

Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050

Arbeitspaket 1.1 im Forschungs- und
Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit:
**Wissenschaftliche Unterstützung „Erstellung und
Begleitung des Klimaschutzplans 2050“ für das
FKZ UM 15 41 1860**

Berlin, Juni 2016

Überarbeitete Fassung

Büro Berlin
Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0
info@oeko.de
www.oeko.de

Fraunhofer ISI
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe
Ansprechpartnerin Barbara
Schlomann
Telefon +49 721 6809-136
www.fraunhofer.de

IREES GmbH
Schönfeldstraße 8
D-76131 Karlsruhe
Ansprechpartner: Felix Reitze
Telefon +49 721 915696-0
www.irees.de

Bearbeitet von

Öko-Institut e.V.

Dr. Markus Haller

Julia Repenning

Moritz Vogel

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung

Dr. Barbara Schlomann

Matthias Reuter

IREES GmbH (Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien)

Prof. Dr. Eberhard Jochem

Dr. Felix Reitze

Michael Schön

Dr. Felipe Toro

Hinweis:

In die im Oktober veröffentlichte Fassung der Studie haben sich einige Zahlenfehler eingeschlichen. Diese wurden in der nun vorliegenden, aktualisierten Fassung korrigiert.

Insbesondere wurden durch einen Übertragungsfehler in den Abbildungen zur Stromerzeugung nach Energieträgern (Abb. 3-27 bis 3-30) im Szenario KSZ-KS90 eine Strommenge von ca. 50-100TWh zwischen den Sektoren „Biomasse“, „Erdgas“, „Wasser“ und „Sonstige“ falsch aufgeteilt. Die Stromerzeugung durch Biomasse wurde dadurch zu hoch dargestellt.

Darüber hinaus wurden mehrere kleine Anpassungen vorgenommen, unter anderem, um die Konsistenz zu den zugehörigen Sektorstudien zu verbessern. Keine dieser Änderungen hat Auswirkungen auf die inhaltlichen Aussagen der Studie.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
1. Einleitung	9
2. Welche Studien wurden untersucht?	10
3. Auswertung der Szenarien	14
3.1. Rahmendaten und Annahmen	15
3.1.1. Gesamtwirtschaftliche und demographische Rahmendaten	15
3.1.2. Preisentwicklung für Primärenergieträger und Emissionszertifikate	17
3.2. Entwicklung der Treibhausgasminderung	21
3.2.1. Betrachtete Treibhausgase und Sektoren	21
3.2.2. Entwicklung der gesamten Treibhausgasminderung	22
3.2.3. Entwicklung der sektoralen Treibhausgasminderung	24
3.3. Entwicklung des Primärenergiebedarfs	31
3.4. Entwicklung des Endenergiebedarfs	38
3.5. Entwicklung von Stromnachfrage und Stromerzeugung	45
3.6. Biomasse, CCS und strombasierte Energieträger	51
3.6.1. Biomasse	51
3.6.2. Carbon Capture and Storage (CCS)	52
3.6.3. Einsatz strombasierter Endenergieträger	53
5. Anschlussfähigkeit der Szenarien mit Blick auf internationale Studien	55
5.1. Szenarien für Deutschland aus internationalen Studien	56
5.1.1. Rahmendaten für Deutschland	56
5.1.2. Primär- und Endenergiebedarf Deutschland	59
5.1.3. Treibhausgas-Emissionen für Deutschland	61
5.2. Vergleich internationaler Trends mit zentralen nationalen Strategien	63
6. Robuste Kernaussagen und Leitstrategien	65
6.1. Rahmendaten	65
6.2. Treibhausgasminderung	65
6.3. Primär- und Endenergieverbrauch	66
6.4. Stromerzeugung	66
6.5. Biomