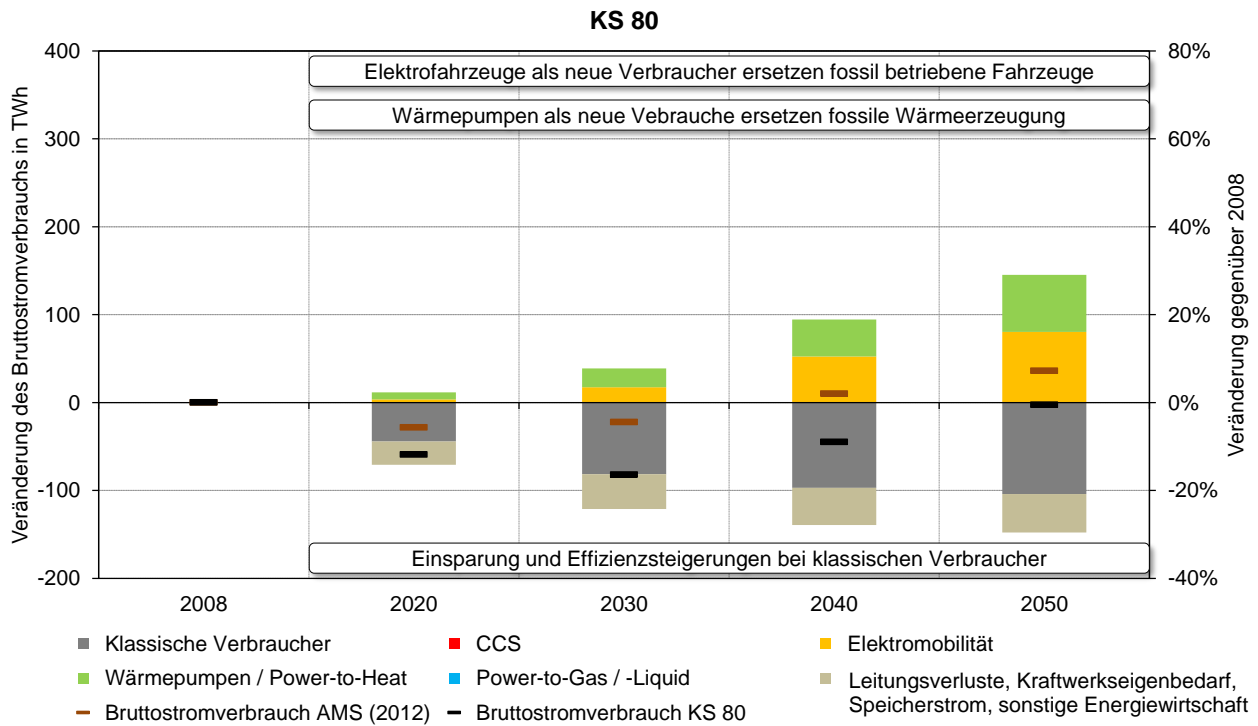
Die Entwicklung ist in den Szenarien ähnlich, aber unterschiedlich stark ausgeprägt. Im AMS (2012) sinkt der Bruttostromverbrauch von 2008 bis 2020 um 4 %, liegt aber 2050 wieder um 6 % über dem Ausgangswert. In den beiden Klimaschutzszenarien wird das Minimum 2030 erreicht (–13 % im KS 80, –18 % im KS 95). Im KS 80 wird die Einsparung durch neue Verbraucher, die nach 2030 hinzukommen, bis 2050 ungefähr ausgeglichen. Drastischer ist die Entwicklung der neuen Verbraucher im KS 95: Der Bruttostromverbrauch liegt 2050 um 27 % über dem Wert von 2008.

Das Gewicht der neuen Verbraucher hängt von Elektrifizierungsmaßnahmen in anderen Sektoren ab. Im KS 95 machen die neuen Verbraucher 2050 44 % des gesamten Stromverbrauchs aus, wovon etwa drei Viertel auf den Verkehr (direkt als Elektromobilität und indirekt über synthetische Kraftstoffe) und etwa ein Fünftel auf die Wärmebereitstellung für die Sektoren Industrie, GHD und Haushalte (direkt als Wärmepumpen und indirekt als Elektrokessel in Wärmenetzen) entfallen. Im KS 80 bzw. AMS (2012) hingegen haben die neuen Verbraucher nur einen Anteil von 25 % bzw. 15 %.

Abbildung 4-1 stellt die Veränderung des Stromverbrauchs klassischer und neuer Stromverbraucher im KS 80 und im KS 95 gegenüber 2008 dar. Zum Vergleich wird jeweils die Entwicklung des Bruttostromverbrauchs im AMS (2012) gegenübergestellt.



Abbildung 4-1: Veränderung des Stromverbrauchs im KS 80 und KS 95, 2008-2050



Anmerkung: Die im KS 95 angegebenen Maßnahmen sind jeweils zusätzlich zu den im KS 80 angegebenen.

Quelle: Eigene Berechnungen

Im KS 80 reduziert sich im Bereich der klassischen Stromverbraucher der Bruttostromverbrauch durch Effizienzsteigerung zwischen 2010 und 2050 um 105 TWh. Darüber hinaus reduzieren sich die sonstigen Verbräuche<sup>3</sup> um ca. 45 TWh. Auf der anderen Seite kommt es zu einer sehr deutlichen Zunahme der Elektromobilität (um 80 TWh) sowie des Einsatzes von Wärmepumpen, Elektrokessel in Wärmenetzen sowie Power-to-Heat (um ca. 65 TWh). Die Stromverbrauchs-senkung durch klassische Verbraucher wird so vollständig kompensiert.

Im KS 95 beträgt die entsprechende Einsparung im klassischen Verbrauch 150 TWh. Die sonstigen Verbräuche reduzieren sich nur um ca. 5 TWh. Auf der anderen Seite steht eine stärkere Zunahme bei Elektromobilität (ca. 105 TWh) und Wärmepumpen/Power-to-Heat (ca. 75 TWh). Hinzu kommt als größter Einzelposten eine zusätzliche Nachfrage für stromgenerierte Kraftstoffe (125 TWh). Wegen des sehr hohen Anteils der erneuerbaren Energien muss mehr Strom gespeichert werden, dies geschieht im KS 95 auch in synthetischen Gasen (Wasserstoff und Methan), die dann wieder rückverstromt werden. Zudem sind aufgrund der insgesamt höheren Stromnachfrage auch die Netzverluste höher, weswegen die direkt der Energiewirtschaft zuzuordnenden Stromverbräuche in Summe wieder in etwa auf dem Stand von 2010 sind. Trotz einer größeren Nettominderung bis 2030 (minus 115 TWh) ist die Nachfrage 2050 um 165 TWh höher als 2010.

#### 4.1.2. Stromerzeugung

Wie im Zusammenhang mit den Emissionszielen erwähnt, muss die Deckung der Stromnachfrage bis zum Jahr 2050 weitreichend (KS 80) bzw. fast vollständig (KS 95) CO<sub>2</sub>-neutral erfolgen. Abbildung 4-2 stellt die Anteile verschiedener Energieträger im Zeitverlauf für das KS 80 und das KS 95 dar. Entsprechend der sich wandelnden Stromnachfrage verändert sich auch die Gesamterzeugung. Beiden Klimaschutzszenarien gemeinsam ist ein frühzeitiger und anhaltend starker Ausbau der erneuerbaren Energien. Bis 2030 hat sich dadurch der Strommix bereits drastisch gewandelt und die Windkraft ist in beiden Szenarien der wichtigste Stromerzeuger. Die Photovoltaik erreicht den zweiten Platz.

Es besteht eine Wechselwirkung zwischen Verbrauchsminderung und Erneuerbaren-Ausbau, die in Bezug auf die Erneuerbaren-Ausbauziele des Energiekonzepts<sup>4</sup> wichtig ist: Der Anteil der Erneuerbaren im Strommix wächst in den Szenarien (auch im Referenzszenario) überproportional, da der Stromverbrauch bis 2030 zunächst durch Effizienzmaßnahmen sinkt und die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien linear wächst. Dies hat zur Folge, dass das Ausbaziel von 50 % des Bruttostromverbrauchs im Jahr 2030 erheblich übererfüllt wird. Da ein großer Teil dieser Übererfüllung aber auf den Rückgang des Stromverbrauchs durch Effizienzmaßnahmen zurückzuführen ist, wird sie durch die langfristig wieder steigende Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-neutralem Strom (siehe Abschnitt 4.1.1) im KS 80 ausgeglichen.

2050 bewegt sich der Erneuerbaren-Anteil wieder in der Größenordnung der Zieldefinition, da sich die linearen Zubauraten in den Klimaschutzszenarien ausschließlich an der modellierten Stromnachfrage und den Emissionszielen für 2050 orientieren. Es wird also mit Blick auf die vorhersehbar steigende Stromnachfrage nicht von einer Stagnation, sondern einer konstant hohen

<sup>3</sup> Z. B. Verbräuche im Umwandlungssektor (z. B. Kokereien), Eigenverbrauch der Kraftwerke, Netzverluste sowie Speicherstromverbrauch.

<sup>4</sup> Das Energiekonzept (2010) definiert die Ziele als Anteil der Stromerzeugung aus EE am Bruttostromverbrauch: 35 % bis 2020, 50 % bis 2030, 65 % bis 2040 und 80 % bis 2050. Zusätzlich definiert § 1 EEG (2014) einen entsprechenden Zielkorridor von 40–45 % im Jahr 2025 und 55–60 % bis 2035.

Weiterführung des EE-Ausbaus ausgegangen, auch wenn die Zwischenziele im Jahr 2030 übererfüllt werden. Für die 95 %-ige Emissionsminderung im KS 95 sind auch 2050 höhere Erneuerbaren-Anteile als im Energiekonzept erforderlich.

Neue Kohlekraftwerke sind in beiden Klimaschutzszenarien über die bereits im Bau oder Planung befindlichen Kapazitäten hinaus nicht erforderlich, ebenso keine zusätzlichen Tagebaue oder Tagebauerweiterungen. Die Anwendung der Kohlenstoffdioxidabscheidung und -speicherung (CCS-Technik) wird im Kraftwerkbereich nicht benötigt.

Im [Klimaschutzszenario 80](#) sind folgende Effekte und wesentliche Treiber in Bezug auf die Stromerzeugung zu nennen:

- Die erneuerbaren Energien werden stark ausgebaut: Windkraft (von 38 TWh 2010 auf 344 TWh 2050) ist 2030 die wichtigste Stromquelle, Photovoltaik (von 12 auf 115 TWh) nimmt ebenfalls einen großen Anteil ein (13 %). Die Bedeutung von Biomasse nimmt deutlich ab, der Anteil der sonstigen Stromerzeugung (v. a. Wasserkraft, Geothermie und Müllverbrennung) bleibt ungefähr konstant. Der jährliche Anstieg der regenerativen Bruttostromerzeugung liegt insgesamt zwischen 7 und 15 TWh/a.
- Durch konstant hohe Zubauraten übertrifft der Erneuerbaren-Anteil 2030 und 2040 den Zielpfad vorübergehend um bis zu zehn Prozentpunkte, im Jahr 2050 liegt er dagegen durch die neuen Stromverbraucher nur noch um drei Prozentpunkte darüber (83 %).
- Der Anteil fossiler Energieträger sinkt von 352 TWh (2010) auf 26 TWh (2050) bei gleichzeitig zurückgehender CO<sub>2</sub>-Intensität (d.h. weniger Kohle, mehr Erdgas). Neben dem EE-Ausbau ist dafür ein wirksamer Emissionshandel (ETS) mit Vollauktionierung und Zertifikatspreisen von 130 €/EUA im Jahr 2050 verantwortlich<sup>5</sup>. Durch zusätzliche Kohlepolitik (Stilllegung einzelner Braunkohleblöcke bis 2020) halbiert sich die Braunkohle-Verstromung zwischen 2010 und 2030.
- War Deutschland im Jahr 2010 mit einem Saldo von 18 TWh noch ein Stromexporteur, so werden im Jahr 2050 61 TWh netto importiert. Es wird davon ausgegangen, dass in jedem Jahrzehnt ein Seekabel zur Anbindung norwegischer (Pump-)Speicherwasserkraftwerke installiert wird.
- Die Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung sinken um 88 % gegenüber 2010 (entspricht 91 % gegenüber 1990).

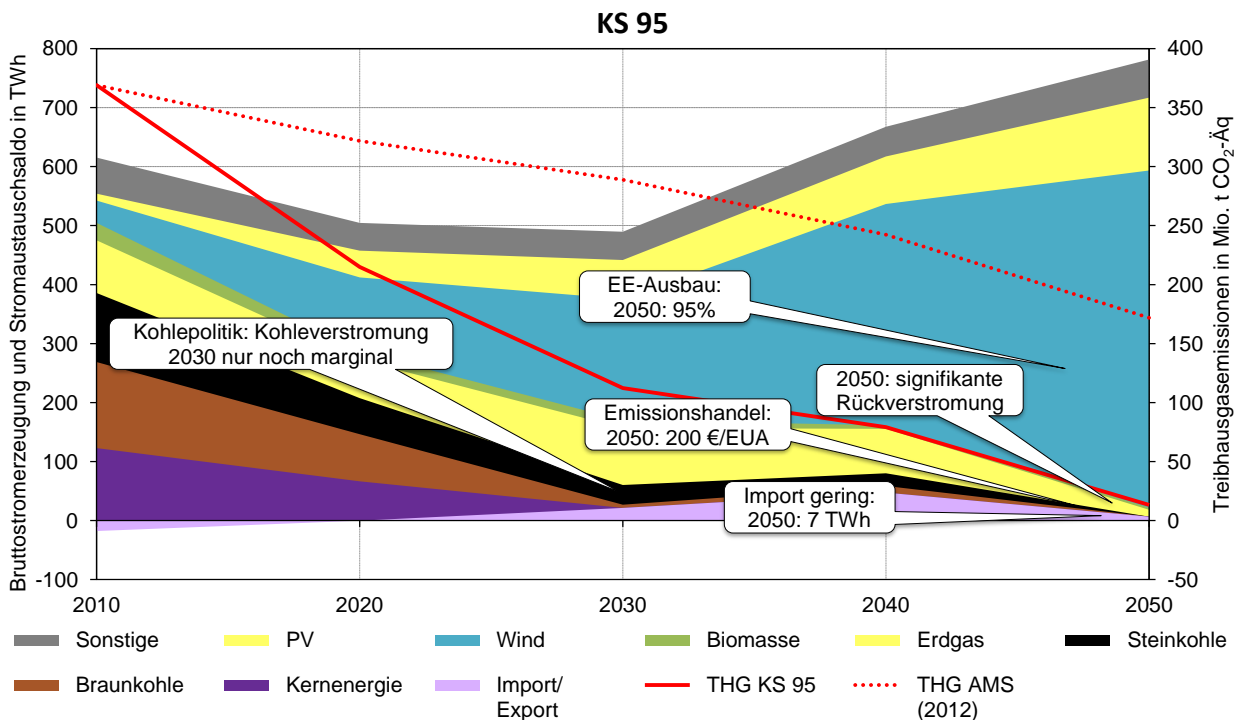
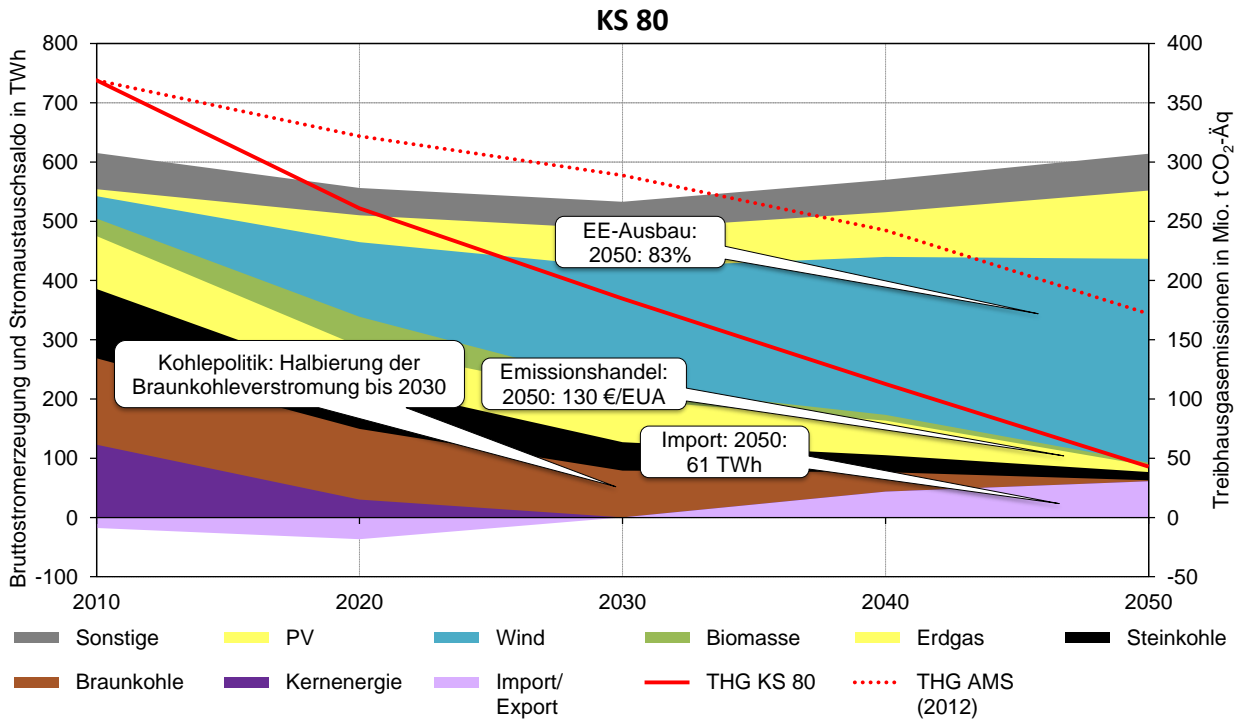
Im [Klimaschutzszenario 95](#) kommen folgende Maßnahmen verstärkt zum Tragen:

- Die erneuerbaren Energien werden noch stärker als im KS 80 ausgebaut. Auch hier ist Windkraft 2030 die wichtigste Stromquelle (von 38 TWh 2010 auf 572 TWh 2050). Photovoltaik wächst von 12 auf 123 TWh in 2050. Die Bedeutung von Biomasse nimmt deutlich ab.

<sup>5</sup> Es handelt sich hierbei um im Projekt festgelegte Modellparameter, die von den sich tatsächlich einstellenden Preisen abweichen können. Auch ist der CO<sub>2</sub>-Preis nur ein Treiber in einem Set von Politikmaßnahmen, die zur Erreichung der Ziele notwendig sind.

- Das Ziel des Energiekonzepts von 65 % Erneuerbaren-Anteil im Jahr 2040 wird eine volle Dekade früher erfüllt. Das 80%-Ziel im Jahr 2050 wird mit einem Anteil von 95 % regenerativer Stromerzeugung am Bruttostromverbrauch deutlich übertroffen.
- Die fossile Stromerzeugung geht bis zum Jahr 2050 auf nur noch etwas mehr als 12 TWh zurück. Die Kohleverstromung ist ab 2030 aufgrund einer weitreichenden Stromeinsparung, eines starken Ausbaus der erneuerbaren Energien sowie einer ambitionierten Kohlepolitik im Zusammenhang mit einem gestärkten Emissionshandel nur noch marginal und kommt 2050 vollständig zum Erliegen. Die Zertifikatspreise steigen bis 2050 stärker als im KS 80 auf 200 €/EUA an.
- Mit 7 TWh wird 2050 deutlich weniger Strom als im KS 80 importiert, da der stärkere Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland und die damit einhergehende hohe Stromerzeugung zu niedrigen Grenzkosten mögliche Importe aus dem europäischen Strommarkt verdrängt.
- Im KS 95 findet ab 2040 Rückverstromung von zuvor stromgeneriertem Wasserstoff und Methan statt. Stromgenerierte Gase machen 2050 rund die Hälfte des Brennstoffeinsatzes in den verbleibenden Erdgaskraftwerken aus.
- Da quasi keine fossile Stromerzeugung mehr stattfindet, sinken die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung um über 96 % gegenüber 2010 (entspricht 97% gegenüber 1990).

Abbildung 4-2: Stromerzeugung und Stromimport im KS 80 und KS 95, 2010-2050



Anmerkung: Die linke Achse bezieht sich auf die Stromerzeugung und den Stromauschussaldo, welche durch die Flächen dargestellt sind, die rechte Achse bezieht sich auf die THG-Emissionen, welche durch die Linien dargestellt sind.

Sonstige: Öl, Gichtgas, Kokereigas, Müll, Wasserkraft, Geothermie, Pumpspeicher und Rückverstromung Power-to-Gas

Quelle: Eigene Berechnungen

### 4.1.3. Übrige Energiewirtschaft und flüchtige Emissionen

Die übrige Energiewirtschaft umfasst die ungekoppelte Fernwärmeerzeugung, Mineralöl- und Biokraftstoffraffinerien und andere Bereiche des Umwandlungssektors (Braunkohlengruben, Steinkohlenzechen, Brikettfabriken, Kokereien, andere Umwandlungs- und Veredelungsanlagen). Erdgasverdichterstationen werden entsprechend der Struktur des Treibhausgasinventars nicht im Umwandlungssektor, sondern im Verkehr berücksichtigt.

Bemerkenswert ist der in den Klimaschutzszenarien höhere Energiebedarf der übrigen Energiewirtschaft gegenüber der Referenz. Er entsteht durch eine steigende Nachfrage nach netzgebundener Wärme und Biokraftstoffen. Gleichzeitig entfällt nach 2030 mit dem Rückgang der fossilen Stromerzeugung weitgehend die Möglichkeit zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), so dass auch dieser Energiebedarf in die übrige Energiewirtschaft verschoben wird. Insgesamt geht der Energiebedarf der übrigen Energiewirtschaft im AMS (2012) zwischen 2020 und 2050 um 11 % zurück, im KS 80 jedoch nur um 2 %. Im KS 95 ist der Energiebedarf 2050 wieder auf dem Niveau von 2020. Um die gewünschten Emissionsminderungen zu erzielen, wurde in den beiden Klimaschutzszenarien der Ausbau von Solarthermie ab 2030 angenommen, die 2050 eine installierte thermische Leistung von 35 GW (KS 80) bzw. 61 GW (KS 95) erreicht. Einen weiteren Beitrag leistet Power-to-Heat in Form von Elektrodenkesseln in Fernwärmenetzen.

Bei den THG-Emissionen entsteht ein weit größerer Unterschied zwischen dem AMS (-14 % bis 2050 gegenüber 1990) und den Klimaschutzszenarien (-84 % im KS 80, aber nur -72 % im KS 95). Die Unterschiede liegen im Mix der Energieträger begründet: Der Einsatz fossiler Brennstoffe geht in allen Szenarien stark zurück, jedoch deckt Erdgas im AMS (2012) noch die Hälfte des Bedarfs, in den Klimaschutzszenarien nur ein Fünftel (KS 95) bis ein Viertel (KS 80). Raffineriegas hat im AMS (2012) einen nennenswerten Anteil (14 %), in den Klimaschutzszenarien ist es wenig bedeutend. Dagegen decken dort die neuen Technologien Solarthermie und Power-to-Heat zusammen etwa die Hälfte des Energiebedarfs, während Biomasse (einschließlich Biogas) ein Viertel (KS 95) bis 40 % (KS 80) des Energieeinsatzes ausmacht.<sup>6</sup>

Dementsprechend sinkt auch der Energieverbrauch der Wärmeerzeuger in den Mineralölraffinerien, der von der Nachfrage nach Mineralölprodukten bestimmt wird, in den Klimaschutzszenarien erheblich um 79 % (KS 80) bzw. 91 % (KS 95) gegenüber 46 % im AMS (2012). Da die übrigen Wärmeerzeuger von der Biokraftstoffherstellung dominiert sind, liegen die Energieverbräuche dieser im AMS (2012) niedriger als in den Klimaschutzszenarien, in denen mehr Biokraftstoff eingesetzt wird.

Flüchtige Emissionen des Energiesektors entstehen zum größten Teil bei der Gewinnung und Verarbeitung fossiler Energieträger, ihre Entwicklung ist also von der Entwicklung der Kohle-, Gas- und Ölförderung in Deutschland dominiert. Da die Annahmen zum Auslaufen der Förderung von Steinkohle, Erdöl und Erdgas in den Szenarien identisch sind, ergeben sich nur kleine Unterschiede bei den Emissionen aus dem Abbau von Braunkohle, der Aktivität von Raffinerien sowie dem Transport von Erdgas entsprechend der unterschiedlichen Brennstoffnachfrage. Insgesamt gehen die flüchtigen Emissionen des Energiesektors im KS 80 bis 2050 um 88 % und im AMS (2012) um 83 % gegenüber 2005 zurück. Das KS 95 erzielt eine 97 %-ige Minderung.

<sup>6</sup> Im KS 95 wird auf Grund restriktiverer Biomassepotenziale deutlich weniger Biogas als im KS 80 eingesetzt.

## 4.2. Gebäudebereich – Wärmebereitstellung

Bis zum Jahr 2050 wird der Ersatz alter Gebäude durch neue Gebäude mit besserer Wärmedämmung etwa ein Drittel der Endenergie einsparen, die heute noch für Raumwärme und Warmwasser benötigt wird, wobei sich zwischen den Szenarien leichte Unterschiede ergeben. Diese Einsparungen werden in den Szenarien vor allem von den Mindestanforderungen in der EnEV getrieben.<sup>7</sup>

Die anderen zwei Drittel des Gebäudebestandes in 2050 werden bis dahin zu einem großen Teil saniert. Wie viel Energie in diesen Bestandsgebäuden eingespart wird, hängt davon ab, wie ambitioniert saniert wird und wie viele Gebäude saniert werden. Eine Kombination einer hohen Sanierungsrate mit einer ambitionierten Sanierungstiefe ist notwendig, 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 Endenergiebedarf von Wohn- und Gewerbegebäuden geht im Klimaschutzszenario 80 im Zeitraum von 2008 bis 2050 von 3.040 PJ auf 1.269 PJ zurück. Dies entspricht einer Reduktion um etwa 58 %. Im Klimaschutzszenario 95 sinkt er um 1.993 PJ auf 1.047 PJ. Die Reduktion beträgt hier 66 %. Es zeigt sich ein grundlegender Wandel in der Energieträgerstruktur.

Im Betrachtungszeitraum von 2008 bis 2050 sinkt der Endenergiebedarf im [Klimaschutzszenario 80](#) auf ein gutes Drittel ab, wie Abbildung 4-6 zeigt. In diesem Verlauf wird es zunehmend aufwendiger Energie einzusparen, da die jüngeren, also später zu sanierenden Gebäude bereits Wärmeschutzmaßnahmen enthalten. Daher nehmen die jährlichen Einsparungen im Verlauf der Zeit von ca. 500 PJ pro Dekade auf 300 PJ ab.

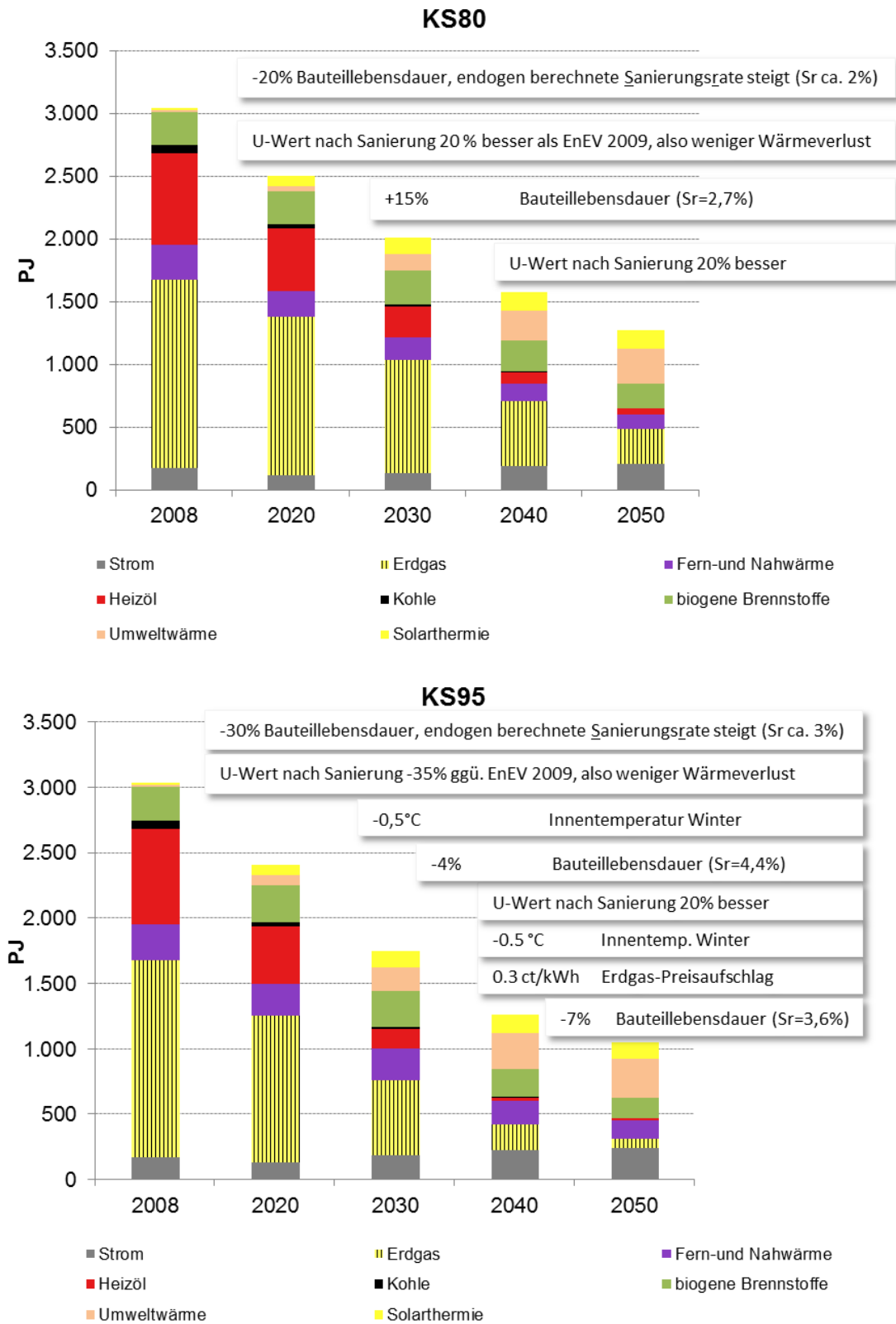
Die Energieträgerverteilung verschiebt sich stetig zu Erneuerbaren hin bis auf knapp 50 % in 2050. Der Strombedarf sinkt zunächst durch Einsparungen bis 2020. Im Anschluss führt der verstärkte Einsatz von Wärmepumpen jedoch dazu, dass er wieder wächst und in 2050 20 % mehr Elektrizität für Gebäudewärme benötigt wird als in 2008. Alle anderen konventionellen Energieträger, wie Heizöl und Kohle, werden aus dem Wärmemix verdrängt. Erdgas hingegen behält als einziger fossiler Energieträger mit einem Endenergieanteil von 22 % in 2050 weiterhin eine wichtige Rolle.

Die begrenzten zusätzlichen Endenergieeinsparungen im [Klimaschutzszenario 95](#) sind bezeichnend dafür, wie schwer weitere Minderungen des Energiebedarfes erreichbar sind. Der Endenergiebedarf sinkt bis 2050 im Vergleich zum KS 80 um weitere 8 %-Punkte, also um 66 % im Bezug zu 2008. Die Endenergieeinsparungen sind in der ersten Dekade etwa 17 % höher als im KS 80. In der letzten Dekade sind sie geringer als im KS 80. Diese Entwicklung weist darauf hin, dass im KS 95 Sanierungen zeitlich vorgezogen werden und das Einsparpotenzial so früher genutzt wird.

Auch der Anteil Erneuerbarer wächst im KS 95 und nimmt in 2050 55 % ein. Während Erdgas durch robuste Preissignale für fossile Energieträger stark auf 7 % schrumpft, wächst der Anteil an Strom auf 23 % und der Fernwärmeanteil auf 14 %.

<sup>7</sup> Derzeit werden ca. 40 bis 50 % der Wohnungsneubauten durch die KfW gefördert und übertreffen damit den EnEV Standard. Damit beruhen derzeit viele der tatsächlich realisierten Einsparungen im Neubaubereich nicht allein auf der EnEV, sondern auch auf den höheren KfW Standards.

Abbildung 4-3: Energieverbrauch der Gebäude im KS 80 und KS 95, 2008-2050



Anmerkung: Der Begriff Umweltwärme umfasst die Wärme, die durch Wärmepumpen der Umgebung entzogen und für Beheizung bzw. für die Warmwasserbereitstellung verwendet wird.

Quelle: Eigene Berechnungen



Folgende Kernergebnisse sind für den Gebäudebereich festzuhalten:

- Bis zum Jahr 2030 werden im KS 80 jährlich ca. 2 % der Gebäude saniert, während die Sanierungsrate<sup>8</sup> im KS 95 bei 3 % liegt. Der absolute Einsatz von Erneuerbaren unterscheidet sich zwischen den Szenarien wenig. Im Jahr 2030 stellen Erneuerbare 665 PJ im KS 95 und in ähnlicher Größenordnung 609 PJ<sup>9</sup> im KS 80 Wärme bereit. Im Gegensatz dazu ist die steigende Bedeutung von Strom für die Wärmebereitstellung bereits erkennbar. Der Primärenergiebedarf<sup>10</sup> für Strom liegt im KS 95 um 30 % (81 PJ) über dem KS 80.
- Aufgrund der Abhängigkeit der Zielerreichung von Sanierungsrate und Sanierungstiefe gilt es, diese Größen zunächst einmal zu erfassen und zu beobachten, um abweichende Trends frühzeitig zu erkennen, Hemmnisse aufzudecken und ihnen entgegenwirken zu können.
- Bei der notwendigen Energieträgersubstitution wirkt sich im KS 95 ein CO<sub>2</sub>-Aufschlag insbesondere auf den durch Erdgas gedeckten Endenergiebedarf aus. Im Energieträgermix ist im Jahr 2050 eine deutliche Minderung des Erdgasanteils sichtbar: von 300 PJ (20 %) im KS 80 auf 80 PJ (7 %) im KS 95. Dieser Wechsel wird durch einen massiven CO<sub>2</sub>-Aufschlag verursacht, der den Erdgaspreis ab 2014 im KS 95 im Schnitt jährlich um 3,6 % steigen lässt, während er im KS 80 um 2,4 % jährlich wächst. Durch diese Preisentwicklung wird Erdgas beispielsweise schon vor 2020 teurer als Fernwärme. Spätestens dann ist eine stetige Beobachtung der spezifischen einzelwirtschaftlichen Wärmebereitstellungspreise sowie der Marktdiffusion von Erneuerbaren notwendig. Dadurch kann die Wirkungsfähigkeit von Marktsignalen zur Verbreitung Erneuerbarer fortlaufend evaluiert und kontrolliert werden, um den angestrebten Zielkorridor erreichbar zu halten.
- Die Reduktion des Heizwärmebedarfs um 20 % wird weder im AMS (2012) noch im KS 80 bis 2020 erreicht, jedoch im KS 95. Die Reduktion der Endenergie um 18 % im KS 80 wird mit einer sehr optimistischen energetischen Sanierungsrate von 2,4 % zwischen 2015 und 2020 erreicht. Die Szenarien ergeben, dass eine Reduktion des Primärenergiebedarfs um 80 % bis 2050 durch einen Mix von Effizienzmaßnahmen und Energieträgersubstitution möglich ist, wenn die Erhöhung der energetischen Sanierungsrate von den avisierten 2 % auf 3,1 % steigt. Der verbleibende Primärenergiebedarf für fossile Energieträger liegt im KS 95 bei 182 PJ, also in etwa bei 5 % des Endenergiebedarfs von 2008. Weitere 1002 PJ werden durch Erneuerbare Energien erbracht und haben dann einen Anteil von 85 % am Primärenergiebedarf.
- Einen erhöhten Aufwand stellt die Erhebung von tatsächlichen Sanierungsraten und Sanierungstiefen dar, da die Daten – wenn überhaupt – lokal unterschiedlich erfasst werden. Eine Lösung wäre eine zentrale Datenbank, die institutionell so organisiert ist, dass deutschlandweit die Möglichkeit besteht, diese wichtigen Schlüsseldaten zu sammeln. Ohne verlässliche Daten wird die Fehlentwicklung erst viel später erkannt und auf Basis von Abschätzungen können meist keine durchgreifenden Maßnahmen umgesetzt werden.
- Es müssen weiterhin Anstrengungen / Instrumente / Maßnahmen umgesetzt werden, um die energetische Sanierungsrate auf den Zielpfad zu bringen. Die Mindestanforderungen an die

<sup>8</sup> Der Begriff der Sanierungsrate bezieht sich in den Szenarien auf die Vollsanierung der Gebäudehülle und ergibt sich indirekt über die Bauteillebensdauer.

<sup>9</sup> Primärenergie inklusive Erneuerbare ohne Berücksichtigung von Erneuerbaren in Strom und Fernwärme.

<sup>10</sup> Inklusive Erneuerbare

Sanierungstiefe wurden mit der EnEV 2014 nicht verändert. Um jedoch die Ziele zu erreichen, sind im Durchschnitt auch ambitioniertere Sanierungstiefen erforderlich.

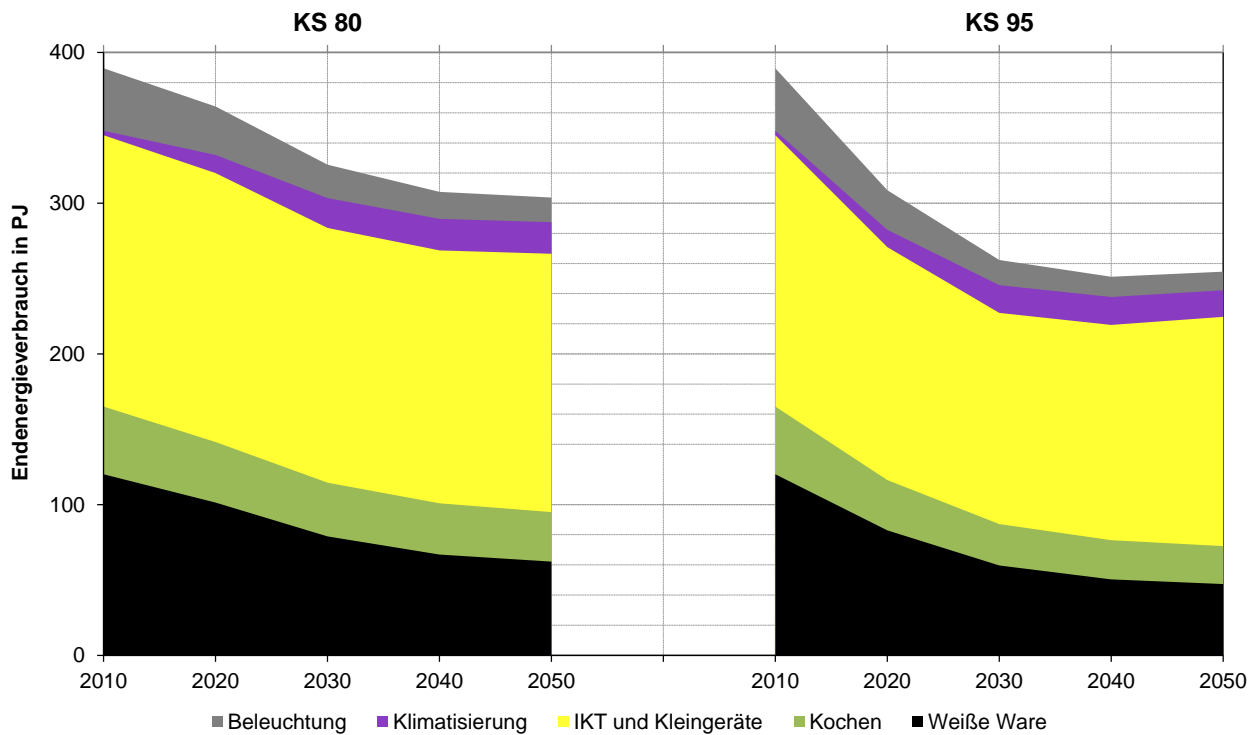
- Es werden Preissignale benötigt, um den benötigten Wechsel zu Erneuerbaren in der Breite zu bewirken. Langfristig bleibt Erdgas sonst dominant. Um dies sozial abzufedern/soziale Härten zu vermeiden, bieten sich gezielte Instrumente an.

### 4.3. Haushalte und GHD – Geräte und Prozesse

Im Sektor private Haushalte (Geräte – ohne Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung) kommt es im [Klimaschutzszenario 80](#) zu einem Rückgang der Endenergienachfrage um etwa 86 PJ (- 2 %) bis 2050 im Vergleich zu 2010. Die Endenergienachfrage basiert nahezu ausschließlich auf strombasierten Anwendungen bis auf Herde, die ebenfalls mit dem Energieträger Gas betrieben werden. Der stärkste Rückgang der Stromnachfrage in diesem Zeitraum ist auf die Weiße Ware (große elektrische Haushaltsgeräte) mit etwa 58 PJ und auf Beleuchtung mit 25 PJ zurückzuführen. Im Klimaschutzszenario 80 wirkt die Ökodesign-Richtlinie, wobei die Maßnahmen basierend auf den niedrigsten Lebenszykluskosten von den Entscheidungsträgern gewählt werden, die Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung und zusätzlich die Förderung von hocheffizienten (marktbesten) Geräten im Zusammenhang mit einer Rückgabe von Altgeräten.

Im [Klimaschutzszenario 95](#) kommt es in den privaten Haushalten zu einer zusätzlichen Einsparung von etwa 49 PJ in 2050 gegenüber dem Klimaschutzszenario 80. In beiden Szenarien kommen die selben energiepolitischen Maßnahmen zum Einsatz. Jedoch wird im Klimaschutzszenario 95 unterstellt, dass für die einzelnen Anwendungen neuere Effizienzklassen eingeführt werden. Zudem wird davon ausgegangen, dass sich die Entscheidungsträger stets für die effizienteste verfügbare Anwendung auf dem Markt entscheiden, sowohl im Fall von Neuinvestitionen als auch bei Ersatzinvestitionen. Dies führt in diesem Szenario zu einer frühzeitigen Erschließung der Effizienzpotenziale, wobei die Stromnachfrage bereits bis zum Jahr 2030 drastisch absinkt.

**Abbildung 4-4: Veränderung des Endenergieverbrauchs von Geräten und Prozessen in privaten Haushalten, 2010-2050**



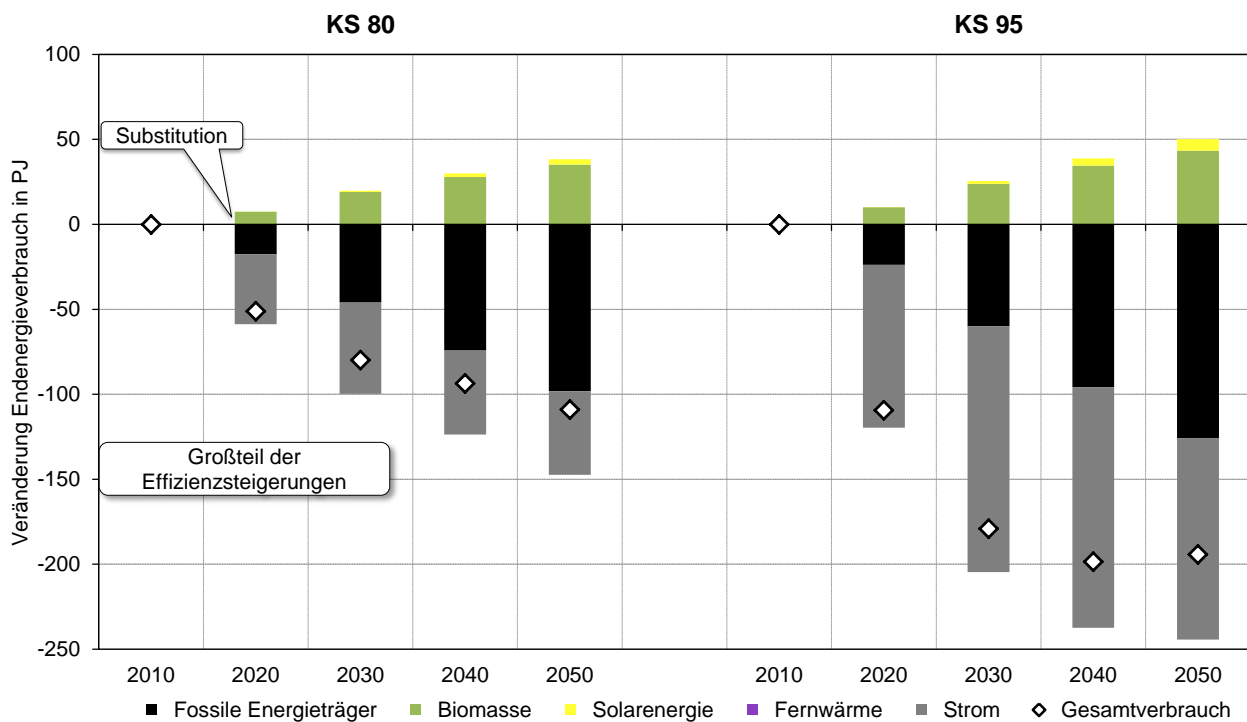
Quelle: Eigene Berechnungen

Im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistung (Geräte und Prozesse – ohne Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung) sind bereits im [Klimaschutzszenario 80](#) für das Erreichen der Stromeinsparziele sehr ambitionierte Einsparmaßnahmen umgesetzt. Entsprechend fällt der Strombedarf bis 2050 um etwa 10 % verglichen mit 2010. Dieser Rückgang spiegelt eine Umkehr des erwarteten Trends im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) wider.

Das [Klimaschutzszenario 95](#) zeigt bezüglich des Strombedarfs Einsparungen von 23 % verglichen mit dem Jahr 2010 und ist damit noch ambitionierter als das Klimaschutzszenario 80. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nochmals ambitioniertere Maßnahmen umgesetzt werden, selbst wenn diese aus Entscheiderperspektive nicht wirtschaftlich sind (jedoch nah an der Wirtschaftlichkeit). Diese Maßnahmen führen besonders in den Bereichen Beleuchtung sowie Lüftung und Klimatisierung zu zusätzlichen Einsparungen gegenüber dem KS 80.

Um diese zusätzlichen Einsparungen in den privaten Haushalten und im GHD-Sektor zu realisieren, wäre ein deutlich umfassenderer Mix an Politikinstrumenten zur Überwindung sämtlicher Hemmnisse notwendig, als dieser heute vorhanden ist. Für das Klimaschutzszenario 95 ist auch eine finanzielle Förderung notwendig, um unrentable Optionen für die Entscheidungsträger wirtschaftlich attraktiv zu machen. Auch müssten implementierte Mindeststandards und ähnliche Instrumente kontinuierlich an den technischen Wandel angepasst werden (beispielsweise in Form einer Top-Runner-Regelung) bzw. diesen sogar vorwärts treiben und ambitionierter gestaltet werden.

**Abbildung 4-5: Veränderung des Endenergieverbrauchs von Geräten und Prozessen im GHD-Sektor 2020 bis 2050 im Vergleich zu 2010**



Quelle: Eigene Berechnungen

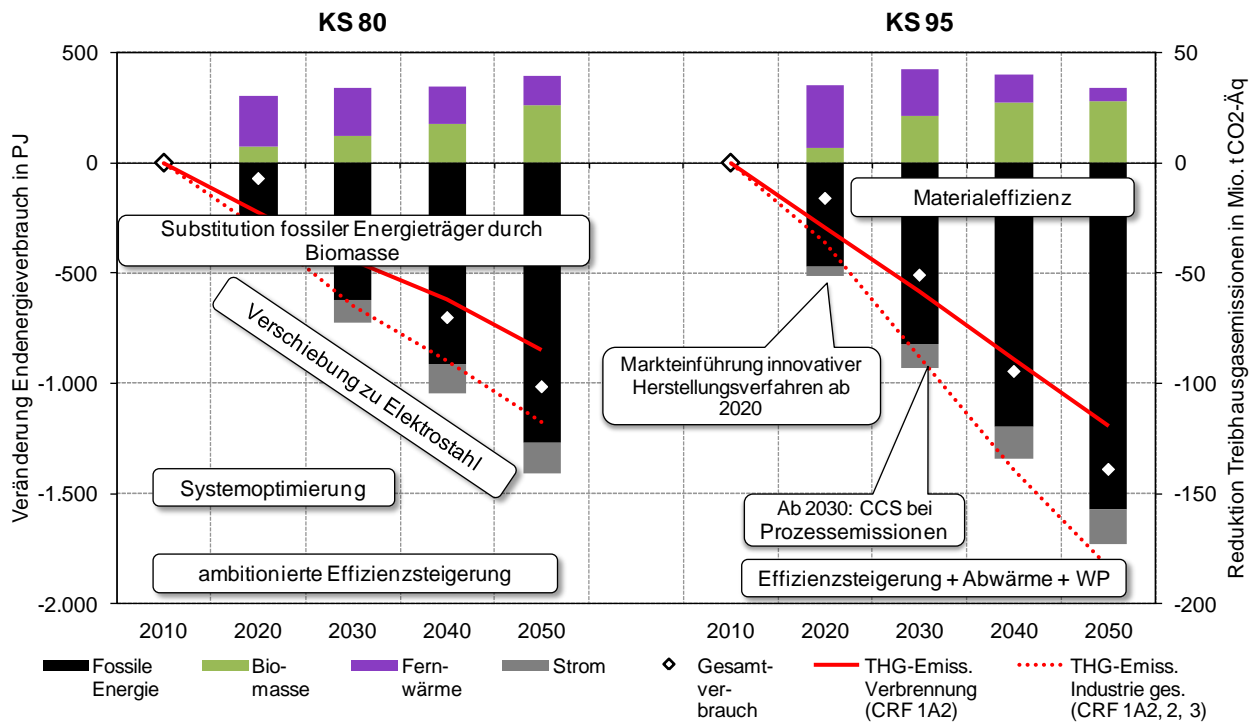
## 4.4. Industrie

### 4.4.1. Energieverbräuche und energiebedingte Emissionen

Die energiebedingten THG-Emissionen des Industriesektors (inklusive Industriekraftwerke) gehen im Klimaschutzszenario 80 im Zeitraum von 2010 bis 2050 von 116 auf 34 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. zurück. Dies entspricht einer Reduktion um 82 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. bzw. 71 %. Im Klimaschutzszenario 95 sinken sie um 119 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. und die Industrie wird (wie unten weiter erläutert wird) im Saldo zu einer Senke von etwa 3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Die rechnerische Reduktion beträgt hierdurch 103 %. Im AMS (2012) hingegen sinken diese Emissionen nur um 22 auf 93 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq., also um 19 %.

Im Klimaschutzszenario 80 sinkt der Energiebedarf von 2.400 PJ im Jahr 2010 auf 1.750 PJ bis 2050, dies entspricht etwa 27%. Im Jahr 2050 sind die zentralen Energieträger Strom, Fernwärme, Erneuerbare Energien, Erdgas und Kohle. Letztere wird für die Eisenreduktion bei der Herstellung von Oxygenstahl benötigt. In der Stahlindustrie ist eine Weiterführung des Trends von Oxygenstahl zu Elektrostahl zu verzeichnen. Besonders beim Stromverbrauch wurden Effizienzpotenziale durch umfassende Systemoptimierung weitestgehend erschlossen.

**Abbildung 4-6: Veränderung des Endenergieverbrauchs sowie Reduktion der THG-Emissionen im Sektor Industrie 2020 bis 2050 im Vergleich zu 2010**



Anmerkung: Die linke Achse bezieht sich auf den Endenergieverbrauch, welcher durch die Balken dargestellt ist (das Saldo durch die Rauten), die rechte Achse bezieht sich auf die THG-Minderung, welche durch die Linien dargestellt ist. Die im KS 95 angegebenen Maßnahmen sind jeweils zusätzlich zu den im KS 80 angegebenen. WP = Wärmepumpen, CCS = Carbon Capture and Storage

Quelle: Eigene Berechnungen

Das **Klimaschutzszenario 95** verzeichnet einen noch schnelleren Effizienzfortschritt, welcher in einen Rückgang des Endenergiebedarfs um 40% bis zum Jahr 2050 mündet. Besonders beim Brennstoffbedarf für Niedertemperaturwärme sowie der Nutzung von Abwärme in Kombination mit Wärmepumpen wurden zusätzliche Potenziale gegenüber dem Klimaschutzszenario 80 erschlossen. Aber auch ein schnellerer Fortschritt bei der Materialeffizienzsteigerung sowie der Diffusion von hocheffizienten Herstellungsverfahren tragen dazu bei. Der Energieträgerwechsel findet – durch den höheren CO<sub>2</sub>-Preis bedingt – deutlich schneller statt. Selbst Erdgas ist fast vollständig durch Erneuerbare Energien substituiert. CCS wird ab 2030 bei großen Punktquellen, wie den prozess- und energiebedingten Emissionen der Stahl- und Zementindustrie eingesetzt. Da die CCS-Technologie mit Substitution von Kohle durch Biomasse kombiniert wird, wird der Industriesektor im Bereich der energiebedingten Emissionen zu einer Emissionssenke.

Im Vergleich zum KS 80 werden im KS 95 technisch innovativere Lösungen umfangreich umgesetzt, wie z. B. im Bereich der Abwärmenutzung und der hocheffizienten Produktionsprozesse. Zusätzlich werden Materialeffizienzverbesserungen erzielt. Entsprechend fällt der Brennstoffbedarf deutlich schneller als noch im KS 80. Beim Stromverbrauch sind die Potenziale (Systemoptimierung elektrische Motorsysteme) bereits im KS 80 weitgehend erschlossen, sodass das KS 95 einen ähnlichen Verlauf aufweist.

Besonders bei langlebigen Anlagen mit langen Investitionszyklen (energieintensive Prozesse) müssen hocheffiziente innovative Lösungen (z. B. CO<sub>2</sub>-arme Zementherstellung, Endabmessungsnahes Stahlgießen, Sauerstoffverzehrkatoden bei der Chlorherstellung, innovative Papiertrocknungsverfahren, Magnetheizer beim Aluminiumverarbeiten) vor 2030 marktreif sein. Investitionen in F&E sowie Pilot- und Demonstrationsanlagen müssen daher bereits vor 2020 angestoßen werden. Auch die CCS-Technologie muss bis zum Jahr 2030 marktreif sein, um die hohen Vermeidungsmengen im Zeitraum 2030-2050 zu realisieren. Programme zur Markteinführung scheinen auch im Bereich der Abwärmenutzung sowohl innerbetrieblich wie betriebsübergreifend sinnvoll, wenn die Potenziale erschlossen werden sollen.

Ähnlich ist der Brennstoffwechsel vom Investitionszyklus in Dampferzeuger und Öfen abhängig. Bei einer typischen Lebensdauer zwischen 15 und 30 Jahren müssen nötige finanzielle Anreize (CO<sub>2</sub>-Preis) spätestens bis zum Jahr 2030 umgesetzt sein. Ein Preisanstieg nach 2040 kommt zu spät und würde nur einen Teil des Anlagenbestandes beeinflussen. Alternativ könnte ein verlässlich und absehbar ansteigender Preispfad für Investitionssicherheit sorgen und so die nötigen Investitionen bereits frühzeitig ermöglichen.

Große Herausforderungen sind mit der technischen Machbarkeit und der Markteinführung von innovativen hocheffizienten Produktionsprozessen verbunden, sowie mit der Erschließung von Einsparpotenzialen im Bereich der Systemoptimierung. Bei den finanziellen Anreizen zum Brennstoffwechsel könnte die Durchsetzbarkeit einer CO<sub>2</sub>-Steuer (oder alternativ eines Zuschusses) herausfordernd sein.

Notwendige Instrumente, um die beschriebene Transformation des Industriesektors zu erreichen, umfassen ein Preissignal für den Nicht-ETS-Sektor (z. B. CO<sub>2</sub>-Steuer) und ein hohes Preisniveau der THG-Zertifikatepreise im ETS noch vor 2030, Förderung von F&E sowie Markteinführung bei CO<sub>2</sub>-armen Industrieprozessen (vor 2020), finanzielle Förderung von Effizienztechniken mit längeren Amortisationszeiten (> 5 Jahre), verpflichtendes umfassendes Energiemanagement und Energieberatung.

#### **4.4.2. Industrieprozesse**

Neben den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen in der energieintensiven Industrie auch prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Verarbeitung von verfahrenstechnisch notwendigen Rohstoffen im Produktionsprozess. Ihre Vermeidung ist deutlich schwieriger als die der energiebedingten Emissionen. Im AMS (2012) und im KS 80 tragen die Industrieprozesse deshalb nur unterproportional zu Emissionsminderungen bei. Im KS 95 können Prozessemissionen durch CCS fast komplett vermieden werden (es wurde eine Abscheiderate von 95% unterstellt).

Bei den prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind (vereinfacht) drei Kategorien zu unterscheiden:

- In der Roheisenproduktion entstehen prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Kohle als „Lieferant“ für Kohlenstoff zur Reduktion des Eisenoxids.
- Bei der Wasserstoffproduktion (z. B. als Vorstufe für Ammoniak) wird Erdgas als Rohstoff eingesetzt. Die Emissionen werden als prozessbedingt bezeichnet, weil das Erdgas nicht verbrannt wird, sondern direkt chemisch zu Wasserstoff reagiert.

- Beim der Zement- und Kalkproduktion wird im Herstellungsprozess CO<sub>2</sub> aus Kalkstein freigesetzt. Die Freisetzung des CO<sub>2</sub> ist also nicht auf den Einsatz von Brennstoffen zurückzuführen.
- Für die klassische Zementproduktion wird CCS wahrscheinlich die einzige Vermeidungsoption bleiben, wenn nicht auf Substitute zurückgegriffen wird (z. B. Bauen mit Holz statt mit Beton).<sup>11</sup> Bei Roheisen und Wasserstoff wären auch alternative Vermeidungsoptionen denkbar, dabei sind die Charakteristika der unterschiedlichen Prozesse zu beachten:
- In der Roheisenproduktion können als Reduktionsmittel theoretisch auch Strom, Wasserstoff oder synthetisch erzeugtes Methan eingesetzt werden. Hier sind neue Verfahren zu entwickeln.
- Bei der Wasserstoffproduktion kann auf Elektrolyse umgestellt werden. Das Verfahren ist grundsätzlich technisch verfügbar, wird aber noch nicht im großen Maßstab angewendet.

In anderen Studien (z. B. Treibhausgasneutrales Deutschland) werden die Emissionen durch solche Technologien vermieden. Diese Studie berücksichtigt die Minderungsoptionen jedoch nicht, weil die Kosten für die Industrie als zu hoch eingeschätzt werden: Es wären große Mengen erneuerbaren Stroms zu niedrigen Kosten notwendig, außerdem ist die Speicherfrage zu klären, weil erneuerbare Energien nur mit etwa 2000 bis 4000 Vollbenutzungsstunden den notwendigen Strom liefern. Die Einschätzung kann sich ändern, wenn die Kosten für erneuerbare Energien stärker sinken oder die Speicherung von CO<sub>2</sub> im Untergrund deutlich teurer ausfällt als aktuell prognostiziert oder wenn die Speicherung technisch nicht funktioniert. Weitere Analysen zur Emissionsminderung der prozessbedingten Emissionen in der Industrie sind sinnvoll, auch unter Berücksichtigung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit.<sup>12</sup> Auch muss die Frage gestellt werden, wie hoch die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS bei Zement und Stahl ist.

Die gesamten dem Bereich Industrie zuzuordnenden Emissionen (energiebedingte Emissionen einschließlich Industriekraftwerke, Industrieprozesse und Produktverwendung) sinken zwischen 2010 und 2050 im KS 80 um 114 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq., was einer relativen Minderung von 74 % gegenüber dem Jahr 1990 entspricht. Deutlich höher ist der Rückgang der Treibhausgasemissionen im KS 95 mit 183 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. zwischen 2010 und 2050, entsprechend 99 % gegenüber 1990. Im Vergleich ist der Rückgang von 2010 bis 2050 im AMS (2012) mit 54 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. (-52 % ggü. 1990) wesentlich geringer.

---

<sup>11</sup> Als alternative Produktionsverfahren werden insbesondere die Nutzung von Flugasche aus der Rauchgasreinigung von Kohlekraftwerken oder die Nutzung von Hochofenschlacken diskutiert. Diese Substitute sind aber nur begrenzt verfügbar (Hochofenschlacken), bzw. die Produktion von Kohlekraftwerken geht in einer dekarbonisierten Volkswirtschaft deutlich zurück. Zement-Ersatzstoffe, wie z. B. Celiment, befinden sich derzeit noch in der Erprobung.

<sup>12</sup> In dieser Studie konnte noch nicht berücksichtigt werden, inwieweit sich Synergien zwischen den beiden Technologiesträngen (CCS und Elektrifizierung) ergeben würden. Zum Beispiel wäre es denkbar, dass Wasserstoff in 2000 bis 4000 Stunden im Jahr über Elektrolyse gewonnen wird (wenn erneuerbare Energien verfügbar sind). In der übrigen Zeit könnte der Wasserstoff aus fossilem Erdgas mit CCS produziert werden. Mit CCS kann die klassische Betriebsweise in der Grundlast beibehalten werden. Beim massiven Einsatz von erneuerbaren Energien in den Industrieprozessen müssen die Prozesse deutlich flexibler betrieben werden, bzw. der Speicherbedarf für Strom würde deutlich ansteigen, wenn die Prozesse weiterhin in der Grundlast betrieben werden sollen.

## 4.5. Verkehr

Gegenüber 1990 können die THG-Emissionen des nationalen Verkehrs im Szenario KS 80 um 81% und im Szenario KS 95 um 98,4% reduziert werden.

Der nationale Verkehr erreicht dabei deutlich höhere Minderungen als der internationale Verkehr: Die THG-Emissionen des Verkehrssektors inkl. internationalem Luft- und Seeverkehr gehen im Klimaschutzszenario 80 im Zeitraum von 2010 bis 2050 von 184,5 auf 66 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. zurück (-63% ggü. 1990). Im Klimaschutzszenario 95 sinken die Emissionen auf 15 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (-92%).

Übereinstimmend mit anderen Studien und Szenarien lässt sich aus den Ergebnissen folgende Aussage ableiten: Während es bei einem Gesamtziel von 80% über alle Sektoren noch ausreichen kann, dass der (nationale) Verkehr seine Emissionen um 60%-80%<sup>13</sup> reduziert, muss der Verkehrssektor bei einem Gesamtziel von 95% praktisch vollständig dekarbonisiert werden. Um Fehlallokationen bei den Energieträgern zu vermeiden (z. B. Biomasse), sollte dafür das im Energiekonzept festgelegte Ziel einer Minderung des Endenergieverbrauchs von -40% gegenüber 2005 auf -60% angehoben werden und für das Jahr 2030 ein Zwischenziel von -30% angestrebt werden.

In Abbildung 4-7 ist die Veränderung des Endenergieverbrauchs und der THG-Emissionen im KS 80 gegenüber 2010 dargestellt. Wesentlich für die Erreichung der Minderungen sind im Zeitraum bis 2030 vor allem Maßnahmen, welche die Nutzung des Umweltverbundes und der Schiene stärken und so die Abhängigkeit vom Verbrennungsmotor reduzieren. Ein weiterer zentraler Hebel ist die Effizienzsteigerung bei konventionellen Antrieben sowie die Zunahme batterieelektrischer Antriebe. Um Rebound-Effekte zu vermeiden, wird diese Effizienzsteigerung in den Szenarien mit einer Erhöhung der Kraftstoffsteuern gekoppelt.

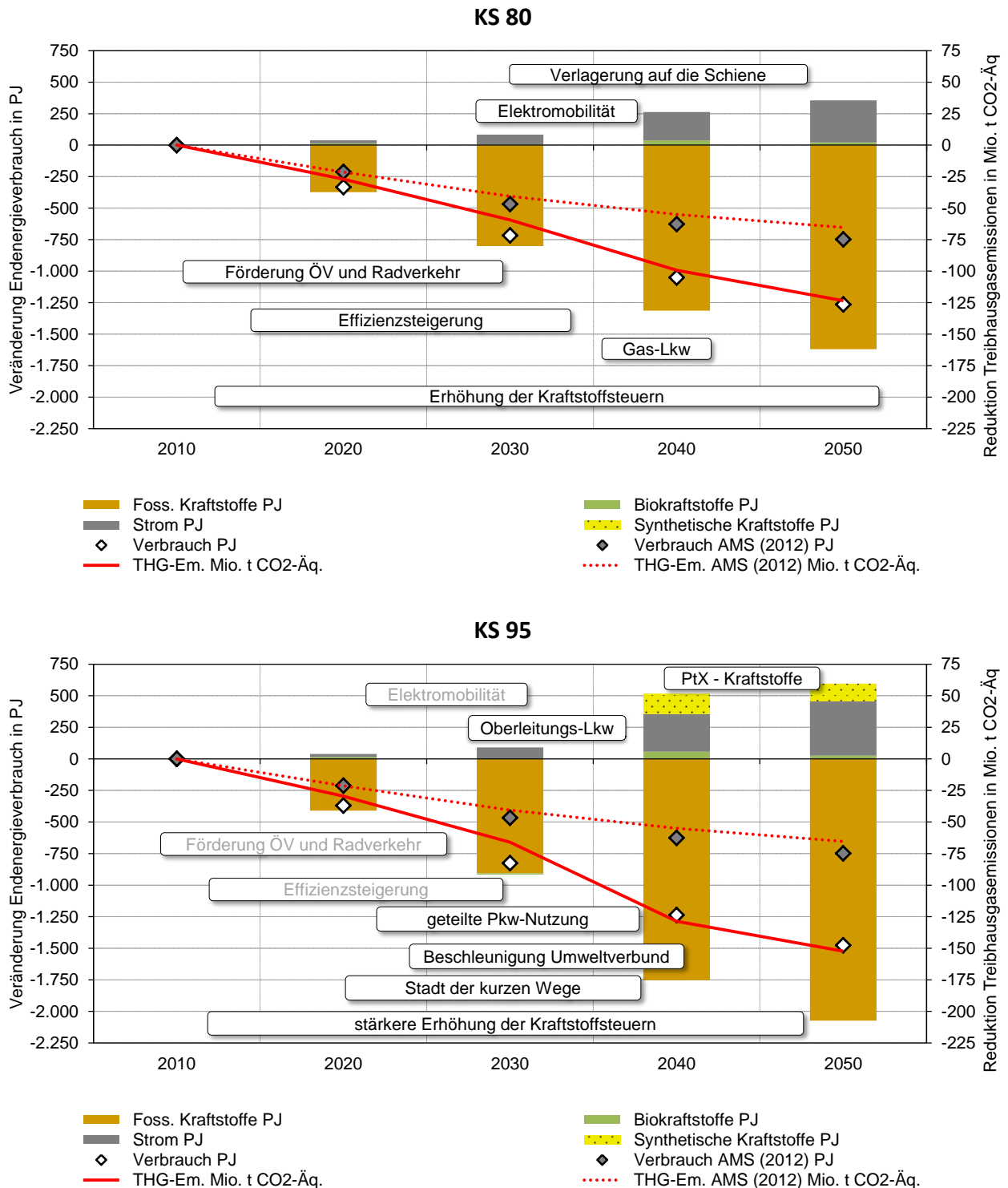
Bis zum Jahr 2050 reduziert sich der Endenergiebedarf durch diese Maßnahmen im KS 80 um 59 % gegenüber 2005. Vor dem Hintergrund der begrenzten Verfügbarkeit von nachhaltigen Biokraftstoffen und strombasierten Kraftstoffen ist die deutliche Reduktion des Endenergiebedarfs in den Szenarien notwendig, um die sektorübergreifenden Klimaschutzziele zu erreichen.

Abbildung 4-7 zeigt ebenfalls die Entwicklung von Endenergieverbrauch und THG-Emissionen im KS 95 sowie die dafür hinterlegten Maßnahmen. Der Motorisierungsgrad ist in diesem Szenario durch die Stärkung von Alternativen zum eigenen Pkw und die geteilte Pkw-Nutzung deutlich niedriger als im AMS (2012) und auch als im KS 80, so dass der Anteil des motorisierten Individualverkehrs (MIV) an den zurückgelegten Wegen bis 2050 auf 50% sinkt und der Fahrradanteil an den Wegen auf 25% steigt. Auch ist ein stärkerer Anstieg der Kraftstoffpreise als im KS 80 notwendig, um eine entsprechende Wirkung zu entfalten. Durch den Einsatz von Oberleitungs-Lkw findet auch im Straßengüterverkehr eine starke Effizienzsteigerung statt. Bis zum Jahr 2050 reduziert sich der Endenergiebedarf durch diese Maßnahmen im KS 95 um 68 % gegenüber 2005. In den Jahren 2040 und 2050 kommen zusätzlich in begrenztem Umfang strombasierte Kraftstoffe (PtX-Kraftstoffe) zum Einsatz, um die notwendige Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Obwohl davon ausgegangen wird, dass nur 50% dieser Kraftstoffe im Inland produziert werden und der restliche Anteil importiert wird, führen sie trotzdem bereits zu einer deutlich spürbaren Erhöhung der Stromnachfrage.

<sup>13</sup> Im Szenario KS 80 liegt der Verkehrssektor eher am oberen Rand dieser Spanne; auch in der Leitstudie 2011 und der Energierferenzprognose liegt für eine sektorübergreifende Minderung von 80% die Minderung im nationalen Verkehr bei über 70%. Der untere Rand der Spanne wurde z. B. aus EU-Szenarien abgeleitet.



**Abbildung 4-7: Veränderung des Endenergieverbrauchs sowie Reduktion der THG-Emissionen im Verkehr im KS 80 und KS 95 (ohne internationalen Luft- und Schiffsverkehr) 2020 bis 2050 im Vergleich zu 2010**



Anmerkung: Die linke Achse bezieht sich auf den Endenergieverbrauch, welcher durch die Balken dargestellt ist (das Saldo durch die Rauten), die rechte Achse bezieht sich auf die THG-Minderung, welche durch die Linien dargestellt ist. Sprechblasen mit grauer Schrift zeigen die bereits im Szenario KS 80 hinterlegten Maßnahmen; die im Szenario KS 95 zusätzlich hinterlegten Maßnahmen sind in schwarzer Schrift angegeben.

Quelle: Eigene Berechnungen

Insgesamt zeigen die Ergebnisse: Um eine Minderung von mindestens 80% über alle Sektoren anzustreben und auch die Möglichkeit einer Minderung von 95% oder mehr offenzuhalten, sollte in den nächsten Jahren bzw. Jahrzehnten der Fokus auf Maßnahmen zur Stärkung effizienter Verkehrsmittel liegen (öffentlicher Verkehr, Radverkehr, Schiene) sowie auf der Effizienzsteigerung bei den Fahrzeugen. Hiefür werden sowohl angebots- als auch nachfrageseitige Instrumente benötigt werden (z. B. ambitionierte Pkw-Emissionszielwerte in Kombination mit Anpassung der Kraftstoffsteuern). Zusätzlich ist die Elektrifizierung des Verkehrs von hoher Bedeutung. Im Luftverkehr muss ein wirksamer Emissionshandel etabliert werden.

Langfristig sind voraussichtlich auch weiterhin Flüssigkraftstoffe im Verkehr notwendig (z. B. im Luftverkehr). Potenziale postfossiler Kraftstoffe sind jedoch begrenzt und ihre Nachhaltigkeit muss garantiert werden können. Relevante Kostendegressionen für die Erzeugung postfossiler, nachhaltiger Kraftstoffe hängen dabei teilweise auch von bisher noch nicht marktreifen Technologien ab. Postfossile Energieversorgungsoptionen sind notwendig zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele, dürfen aber aus den genannten Gründen nicht als Argumentation genutzt werden, um das Ambitionsniveau bei der Effizienzsteigerung im Verkehr zu reduzieren. Es sollte vielmehr in Betracht gezogen werden, das Ziel zur Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehr bis 2050 auf mindestens 60 % zu erhöhen und für das Jahr 2030 ein Zwischenziel von mindestens 30 % einzuführen.

Weiterhin ist zu erwägen, auf Bundesebene zusätzliche (Sub-)Ziele für die Verlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsträger (z. B. mit Zeithorizont 2025) zu etablieren. Bei der Definition von Zielen für den Modal Split sollte darauf geachtet werden, dass diese potenziell erreichbar sind und dass sie mit entsprechenden Maßnahmen hinterlegt werden.

Für den Radverkehr ist im nationalen Radverkehrsplan das Ziel verankert, den Radverkehrsanteil an den Wegen bis 2020 auf 15% zu erhöhen. Dieses Ziel sollte mit entsprechenden Maßnahmen hinterlegt werden und das Ambitionsniveau für 2025 bzw. 2030 deutlich erhöht werden. In der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie existieren zudem Verlagerungsziele für den Güterverkehr mit einem Anteil der Schiene von 25 % und des Binnenschiffs von 18 % im Jahr 2015; diese werden jedoch deutlich verfehlt. Zudem fehlen dort Ziele für den Personenverkehr. Für die Etablierung nationaler Ziele wäre zudem ein Screening von bestehenden Zielen auf Ebene von Ländern und Kommunen hilfreich. Beispielsweise existieren in Baden-Württemberg bereits ambitionierte Ziele sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr.<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Ziele in Baden-Württemberg für das Jahr 2030: Erhöhung des Anteils von Bahn und Binnenschiff am Verkehrsaufwand des Güterverkehrs um zehn Prozentpunkte; Steigerung des Radverkehrsanteils auf 20 % sowie Steigerung des Fußverkehrsanteils auf 30 %; Erhöhung der Personenkilometer des ÖPNV-Verkehrs um 100 % gegenüber dem Jahr 2004. Insgesamt Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs um 40 %.

## 4.6. Landwirtschaft und LULUCF

### 4.6.1. Landwirtschaft

Während in anderen Sektoren durch technische Maßnahmen Emissionsreduktionen von bis zu 100 % möglich sind, ist die landwirtschaftliche Produktion an biologische Prozesse gebunden, bei denen Lachgas und Methanemissionen entstehen. Allerdings besteht ein großes CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial bei landwirtschaftlichen Böden, welches im LULUCF Sektor bilanziert wird.

Große Reduktionspotenziale liegen in der Steigerung der Stickstoffeffizienz bei der Düngernutzung, in der Minderung des Tierbestands und im Ausbau der ökologischen Landwirtschaft.

Die THG-Emissionen des Landwirtschaftssektors bleiben im AMS (2012) bis zum Jahr 2050 etwa konstant auf dem Niveau der Emissionen im Jahr 2010. Von 1990 bis 2012 konnten die THG-Emissionen im Landwirtschaftssektor um 22 % gesenkt werden. Im Klimaschutzszenario 80 gehen die Emissionen im Zeitraum von 1990 bis 2050 von 88 auf knapp 51 Mio. t zurück. Dies entspricht einer Reduktion um 42 % im Vergleich zu 1990. Im Klimaschutzszenario 95 sinken sie auf 35 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Die Reduktion beträgt hier 59 % gegenüber 1990.<sup>15</sup>

Der Landwirtschaftssektor entwickelt sich in beiden Szenarien zum Hauptemittenten: Im KS 95 mit einem Anteil von 60 % an den Gesamtemissionen (inkl. LULUCF und internationalem Verkehr), im KS 80 mit 20 %. Dabei ist bereits in beiden Szenarien eine Veränderung der Ernährung mit einer deutlichen Konsumreduktion von tierischen Produkten unterstellt. Die Minderung des Tierbestands in den Szenarien basiert auf der Annahme einer Reduktion der Nachfrage tierischer Produkte<sup>16</sup>. Für Fleischkonsum sind die Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung zu Grunde gelegt worden, die pro Person eine Menge von 300-600 g Fleisch pro Woche vorsehen. Im KS 80 wurde ein Rückgang des Fleischkonsums von 760g auf 450 g pro Person und Woche unterstellt. Das KS 95 geht von 300 g Fleisch pro Woche und Person aus. Durch eine Steigerung der Stickstoffeffizienz sinkt die Gesamtgabe und die N-Salden pro Hektar werden geringer. Im KS 80 liegt der Saldo des Stickstoffüberschusses bei etwa 40 kg/ha im Jahr 2050. Im KS 95 liegt der Saldo im Jahr 2050 nur noch bei ca. 20 kg/ha<sup>17</sup> (ggü. aktuell etwa 100 kg N/ha). Die nationale Nachhaltigkeitsstrategie hat bis 2010 ein Ziel von 80 kg-N/ha gefordert, die Kommission Landwirtschaft beim Umweltbundesamt gibt ein Ziel von 50 kg-N/ha an. Dies zeigt, dass die zweite Modellierungsrunde alle Reduktionspotenziale in diesem Bereich ausgeschöpft hat.

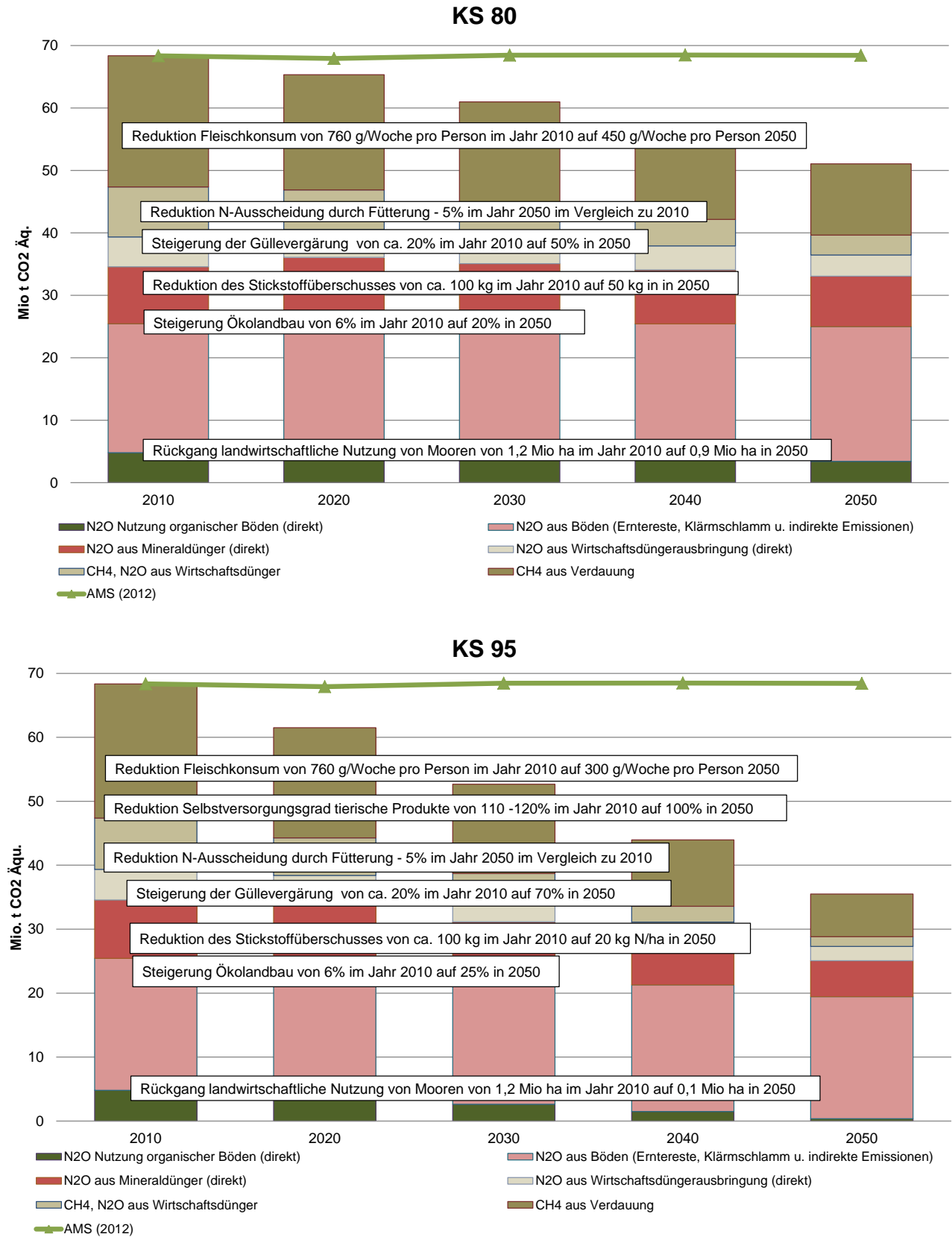
Die ökologische Landwirtschaft nimmt im KS 80 einen Anteil von 20 % im Jahr 2050 an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche ein. Im KS 95 erhöht sich der Anteil im Jahr 2050 auf 25 % (ggü. 6 % im Jahr 2012).

<sup>15</sup> Anmerkung: Die Berechnungen erfolgten anhand von Interpolationen zwischen 2010 und 2050, da die Wirkungen der Emissionsreduktion meist im selben Jahr auftreten (z. B. Reduktion Mineraldüngereinsatz). Aussagen in Bezug auf 2030 können bisher lediglich auf diese Weise ermittelt werden und sind daher vorerst nicht dargestellt.

<sup>16</sup> Der Nachfragerückgang ist hier als Produktionsrückgang umgesetzt worden, aus Klimaschutzgründen ist eine Exportstrategie ausgeschlossen worden. Außerdem wird die Tierzahl auch zusätzlich etwas geringer, da die durchschnittliche Produktivität in der (konventionellen) Milchproduktion um 24 % bis 2050 ansteigt.

<sup>17</sup> Im Rahmen der Szenariorechnungen waren die N-Salden keine Zielgröße. Hier wurden Annahmen zur möglichen Reduktion von N-Gaben getroffen. Gemeinsam mit dem reduzierten Wirtschaftsdüngeraufkommen und dem Ausbau der ökologischen Landwirtschaft, der auf mineralische N-Düngung verzichtet, ergeben sich auf diese Weise die N-Gaben für den Ackerbau. Mit Hilfe einfacher Produktionsannahmen wurde erst im Nachhinein für den Szenariovergleich ein N-Saldo abgeschätzt.

Abbildung 4-8: Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft im KS 80 und im KS 95



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

Die Reduktion der landwirtschaftlichen Emissionen um rund 50% erfordert neben Konsumveränderungen auch Investitionen in Forschung und Entwicklung. Neben der Weiterentwicklung von technischen Maßnahmen wurden vier große Forschungsfelder identifiziert, in die verstärkt Forschungsgelder fließen sollten.

### **Ökolandbau**

Wenn die Zielvorgaben von 20-25% Ökolandbau im Jahr 2050 erfüllt werden sollen, muss ein wesentlicher Teil der Agrarforschungsmittel in die Forschung zum Ökolandbau fließen. Ohne weitere Ertrags- und Leistungssteigerungen wird der Ökolandbau auch in Zukunft keine tragende Rolle spielen. Forschung zu innovativen und nachhaltigen Anbaumethoden und Tierhaltungssystemen sind unverzichtbar. Vor allem im Bereich der Züchtung müssen zusätzliche Förderprogramme für den Ökolandbau initiiert werden, da hier sowohl im Bereich der Feldfrüchte als auch im Bereich der Tierproduktion andere Zuchtziele verfolgt werden als in der konventionellen Zucht. Statt der einseitigen Hochleistungszucht sollte der Fokus auf Zweinutzungsrasen (z. B. bei Hühnern) und robusten, N-extensiven Getreidesorten und resistenten, toleranteren Obst und Gemüsesorten liegen, die ohne den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln angebaut werden können.

In den Szenarien wird ein starker Rückgang der Tierbestände durch Konsumänderungen bis zum Jahr 2050 angenommen. Damit würde die Nutzung und folglich der Erhalt von Grünland in Gefahr geraten. Doch durch den unterstellten gleichzeitigen Ausbau der ökologischen Landwirtschaft, die mit einer starken Flächenbindung der Tierbestände einhergeht, wird zukünftig ein wesentlicher Teil des Grünlands zur Beweidung und zur Heugewinnung genutzt werden. Angesichts der geringeren Produktivität dieser Wirtschaftsweise besteht Forschungsbedarf, wie zukünftig eine Verringerung der Treibhausgasemissionen pro nachhaltig erzeugter Produkteinheit aussehen kann. Dabei ist auch die Frage zu adressieren, inwieweit vor allem eine Steigerung der Milchleistung im Vordergrund stehen sollte oder die Entwicklung von Zweinutzungsrasen.

Vor allem die On-Farm-Forschung mit Modellregionen und Pilotbetrieben ist als Forschungsstruktur für die Ökolandbauforschung anzustreben.

### **Stickstoffeffizienz**

Angesichts der hohen Stickstoffüberschüsse von ca. 100 kg N/ha im Jahr 2010 besteht hier deutliches Reduktionspotenzial. Nach den heutigen Erkenntnissen ist Pflanzenbau mit Stickstoffüberschüssen von nur 20 kg N/ha wie im KS 95 angenommen nicht ohne Ertragsminderungen möglich. Es besteht weiterhin Forschungsbedarf zu Ertragsstabilisierung unter gleichzeitiger Minderung der Stickstoffverluste. Dazu wird ein wissenschaftlicher Konsens benötigt, für welche Sorten beispielsweise Herbstdüngung notwendig ist und wo darauf verzichtet werden kann, und wie im Ökolandbau sollten stickstoffextensive Getreidesorten gezüchtet werden. Die Umsetzung muss durch entsprechende Anpassungen in den aktuellen Düngebedarfsmodellen und durch verstärkte Beratung erfolgen.

### **Ernährungswende**

Eine Halbierung der Emissionen im Bereich Landwirtschaft ist ohne eine Reduktion der Tierbestände nicht zu schaffen. Diese kann wiederum nur glaubhaft vor dem Hintergrund einer veränderten Ernährungsweise<sup>18</sup> der Bevölkerung erfolgen – andernfalls würden die fehlenden

---

<sup>18</sup> Deutliche Verringerung des Verzehrs tierischer Fette und Eiweiße – also Fleisch, Milchprodukte und Eier umfassend

Produkte aus der Tierhaltung importiert werden und Leakage-Effekte nach sich ziehen. Hierzu bedarf es ebenfalls verschiedener Arbeiten im Bereich von F&E:

- Evidenzbasierte Forschung zu gesundheitlichen Auswirkungen einer „klimaoptimierten“ Ernährung.
- Entwicklung von effektiver Wissensweitergabe geänderter Zubereitungsweisen / Rezepturen und Hintergrundwissen zu wesentlichen Zusammenhängen im Bereich Ernährung-Umwelt-Gesundheit an Fachpersonal in Gastronomiebetrieben, Einrichtungen für Gemeinschaftsverpflegung aber auch direkt an die Verbraucher, in Bildungseinrichtungen (Kindergärten, Schulen).

#### 4.6.2. LULUCF

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<sub>2</sub>. Übertrifft die Einbindung von CO<sub>2</sub> 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 (Moorböden).

Insgesamt verursachte der LULUCF-Sektor 2010 THG-Emissionen in Höhe von 9 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Durch die unten beschriebenen Entwicklungen sinken die Emissionen im KS 80 auf 1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. bis 2050. Im KS 95 hingegen wird der LULUCF-Sektor insgesamt zu einer Senke, weil die Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden deutlich stärker gesenkt werden, bei gleichzeitiger Erhaltung der Senkenfunktion des Waldes: es werden im Jahr 2050 dann etwa -23 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. netto gebunden. Im AMS (2012) hingegen steigen die LULUCF-Emissionen um 6 auf 15 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.

In den [Klimaschutzszenarien 80 und 95](#) wird davon ausgegangen, dass die Umwandlung in Siedlungsflächen von heute 119 ha/Tag auf 30 ha/Tag sinkt. In beiden Szenarien wird im Zeitraum 2015 bis 2020 der Abbau von Torfmoor vollständig eingestellt. Der Einstellung des Torfabbaus kommt ein Reduktionspotenzial von 5 % im LULUCF-Sektor zu.

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 unterscheiden: Im KS 80 wird von einem Umsetzungsgrad von 30 %, im KS 95 hingegen von 95 % ausgegangen.

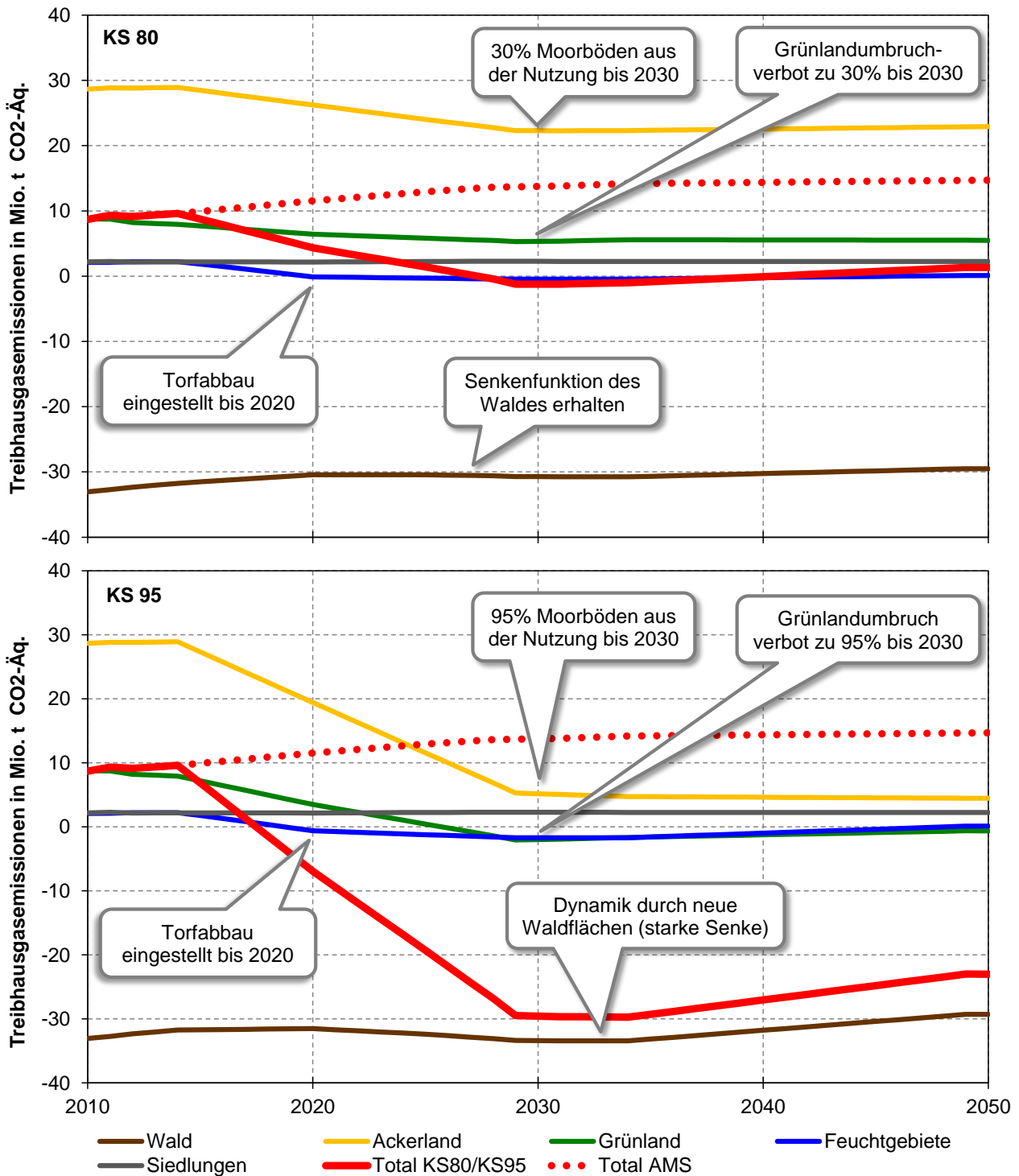
- Ackerland und Grünland auf organischen Böden werden hauptsächlich in Feuchtgebiete und zu einem geringeren Anteil zu Wald und in Gehölze umgewandelt. Andere Flächen auf organischen Böden werden nicht mehr in Acker- oder Grünland umgewandelt. Dieser Schutz von Mooreböden ist eine effiziente Maßnahme, mit der bis zu 80 % der heutigen THG-Emissionen im LULUCF-Sektor reduziert werden können. Die THG-Einsparpotenziale sind dabei deutlich höher als die THG-Reduktion, die z. B. durch eine Bioenergienutzung auf gleicher Fläche erreicht werden kann.
- Ein Umbruch von Grünland auf mineralischen Böden zu Ackerland wird unterbunden (Reduktionspotenzial von 4 %).

## **Schutz von Moorböden**

Der quantitativ größte Beitrag zur Minderung der Emissionen aus LULUCF besteht darin, die organischen Böden nicht mehr landwirtschaftlich zu nutzen. In den Szenarien wird eine Umwandlung in Feuchtgebiete und Wald angenommen. Das erfordert in manchen Gebieten eine vollständige Umstrukturierung der Flächennutzung. Neben der Schaffung von Akzeptanz, Ausgleichszahlungen oder Flächenverkäufen erfordert das vor allem den Einbezug in die Regionalplanung. Dazu kann der Aufbau von Modellregionen verstärkt gefördert werden.

Forschungsbedarf besteht hier weiterhin zu alternativen Nutzungskonzepten, um die Umwandlung von landwirtschaftlichen Flächen in Feuchtgebiete und Wälder zu fördern. Unter dem Schlagwort Paludikulturen gibt es derzeit Forschungsprojekte, die die Nutzung der auf Mooren produzierten Biomasse untersuchen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf zu den Quantitäten und Qualitäten der Biomasse mit Hinblick auf die Möglichkeit der energetischen und stofflichen Nutzung, den Anbau geeigneter Baumarten auf nassen bzw. wechselfeuchten Standorten und mögliche Erntetechnologien.

**Abbildung 4-9: Treibhausgasemissionen und -einbindung im LULUCF-Sektor im KS 80 und KS 95, 2010-2050**



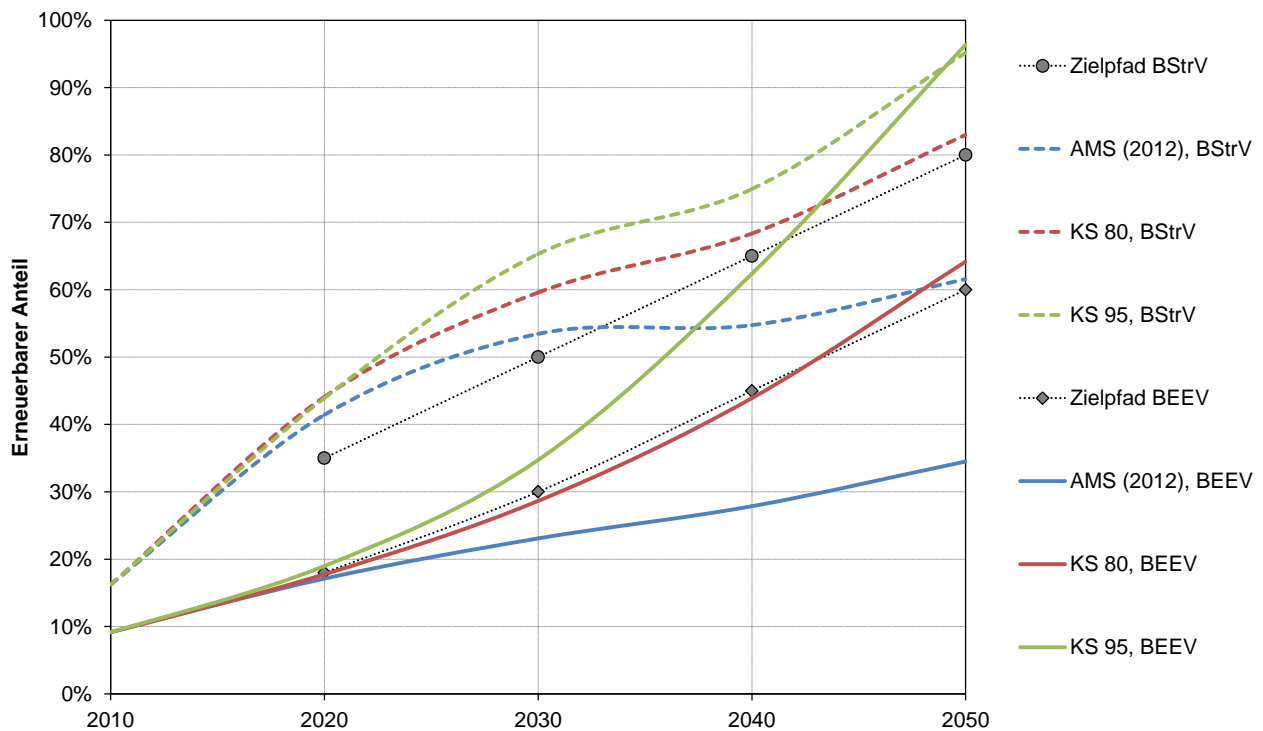
Quelle: Eigene Berechnungen



### 5. Bedarf an erneuerbaren Energien

Im Energie- und Klimaschutzkonzept der Bundesregierung sind zwei Ziele zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien benannt. Zum einen soll der erneuerbare Anteil am Bruttoendenergieverbrauch von 18 % im Jahr 2020 auf 60 % im Jahr 2050 erhöht werden. Dieser Anteil soll in der Dekade von 2020 bis 2030 um 12 Prozentpunkte und in den folgenden Dekaden um jeweils 15 Prozentpunkte steigen. Zum anderen soll der erneuerbare Anteil am Bruttostromverbrauch von 35 % im Jahr 2020 auf 80 % im Jahr 2050 steigen. Dies entspricht ebenfalls einer Steigerung um 15 Prozentpunkte pro Dekade.

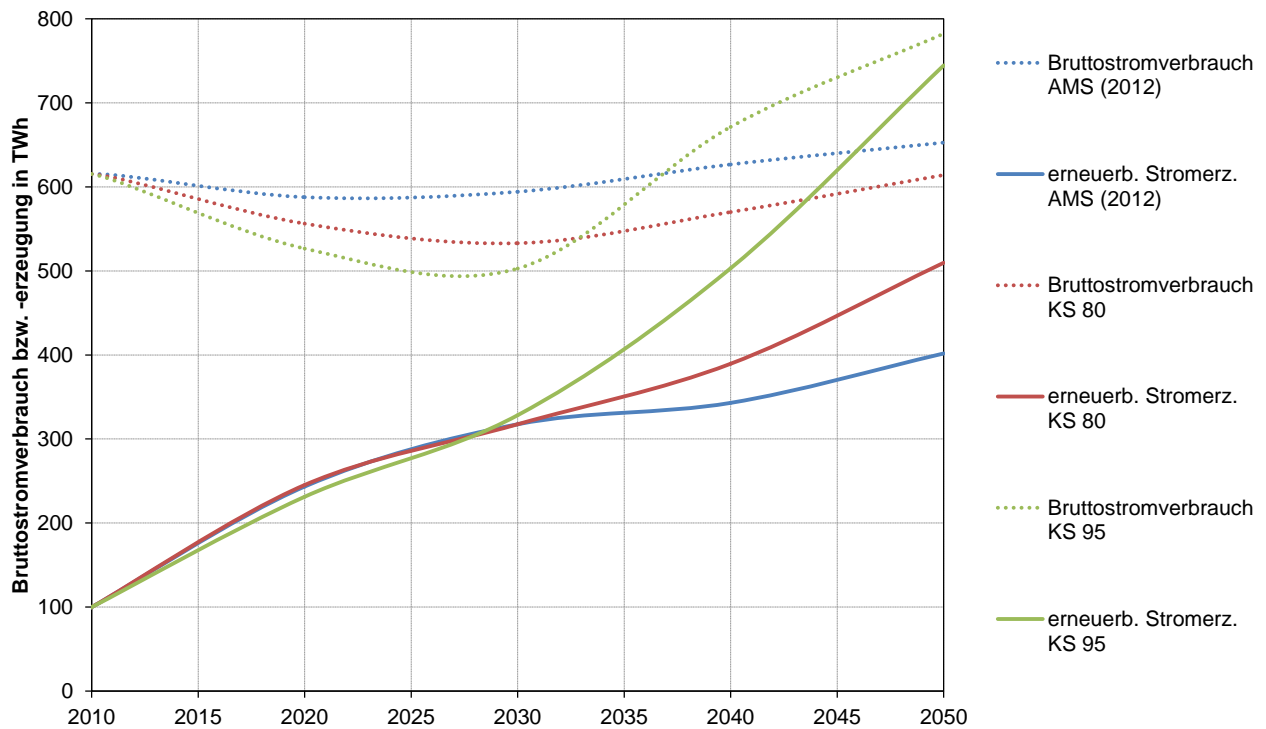
**Abbildung 5-1: Entwicklungen der erneuerbaren Anteile am Energieverbrauch in den Szenarien im Vergleich zu den Zielpfaden des Energie- und Klimaschutzkonzepts, 2010-2050**



Anmerkung: BStV = Bruttostromverbrauch; BEEV = Bruttoendenergieverbrauch.  
 Quelle: Modellrechnungen von Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Im AMS (2012) wird keines der Ziele zum erneuerbaren Anteil am Bruttoendenergieverbrauch (BEEV) erreicht, wie Abbildung 5-1 illustriert. Mit einem erneuerbaren Anteil von etwa 35 % am BEEV wird nur etwas mehr als die Hälfte des Ziels für 2050 erreicht. Im KS 80 hingegen verläuft der Zuwachs des erneuerbaren Anteils am BEEV zunächst unwesentlich unterhalb des Zielpfades. Mit einer Zunahme des Anstiegs zwischen 2030 und 2040 übertrifft der erneuerbare Anteil am BEEV den Zielpfad und erreicht schließlich im Jahr 2050 mit 64 % einen etwas höheren Anteil als angepeilt. Um hingegen im KS 95 eine THG-Minderung um etwa 95 % zu erzielen, muss der erneuerbare Anteil am BEEV bereits 2030 deutlich oberhalb des Zielpfades liegen und schließlich bis 2050 auf etwa 96 % ansteigen.

**Abbildung 5-2: Entwicklungen der erneuerbaren Stromerzeugung und des Bruttostromverbrauchs, 2010-2050**



Quelle: Modellrechnungen von Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Bis 2020 orientiert sich in allen drei Szenarien der Zubau von Anlagen an den Technikkorridoren des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) und er verläuft noch bis 2030 sehr ähnlich, so dass auch die absolute erneuerbare Stromerzeugung folglich in allen drei Szenarien bis zu diesem Zeitpunkt ähnlich hoch ist (Abbildung 5-2). Daher ergeben sich die Unterschiede in den erneuerbaren Anteilen am Bruttostromverbrauch zwischen den Szenarien bis 2030 vor allem durch die unterschiedlichen Entwicklungen des gesamten Bruttostromverbrauchs. Der erneuerbare Anteil am Bruttostromverbrauch liegt in allen drei Szenarien bis 2030 oberhalb des Zielpfades. Da der Stromverbrauch zunächst durch Effizienzmaßnahmen sinkt, anschließend aber (wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben) durch neue Verbraucher (vor allem Elektromobilität, Wärmepumpen/Power-to-Heat sowie im KS 95 auch Power-to-Liquid zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe) wieder ansteigt, flacht sich der Anstieg des erneuerbaren Anteils am Stromverbrauch in allen drei Szenarien spätestens 2030 ab und im AMS (2012) werden daher die Ziele für den erneuerbaren Anteil am Bruttostromverbrauch für 2040 und 2050 nicht mehr erreicht. Im KS 80 wird das 2030-Ziel noch um 10 Prozentpunkte übertroffen, das 2050-Ziel hingegen wird nur noch um 3 Prozentpunkte übererfüllt. Zur Erreichung des THG-Minderungsziels im Szenario KS 95 ist ein deutlich höherer erneuerbarer Stromanteil erforderlich, da bei einer so hohen Emissionsminderung nur noch sehr wenig Platz für fossile Energieträger ist: Im Jahr 2050 wird ein erneuerbarer Anteil von 95 % am Bruttostromverbrauch erreicht und das 2030-Ziel wird um 15 Prozentpunkte übertroffen. Durch die im KS 95 deutlich schnellere Erreichung sehr hoher Anteile fluktuierender erneuerbarer Stromquellen stellen sich auch die damit verbundenen Herausforderungen zur Systemintegration von fluktuierender Stromerzeugung früher als in den anderen Szenarien.

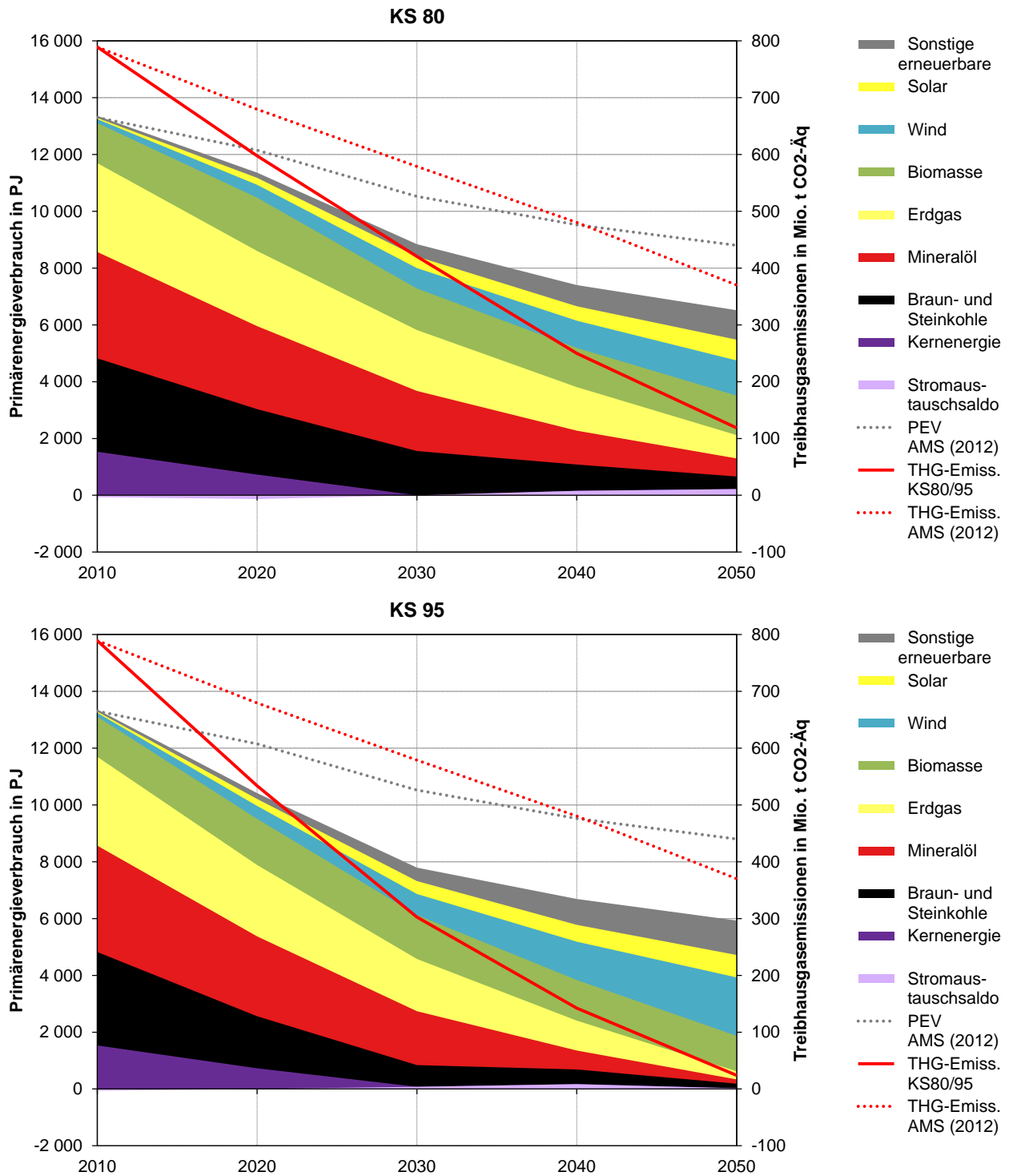
Zumindest für die Jahre 2030 und 2040 sind die Ziele des erneuerbaren Anteils am Bruttoendenergieverbrauch als deutlich ambitionierter zu betrachten als die Ziele des erneuerbaren Anteils am Bruttostromverbrauch: Im AMS (2012) wird 2030 das Ziel für den erneuerbaren Anteil am Bruttostromverbrauch noch deutlich erreicht, aber das Ziel für den erneuerbaren Anteil am Bruttoendenergieverbrauch schon deutlich verfehlt. Im KS 80 werden sowohl 2030 als auch 2040 die Ziele für den erneuerbaren Anteil am Bruttoendenergieverbrauch zwar ungefähr erreicht, hierfür ist aber eine deutliche Übererfüllung der Ziele für den erneuerbaren Anteil am Bruttostromverbrauch notwendig. Das heißt also, die mittelfristig deutliche Zielübererfüllung beim erneuerbaren Anteil am Bruttostromverbrauch ergibt sich nicht nur aus den erforderlichen Treibhausgasminderungen bei der Stromerzeugung sondern auch aus den für die Erfüllung der Ziele für die erneuerbaren Anteile am Bruttoendenergieverbrauch notwendigen Beiträge.

Während im AMS (2012) der gesamte Primärenergieverbrauch (Abbildung 5-3) bis zum Jahr 2050 nur um 33 % sinkt, wird er in den Klimaschutzszenarien sehr viel stärker reduziert (um 51 % im KS 80 und um 55 % im KS 95). Im AMS (2012) stehen 3.360 PJ Primärenergie aus erneuerbaren Energien einem fossilen Primärenergieverbrauch von 5.572 PJ sowie 165 PJ Stromimport gegenüber.

Im KS 80 hingegen ist der erneuerbare Primärenergieverbrauch im Jahr 2050 mit 4.244 PJ mehr als doppelt so hoch wie der fossile Primärenergieverbrauch in Höhe von 2.052 PJ bei einem Stromimport von 220 PJ. Als die beiden wichtigsten stehen die Primärenergieträger Windenergie und die in allen Sektoren genutzte Biomasse mit einem Anteil von jeweils 19 % quasi gleich auf, gefolgt von Geothermie und Umweltwärme mit zusammen knapp 15 % und Solarenergie (sowohl Photovoltaik zur Stromerzeugung als auch Solarthermie zur Wärmebereitstellung) mit zusammen 11 %. Wasserkraft spielt eine eher untergeordnete Rolle. Von den verbleibenden fossilen Energieträgern sind Erdgas (13 %) und Mineralöl (10 %) die beiden wichtigsten. Braun- und Steinkohle tragen zusammen nur noch halb so viel wie Erdgas allein bei und andere fossile Energieträger einschließlich Abfall haben nur noch einen Anteil von 2 %.

Noch deutlich dominanter sind die erneuerbaren Energieträger im KS 95 für das Jahr 2050: Sie tragen mit 5.025 PJ fast sieben mal so viel zum Primärenergieverbrauch bei wie die verbleibenden 739 PJ aus fossilen Energieträgern, während 24 PJ Strom und 143 PJ synthetische Brennstoffe importiert werden. Da es beim Endenergieverbrauch einen starken Wechsel von fossilen Energieträgern zu direkter Stromnutzung und strombasierten Energieträgern gibt, deckt die Windenergie allein mehr als ein Drittel des gesamten Primärenergieverbrauchs. Auch der Beitrag von Biomasse, Geothermie/Umweltwärme und Solarenergie ist jeweils größer als der gesamte fossile Primärenergieverbrauch. Lediglich der Beitrag der Wasserkraft hat – wie in den anderen Szenarien auch – eine eher untergeordnete Rolle. Von den verbleibenden fossilen Energieträgern ist Erdgas – der spezifisch emissionsärmste – mit Abstand der wichtigste und hat einen gleich hohen Anteil wie Braunkohle, Steinkohle und Mineralöl zusammen. Sonstige fossile Energieträger einschließlich des fossilen Anteils des Abfalls haben nur noch einen sehr geringen Anteil am Primärenergieverbrauch.

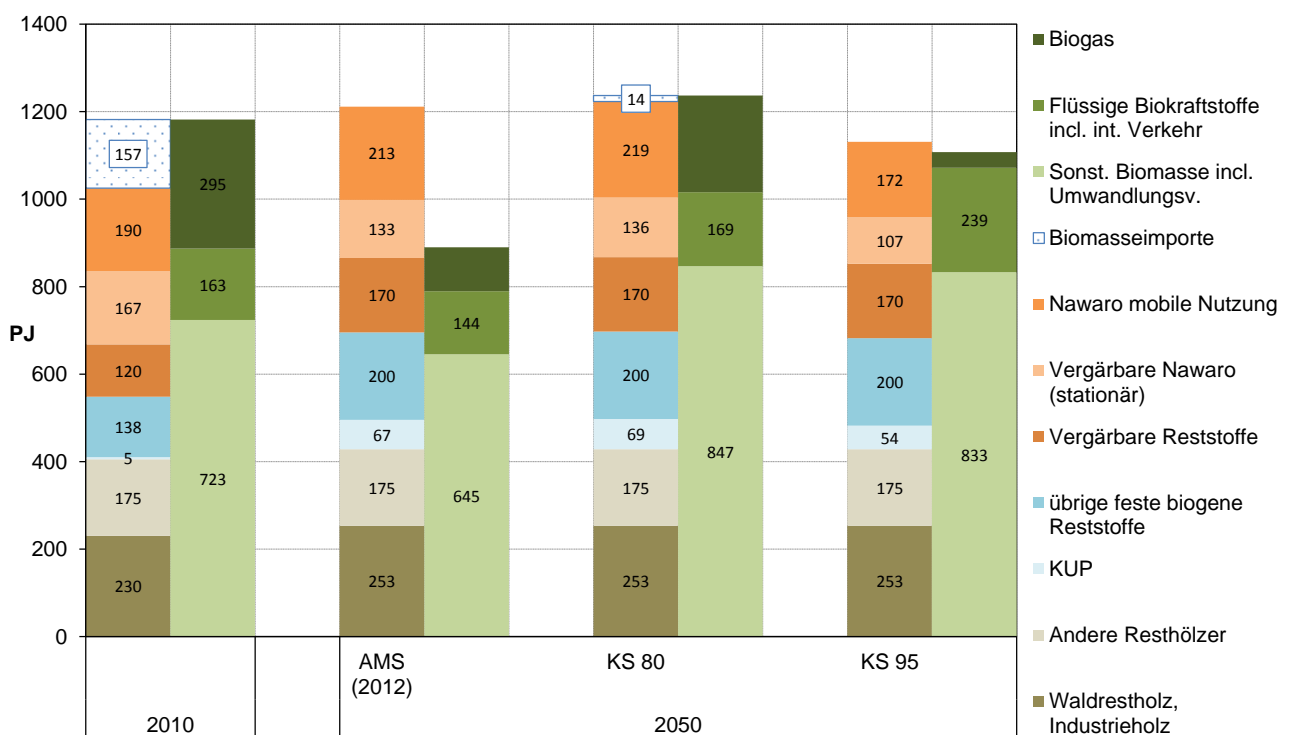
Abbildung 5-3: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs, 2010-2050



Anmerkung: PEV = Primärenergieverbrauch  
 Quelle: Eigene Berechnungen

Zu Beginn der zweiten Modellierungsrunde wurde eine vertiefte Analyse der Biomassepotenziale zur energetischen Nutzung durchgeführt woraus sektorale Biomasserestriktionen abgeleitet wurden.<sup>19</sup> Vorgabe für das KS 80 und KS 95 war, den Biomassebedarf, soweit möglich, mit inländischer Biomasse zu decken. Damit konnte überprüft werden, ob die Gesamtemissionsreduktionen auch mit dem limitierten Einsatz von inländisch produzierter Biomasse möglich sind. Ein Vergleich der ermittelten inländischen Biomassepotenziale und des Biomasseeinsatzes der unterschiedlichen Sektoren macht deutlich, dass die Emissionsreduktionen im Jahr 2050 im AMS (2012), im KS 80 und KS 95 fast komplett mit inländisch produzierter Biomasse erreicht werden können.

**Abbildung 5-4: Vergleich der inländisch verfügbaren und der eingesetzten Biomasse im Jahr 2050 in den verschiedenen Szenarien**



Anmerkung: jeweils linker Balken = inländisch verfügbares Biomassepotenzial, rechter Balken= Biomassebedarf;

KUP = Holz aus Kurzumtriebsplantagen, Nawaro = nachwachsende Rohstoffe

Quelle: Eigene Berechnungen

Das Biomassepotenzial setzt sich aus Waldrestholz bzw. Industrieholz, anderen Resthölzern, anderen festen biogenen Reststoffen, Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP), vergärbaren Reststoffen und stationären, vergärbaren nachwachsenden Rohstoffen (Nawaro) und Nawaro zur mobilen Nutzung zusammen. Allein die Nawaros werden auf landwirtschaftlichen Nutzflächen angebaut und machen in etwa ein Drittel des verfügbaren Biomassepotenzials aus.

<sup>19</sup> Siehe Anhang *Biomassepotenziale zur energetischen Nutzung sowie Allokation auf Sektoren* der Langfassung dieses Berichts.

Im Jahr 2010 wurden auf etwa 2,1 Mio. ha Nawaros für die energetische Nutzung angebaut. Im AMS (2012) geht die zur Verfügung stehende Fläche auf 1,9 Mio ha im Jahr 2050 zurück. Im KS 80 stehen 2,0 Mio ha für den Anbau von Energie-Nawaros zur Verfügung, während im KS 95 die Anbaufläche auf 1,5 Mio ha zurückgeht.

In den Übergangsjahren 2020, 2030 und 2040 übersteigt der Biomassebedarf teilweise das zur Verfügung stehende inländischen Biomassepotenzial. Um die von den Sektoren nachgefragte Menge an Biomasse zur Verfügung zu stellen, kann entweder weiterhin Biomasse importiert werden, oder es müssen mehr landwirtschaftliche Nutzflächen für den Biomasseanbau genutzt werden. In den Szenarien wird davon ausgegangen, dass zusätzliche Biomasse importiert wird, um den Bedarf der Sektoren zu decken.

## 6. Ökonomische Aspekte stringenten Klimaschutzes

### 6.1. Ökonomische Auswirkungen

Die ökonomische Analyse des KS 80 zeigt, dass die beschriebene Strategie aus Effizienzpolitik plus erneuerbarem Strom plus Produkt- und Prozessinnovation eine no-regret Strategie darstellt, die sich für Deutschland langfristig auszahlen würde. Durch die kombinierte Wirkung der Klimaschutzmaßnahmen liegt das BIP im Jahr 2050 per Saldo etwa 4,4% höher als im AMS (2012), was einer Zunahme der jährlichen Wachstumsrate von etwa 0,11 Prozentpunkten von 2010 bis 2050 gegenüber dem AMS (2012) entspräche.

Das 80%-Klimaschutzziel treibt den Strukturwandel, regt die Investitionstätigkeit an und wirkt sich positiv auf das Wirtschaftswachstum in Deutschland aus. Im KS 80 ergeben sich insgesamt positive Beschäftigungseffekte, besonders deutlich sind diese in den Sektoren Bau, Immobilien und Beratung sowie Energie und Verkehr. Auch im internationalen Handel ergeben sich positive Effekte, insbesondere auf den Energiemärkten: Die Nettoimporte fossiler Energieträger nehmen deutlich ab mit positivem Effekt auf die Handelsbilanz.

Als Basis für die ökonomische Analyse dienten insbesondere Informationen über die Veränderungen in Investitionen, Betriebsausgaben (Strom-, Energieausgaben) und staatliche Förderausgaben aus den sektoralen Modellen (Industrie, Gebäude, Verkehr, etc.).

Zentrale Impulse für die Ermittlung gesamtwirtschaftlicher Auswirkungen sind daher:

- Investitionen<sup>20</sup>,
- Strompreise<sup>21</sup>,
- Energieausgaben<sup>22</sup>,
- Importänderungen<sup>23</sup> und

<sup>20</sup> Zwischen 13 und 27 Milliarden Euro jährlich gegenüber dem AMS (2012)

<sup>21</sup> Leicht steigende Preise in KS 80, sinkende Preise in KS 90

<sup>22</sup> Preis x Menge für Strom, Wärme, Verkehr; teils moderat steigend, meist stark sinkend (sektoral bis zu 35 % sinkend gegenüber AMS (2012))

<sup>23</sup> Insbesondere erhöhte Biomasseimporte und Importe von Vorleistungen für Investitionsgüter

- staatliche Förderausgaben<sup>24</sup>.

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. im Kapitalstock oder der Gesamtfaktorproduktivität) und verändern damit auch die langfristige ökonomische Entwicklung.

In einer solchen Betrachtung werden nicht nur die primären Veränderungen der Impulse erfasst – die direkten Effekte – sondern auch noch die daraus resultierenden Zweitrundeneffekte – die indirekten Effekte.

Eine Gegenfinanzierung zusätzlicher Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen wird gewährleistet (siehe Kapitel 6.2), sei es durch Einsparungen von Energieausgaben, durch staatliche Fördermaßnahmen, einbehaltene Gewinne oder durch Weitergabe über Produktpreise.<sup>25</sup>

Bei einigen wenigen Konsumveränderungen wurden auch Änderungen in den Werten angenommen z. B. ein geringerer Fleischkonsum.

Die Investitionen für energetische Maßnahmen im Gebäudesektor im Rahmen von Sanierungen, Heizsystemwechseln und Installation von Solaranlagen betragen im Mittel jährlich etwa 16 Milliarden Euro im KS 80. Ausschlaggebend für energetische Sanierungen ist dabei der verfügbare und günstigste technische Standard. Vergleichsweise geringe Mittel, jährlich etwa 3 Milliarden Euro im KS 80, fallen zusätzlich zu den Investitionen im AMS (2012) für den Umbau des Energiesystems an.

Die Implementierung der Klimaschutzmaßnahmen bewirkt ein stärkeres Wachstum des Bruttoinlandsproduktes im Zeitverlauf, als es im AMS (2012) der Fall ist. Dieser Effekt bedingt sich beispielsweise durch Akzelerator- und Multiplikatoreffekte welche durch die zusätzlich benötigten Investitionen entstehen.<sup>26</sup> Darüber hinaus haben diese Investitionen einen positiven Einfluss auf den Produktivitätsfortschritt. Energieeinsparungen, die durch die Maßnahmen ausgelöst werden, geben Einkommen (gegenüber dem AMS (2012) frei, das für zusätzlichen Konsum in anderen Sektoren verwendet werden kann. Auf den Staatshaushalt haben die Veränderungen zum Teil gegenläufige Wirkungen: durch den höheren Konsum werden höhere indirekte Steuereinnahmen und durch das höhere Volkseinkommen höhere direkte Steuereinnahmen generiert, während gleichzeitig die Staatsausgaben für notwendige Fördermaßnahmen steigen. Insgesamt überwiegen aber die positiven Effekte auf den Staatshaushalt.

Insgesamt steigt die Gesamtbeschäftigung in Deutschland durch die Klimaschutzmaßnahmen um etwa 504 000 Personen in 2050. Dies entspricht einer Verbesserung von etwa +1,3% gegenüber dem AMS (2012). Die Beschäftigungsveränderungen fallen sektoral unterschiedlich aus: höhere Beschäftigungseffekte zeigen sich naturgemäß in den Sektoren, in denen viel investiert wird. Dies ist insbesondere im Bausektor, im Verkehrs- sowie im Energiesektor der Fall. Im Energiesektor sind in 2050 die Beschäftigungsgewinne absolut gesehen mit am größten; allerdings ist die absolute Beschäftigung in diesem Sektor vergleichsweise gering. Vermutlich sind deutliche Produktivitätsverschiebungen durch die Anwendung neuer Technologien (erneuerbare Energiegewinnung) zu erwarten.

<sup>24</sup> F&E, direkte Zuschüsse, Kreditverbilligungen, Infrastrukturinvestitionen

<sup>25</sup> Zu einem kleineren Teil sind für die Investitionsfinanzierung auch neue Kredite notwendig; allerdings ist der Umfang nicht so groß als dass dies Änderungen auf dem Finanzmarkt (z. B. Erhöhung der Zinsrate) hervorrufen würde.

<sup>26</sup> Auch Konsumveränderungen können einen Einfluss haben, da sich die sektorale Erwartungshaltung und damit auch die Investitionen modellendogen verändern.

Auf Makroebene steigen BIP und Beschäftigung, weil

- das Wachstum bremsende Effekte vergleichsweise gering ausfallen,
- durch die Klimaschutzmaßnahmen keine Importsteigerung induziert wird, was heimische Produktion und Beschäftigung begünstigt<sup>27</sup>,
- Investitionsimpulse eine Steigerung von Produktionspotenzial und damit Outputwachstum und Beschäftigung in den nachfolgenden Perioden induziert und
- die durchschnittliche Arbeitsproduktivität aufgrund der sektoralen Verschiebungen steigt.

Die Ergebnisse für das KS 95 auf ökonomischer Ebene sind ambivalenter zu sehen. Es werden teilweise sektoral erheblich höhere Investitionen nötig v.a. im Energiesektor, aber auch in der Herstellung synthetischer Kraftstoffe und im Gebäudesektor. Damit können einige Annahmen (z. B. bezüglich der Neutralität des Geldmarktes oder der Einpreisung in den Strompreis) nicht mehr gehalten werden. Zur Sicherung dieses Szenarios müssten deutlich stärkere staatliche Markteingriffe erfolgen, z. B. über neue Formen von Darlehen, Infrastrukturfonds o.ä. Allerdings stellt sich hierbei die Frage der Verdrängung anderer Investitionen und auch die entstehenden Einkommenseffekte sind deutlich schwieriger zu beurteilen, was eine Gesamtbeurteilung der ökonomischen Effekte dieses Szenarios nach momentanem Stand nicht sinnvoll erscheinen lässt. Deutlich wird aber zumindest, dass die Lenkungswirkung des Staates (z. B. in Hinblick auf Risikoreduktion durch verbindliche Bekenntnisse) für dieses Szenario noch viel wesentlicher wird.

## 6.2. Finanzierung von Klimaschutz

Die im Vorangegangenen beschriebenen gesamtwirtschaftlichen Effekte gehen einher mit der Frage Finanzierung.

Die Finanzierung der notwendigen Investitionen kann dabei prinzipiell über mehrere Wege erfolgen:

- **Finanzierung über staatliche Subventionen:** Eine Subvention ist eine finanzielle Leistung aus öffentlichen Mitteln an Betriebe oder Unternehmen, die nicht zurückgezahlt werden muss. In einigen Sektoren ist diese Art der Finanzierung bei der Verfolgung stringenter Klimaschutzziele notwendig. So wird beispielsweise angenommen, dass Entschädigungszahlungen, welche durch die Umwidmung von landwirtschaftlicher Nutzfläche in Karbonsenken anfallen, durch den Staat getragen werden. Auch der Bereich der Verkehrsinfrastruktur ist und wird bisher größtenteils von der öffentlichen Hand getragen.
- **Finanzierung durch Kreditaufnahme oder einbehaltene Gewinne:** Betriebe und Unternehmen können Maßnahmen durch eine Kreditaufnahme oder durch das Einbehalten von Gewinnen finanzieren. In beiden Fällen verringert sich zunächst die Wertschöpfung. Wirtschaftlich rentabel wird es für das investierende Unternehmen dann,

---

<sup>27</sup> zu einem erheblichen Teil bedingt durch die politischen Rahmenbedingungen, zumindest in der mittleren Frist



wenn die so entstandenen Kosten in den Folgejahren durch ausgelöste Energieeinsparungen ausgeglichen werden können.

- **Finanzierung durch Preisweitergabe an den Endverbraucher oder an belieferte Unternehmen:** Ein Unternehmen kann Maßnahmen dadurch finanzieren, dass es seine Investitionskosten durch Verteuerung seiner Produkte an den Endverbraucher „durchreicht“. Modelltechnisch erfolgt die Abbildung der Preisweitergabe über die Veränderung der Vorleistungsströme, die die nachfragenden Sektoren vom Sektor erhalten, bei dem die höheren Preise ursächlich anfallen. Zuletzt wirkt sich der erhöhte Preis auf den sektoralen Konsum der Endverbraucher aus.
- **Finanzierung durch ausländische Kapitaltransfers:** Es ist denkbar, dass durch die Klimaschutzpolitik Investitionsanreize für Kapitalanleger aus dem Ausland geschaffen werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings auch die Bereitstellung von Planungssicherheit durch die Politik, z. B. durch das nachhaltige Bestehen von Fördermaßnahmen. Diese Finanzierungsstruktur spielt in der hier erfolgten Betrachtung allerdings nur eine untergeordnete Rolle.

Bei der überwiegenden Zahl der Finanzierungsmaßnahmen ist anzumerken, dass die damit zusammenhängenden Finanzströme temporär zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen. So erstrecken sich zum Beispiel die Mietumlagen von Gebäuderenovierungsmaßnahmen über einen längeren Zeitraum, während die Maßnahme als solches in einem Jahr anfällt. Es können damit BIP-Effekte auftreten, welche sich erst im Zeitverlauf akkumulieren: Die Investition als solches hebt dann im Jahr der Investitionstätigkeit zunächst das BIP an, dann treten Zweitrundeneffekte dieses höheren BIPs auf und diese kumulierten Effekte können Kosten der Investition übersteigen. Darüber hinaus sorgen Investitionen für Effizienzgewinne und Spillover-Effekte, welche Produktivitätssteigerungen nach sich ziehen die insgesamt positiv wirken. Dabei zeigen direkte Investitionen in den Klimaschutz eine zusätzliche Produktivitätswirkung, induzierte Investitionen lediglich eine normale Produktivitätswirkung.

Unter der Annahme, dass sich die Investitionen in die Energieinfrastruktur durch die Erhöhung des Strompreises selbst tragen, wird die überwiegende Zahl an Maßnahmen im KS 80 von den Unternehmen bzw. den Konsumenten getragen. Allerdings sind zeitweise staatliche Subventionen bzw. Investitionen in Höhe von etwa 4 Milliarden Euro in der ersten Dekade der Maßnahmenimplementierung notwendig. Dieser „externe“ Investitionsbedarf geht allerdings auf etwa 750 Millionen Euro jährlich bis zum Jahr 2050 zurück.

Die Erwartungshaltung der Konsumenten und Firmen ist ein wesentlicher Faktor in der Amortationsrechnung und entscheidend für die Implementierung der Maßnahmen, wobei auch verhaltensändernde Maßnahmen nicht zu unterschätzen sind, wie die Unterschiede bei den impliziten Zinsraten zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen und realen Marktzinssätzen zeigen. Investitionen in Klimaschutz sind außerdem häufig Investitionen in langfristige Kapitalgüter mit Amortisationszeiträumen, die in Dekaden gemessen werden. Dadurch steigen Investitionsrisiken und Unsicherheiten. Durch verbindliche Ziele und Regelungen kann die Politik dazu beitragen diesen Risiken und Unsicherheiten entgegen zu wirken und so ein Klima zu schaffen, in dem langfristige Investitionen in Klimaschutz lohnenswert sind.

## 7. Fazit

Die Szenarien lassen sehr deutlich drei Schlussfolgerungen zu:

1. Unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten sind die ambitionierten Ziele des Energiekonzepts erreichbar. Mangelnde Emissionsminderungspotenziale stehen somit dem Energiekonzept nicht entgegen. Die bisher umgesetzten Maßnahmen reichen bei Weitem nicht aus, um das Treibhausgasminderungsziel zu treffen, wie das unter diesen Voraussetzungen untersuchte Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) deutlich erkennen lässt.
2. Der im Energiekonzept vorgegebene Mindestzielpfad ist für die Jahre 2020 bis 2040 knapp ausreichend, um eine Minderung von 80 % bis zum Jahr 2050 zu erreichen. Um allerdings eine Minderung von 90 % (siehe erste Modellierungsrunde) und mehr bis zum Jahr 2050 zu erreichen, reicht der vorgegebene Mindestzielpfad nicht aus. Die Szenarienanalyse weist hier als Wegmarken eine Minderung um mindestens 60 % bis 2030 und mindestens 80 % bis 2040 aus. Es wird deutlich, dass die Minderung in den ersten beiden Jahrzehnten schneller erfolgen muss, als zwischen 2040 und 2050, da es dann nur noch wenige kostengünstige Minderungspotenziale gibt.
3. Bei einem Zielwert von 95 % Treibhausgasminderung sind deutlich anspruchsvollere Emissionsreduktionen von jedem Sektor zu erbringen, als bei einem Zielwert von 80%. Die Wechselwirkung zwischen den Sektoren wird immer größer. Da das Minderungspotenzial in den Nichtenergiesektoren (insbesondere in der Landwirtschaft) begrenzt ist, müssen die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus den Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr (einschließlich des internationalen Luft- und Seeverkehrs), Industrie und Haushalte/GHD in Summe mit etwa 97 % entsprechend überdurchschnittlich reduzieren.

Daraus folgt auch, dass im Hinblick auf die Zielerreichung noch ein erheblicher politischer Handlungsbedarf besteht. Kein Sektor kann davon ausgenommen werden. Die Handlungsebenen politischer Instrumente für zusätzlichen Klimaschutz liegen sowohl auf nationaler Ebene, aber insbesondere im Bereich des Emissionshandels auch auf europäischer Ebene. Instrumentell steht dafür ein breites Spektrum zur Verfügung, von dem soweit wie möglich auf der aggregierten Ebene wie sektorspezifisch Gebrauch gemacht werden muss. Die vorliegende Studie liefert wichtige Anhaltspunkte für Meilensteine und Politikinstrumente:

### 1. Energiewirtschaft:

- Im Bereich der Energiewirtschaft muss zur Erreichung der Emissionsziele die Deckung der Stromnachfrage bis zum Jahr 2050 weitreichend (KS 80) bzw. fast vollständig (KS 95) CO<sub>2</sub>-neutral erfolgen.
- Dabei ist zunächst zu berücksichtigen, dass die Stromnachfrage bis 2030 durch sehr ambitionierte Energieeffizienzmaßnahmen in allen Sektoren merklich (KS 80) bzw. deutlich (KS 95) sinken muss, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Im KS 80 nimmt die Stromnachfrage aufgrund neuer Verbraucher (insbesondere Elektromobilität, aber auch zum Beispiel, Wärmepumpen.) bis 2050 jedoch wieder zu und erreicht so wieder das Niveau des Jahres 2010. Im KS 95 nimmt der Stromverbrauch bis 2050 sogar deutlich zu – trotz sehr ambitioniert angenommener Effizienzpolitik. Der Grund ist die für die Dekarbonisierung in

anderen Sektoren erforderliche zusätzliche Nachfrage nach Strom (hier auch strombasierte Kraftstoffe).

- In beiden Szenarien erfolgt die Stromerzeugung im Jahr 2050 überwiegend auf Basis erneuerbarer Energien, wobei im KS 95 aufgrund der höheren Stromnachfrage im Jahr 2050 eine deutlich höhere installierte Leistung benötigt wird als im KS 80. Bereits im Jahr 2030 hat sich in beiden Szenarien der Stromerzeugungsmix sehr deutlich verändert, wobei Windkraft die wichtigste Stromerzeugungsquelle vor Photovoltaik ist.
- Bis 2020 orientiert sich in allen drei Szenarien der Zubau von Anlagen an den Technikkorridoren des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) und er verläuft noch bis 2030 sehr ähnlich, so dass auch die absolute erneuerbare Stromerzeugung folglich in allen drei Szenarien bis zu diesem Zeitpunkt ähnlich hoch ist (Abbildung 5-2). Unterschiede in den erneuerbaren Anteilen am Bruttostromverbrauch zwischen den Szenarien bis 2030 ergeben sich vor allem durch die unterschiedlichen Entwicklungen des gesamten Bruttostromverbrauchs.
- Im Rahmen der Dekarbonisierungsstrategie nimmt der Anteil fossiler Brennstoffe bis zum Jahr 2050 sehr stark ab, wobei im KS 80 noch etwas Erdgas und wenig Kohle eingesetzt wird und im KS 95 im Jahr 2050 keine Kohleverstromung mehr erfolgt. Aufgrund der ambitionierten Kohlepolitik halbiert sich im KS 80 die Braunkohleverstromung bis zum Jahr 2030, während die Kohleverstromung im KS 95 bereits 2030 kaum noch eine Rolle spielt.
- Neue Kohlekraftwerke sind über die bereits im Bau oder Planung befindlichen Kapazitäten hinaus nicht erforderlich, ebenso keine zusätzlichen Tagebaue oder -Erweiterungen. Die Anwendung der Kohlenstoffdioxidabscheidung und -speicherung (CCS-Technik) wird im Kraftwerkbereich nicht benötigt.
- Import von Strom spielt im KS 80 im Jahr 2050 noch eine wesentliche Rolle, während der Import im KS 95 im Jahr 2050 unwesentlich ist. Im Jahr 2030 wird kein (KS 80) bzw. nur geringe Mengen (KS 95) Strom importiert.
- Es reicht nicht aus, die Stromerzeugung weitgehend auf erneuerbare Energien umzustellen, auch die übrige Energiewirtschaft muss weitgehend dekarbonisiert werden. Eine wichtige Stellschraube hier ist, erneuerbare Energien (beispielsweise Solarthermie) auch zur Versorgung mit Fernwärme zu nutzen.

## 2. Verkehr:

- Als Vision für den nachhaltigen Verkehr der Zukunft ergibt sich folgendes Bild: Mobilität für alle ist weiterhin sichergestellt – jedoch mit weniger Verkehr und mit einer intelligenten multimodalen Vernetzung der Verkehrsträger. In Städten dominieren öffentlicher Verkehr, Rad- und Fußverkehr. Der motorisierte Verkehr basiert so weit wie möglich auf der direkten Nutzung von erneuerbarem Strom (batterieelektrische Fahrzeuge, Schienenverkehr, ggf. Oberleitungs-Lkw). Wo Elektrifizierung keine Option darstellt, kommen im KS 95 nach 2030 nachhaltige strombasierte Kraftstoffe zum Einsatz.
- Bei einem Gesamtziel von 80 % bis 2050 über alle Sektoren kann es ausreichen, dass der Verkehr seine Emissionen um 60 % bis 80 % reduziert. Bei einem Gesamtziel von 95% muss der Verkehr praktisch vollständig dekarbonisieren. Um die Gefahr von Fehlallokationen bei der

Nutzung von nur begrenzt nachhaltig verfügbaren Energieträgern (insbesondere Biomasse) zu minimieren, kann neben der Festlegung eines CO<sub>2</sub>-Ziels die gleichzeitige Festlegung eines Ziels für den Endenergieverbrauch sinnvoll sein.

- Der Fokus politischer Maßnahmen liegt bis 2030 auf der Förderung effizienterer Verkehrsträger (öffentlicher Verkehr, Schiene, Fahrrad) sowie auf einer Effizienzsteigerung bei Pkw und Lkw. Zur Vermeidung von Rebound-Effekten werden die durch steigende Effizienz sinkenden Kilometerkosten im Straßenverkehr ausgeglichen, z. B. durch Erhöhung der Mineralölsteuer bzw. fahrleistungsabhängige Maut.
- Nach heutigem Kenntnisstand ist für eine 95%-ige THG-Minderung der Einsatz stromgenerierter Kraftstoffe notwendig. Stromgenerierte Kraftstoffe sind jedoch teuer und mit hohen Wirkungsgradverlusten verbunden. EE-Strom kann nicht beliebig ausgebaut werden und sollte effizient alloziert werden. Der breite Einsatz stromgenerierter Kraftstoffe ist daher erst im Zeitraum nach 2030 sinnvoll. Hierfür müssen frühzeitig Nachhaltigkeitskriterien entwickelt werden, die insbesondere auch die Quellen des für die Synthetisierung verwendeten Kohlendioxids umfassen. Bis zum Jahr 2030 und auch darüber hinaus muss der Fokus auf der Reduktion des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors liegen, welcher deutlich über die Ziele des Energiekonzepts hinausgeht.

### 3. Gebäude (Haushalte und GHD):

- Eine mindestens 80%-ige Reduktion des Primärenergiebedarfs in 2050 gegenüber 2008 wird in den Szenarien durch eine Erhöhung der Effizienz der Wärmebereitstellung in Gebäuden erreicht. Dazu müssen Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmen zur Energieträgersubstitution ergriffen sowie Suffizienzmaßnahmen angeregt werden.
- Die vorgestellten Szenarien basieren auf einer Reihe von institutionellen und organisatorischen Voraussetzungen. Diese Voraussetzungen tragen dazu bei, dass die Sanierungsrate und die energetische Qualität der Sanierungen den Erwartungen in den Szenarien entsprechen. Die wesentlichen Voraussetzungen bis 2030 sind:
  - Eine vollständige Erfassung von Daten zu realisierten Voll- und Teilsanierungen inklusive der energetischen Qualität nach Sanierung;
  - Die Etablierung eines messbaren, standardisierten und daher vergleichbaren Kennwerts für die energetische Qualität der Gebäude;
  - Anreize für energiesparendes Nutzerverhalten bei der Gebäudebeheizung und für den Wechsel zu erneuerbaren Energien, z. B. durch steuerliche Maßnahmen (im KS 95 unterstellt);
  - Systeme und Verfahrensweisen, welche Kosten und Zeitersparnisse im Sanierungsprozess schaffen, wurden entwickelt.
  - Im Sanierungsmarkt konnte die Spannung zwischen den verschiedenen Gewerken auf Handwerksebene aber auch zwischen Architekten, Bauingenieuren und Stadtplanern durch die gemeinsame Entwicklung und Testprojekte sowie regelmäßige Schulungen mit Anreizsystem aufgelöst werden.

- Die Möglichkeit zur Kontrolle und gegebenenfalls rechtlichen Einforderung einer hohen Sanierungsqualität wird geprüft.
- Der Hauptunterschied zwischen dem KS 80 und dem KS 95 ist die um den Faktor 1,4 angehobene Sanierungsrate und die um 20% gesteigerte Sanierungstiefe. Bis 2050 werden im KS 80 im Schnitt 2,2% der Gebäude pro Jahr saniert, während es im KS 95 3,1% der Gebäude sind.

#### 4. Industrie:

- Im KS 80 zeichnet sich der Industriegesektor im Jahr 2050 durch hohe Effizienzfortschritte bei der Stromnachfrage, neue Herstellungsverfahren und den Ausbau der Kreislaufwirtschaft aus.
- Im KS 95 entwickelt sich der Industriegesektor zu einem Hocheffizienzsektor, in welchem neue Herstellungsverfahren schnell Marktreife erreichen und die Kreislaufwirtschaft deutlich verstärkt ist.
- Energieträger sind in 2050 Strom, Biomasse, etwas Fernwärme und etwas Kohle (nur zur Eisenreduktion). Im KS 80 kommt zusätzlich noch Erdgas zum Einsatz, welches aufgrund des deutlich höheren CO<sub>2</sub>-Preises im KS 95 durch Biomasse ersetzt wird.
- Im KS 80 tragen die Industrieprozesse nur unterproportional zu Emissionsminderungen bei. Im KS 95 erfolgt ein Teil der CO<sub>2</sub>-Reduktion bei prozessbedingten Emissionen der Industrie durch den Einsatz der CCS-Technologie. Die Abscheidung erfolgt u.a. bei der Herstellung von Rohstahl, Zement und einigen chemischen Produkten. Insgesamt werden im Jahr 2050 41 Mt Kohlendioxid über CCS abgeschieden. Steht die Technologie CCS aus irgendeinem Grund bis 2050 nicht zur Verfügung, so müssten andere Strategien zur Minderung der Prozessemissionen (weitergehende Substitution von Prozessen und Produkten) entwickelt werden, aber auch insbesondere die erneuerbaren Energien deutlich stärker ausgebaut werden.
- Die großen Effizienzfortschritte im Industriegesektor setzen voraus, dass bereits bis zum Jahr 2030 neue Herstellungsverfahren die Marktreife erreichen und der Wandel in der Stahlindustrie von Oxygen- zur Elektrostahlherstellung vorangeschritten ist. Aufgrund der langen Lebensdauer des Kapitalbestandes muss in allen Bereichen (Prozesstechnik, Dampferzeuger, Elektromotorsysteme, etc.) ein deutlicher Fortschritt bis 2030 erzielt sein. Im KS 95 müssen zusätzlich bis 2030 Instrumente zur Erschließung ambitionierter Effizienzpotenziale (Systemoptimierung, Abwärme, Niedertemperaturwärme) umgesetzt und effektiv genutzt werden. Außerdem wird zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> die Marktreife der CCS-Technologie bis zum Jahr 2030 vorausgesetzt.
- Im KS 95 ist ein deutlich ambitionierterer Effizienzfortschritt zu verzeichnen – besonders im schwierig erschließbaren Bereich der Niedertemperatur-Abwärme. Auch der Materialeffizienzfortschritt ist schneller. Innovative hocheffiziente Herstellungsverfahren erreichen schneller die Marktreife.
- Notwendige Instrumente, um die beschriebene Transformation des Industriegesektors zu erreichen, umfassen ein Preissignal für den Nicht-EHS-Sektor (z. B. CO<sub>2</sub>-Steuer) und ein hohes Preisniveau der THG-Zertifikatepreise im EHS noch vor 2030, Förderung von F&E sowie Markteinführung bei CO<sub>2</sub>-armen Industrieprozessen (vor 2020), finanzielle Förderung

von Effizienztechniken mit längeren Amortisationszeiten (> 5 Jahre), verpflichtendes umfassendes Energiemanagement und Energieberatung.

## 5. Landwirtschaft und LULUCF:

- Die Halbierung der landwirtschaftlichen Emissionen bis 2050 bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der landwirtschaftlichen Produktion für eine wachsende Weltbevölkerung birgt große Herausforderungen und erfordert vielfältige Forschungsanstrengungen. Auf Grund biologischer Prozesse im Pflanzenbau und in der Tierhaltung sind hohe Emissionsreduktionen durch technische Maßnahmen wie in anderen Sektoren nicht möglich.
- Die wesentlichen Reduktionspotenziale umfassen die Verbesserung der Stickstoffeffizienz, die Erhöhung des Flächenanteils ökologischer Landwirtschaft und technische Maßnahmen zum Umgang mit Wirtschaftsdüngern auf der Angebotsseite genauso wie Einschränkungen im Konsum und einen bewussten Umgang mit landwirtschaftlichen Produkten auf Seiten der Nachfrage. Vor allem die Reduktion des Konsums tierischer Produkte führt zu einem Rückgang der Tierbestände und damit zu geringeren Treibhausgasen in der Landwirtschaft. Damit entstehen Exportmöglichkeiten für pflanzliche Produkte („frei werdende“ Futterflächen) – von einer Exportstrategie für tierische Produkte sollte zugunsten der Klimabilanz abgesehen werden.
- Im KS 95 wirken grundsätzlich die gleichen Maßnahmen wie im KS 80, allerdings wird eine konsequentere Umsetzung angenommen.
- Die Minderung von Emissionen insbesondere aus der landwirtschaftlichen Nutzung organischer Böden ist im LULUCF-Sektor ein entscheidender Beitrag zur Emissionsminderung. Hierzu wird im KS 80 angenommen, dass dies auf 30% der entsprechenden Fläche und im KS 95 auf 95% der Fläche stattfindet. Der Torfabbau wird in beiden Szenarien bis 2020 eingestellt.

## 6. Übergreifende Aspekte:

- Ökonomische Wirkungen: Im KS 80 ergeben sich insgesamt positive Beschäftigungseffekte, besonders deutlich sind diese in den Sektoren Bau, Immobilien und Beratung sowie Energie. Auch im internationalen Handel ergeben sich positive Effekte, insbesondere auf den Energiemärkten: Die Nettoimporte fossiler Energieträger nehmen deutlich ab mit positivem Effekt auf die Handelsbilanz.
- In beiden Zielszenarien entfalten kontinuierlich steigende und bis 2050 hohe bis sehr hohe CO<sub>2</sub>-Preise oder Preisaufschläge auf fossile Energieträger eine starke Anreizwirkung zur Emissionsreduktion. Die Frage, wie die entsprechenden Anreize in der Praxis durch gezielte steuerliche Maßnahmen oder andere Instrumente bewirkt werden können, sollte daher Gegenstand der Strategiebildung im Klimaschutz sein.
- In nahezu allen Sektoren spielt gezielte Forschung und Entwicklung zur Marktdurchdringung und Kostensenkung von Klimaschutztechnologien eine wichtige Rolle, insbesondere im KS 95, das sowohl eine deutlich breitere Durchdringung mit marktbesten Technologien, als auch die langfristige Anwendung bisher nicht kommerziell erprobter Technologien wie CCS,

die Wärmebereitstellung über Strom im Großmaßstab (Power-to-Heat) oder die Herstellung synthetischer Brennstoffe über PtX (Power-to-Gas; Power-to-Liquid) unterstellt.

- Biomasse: Die Erreichung von 80-95 % Treibhausgasminderung ist auch mit einem nur begrenzten Einsatz von inländisch nachhaltig produzierter Biomasse in allen Sektoren möglich. Die Anbaufläche für Biomasse liegt in etwa in der heutigen Größenordnung.
- Emissionen und Einbindungen von Treibhausgasen durch Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft werden bislang ebenso wie die Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs nicht auf die nationalen Klimaschutzziele angerechnet. In beiden Zielszenarien können die angestrebten Minderungen jedoch auch unter Berücksichtigung dieser Sektoren erreicht werden. Dazu sind in diesen Bereichen jedoch ebenfalls erhebliche zusätzliche Anstrengungen notwendig.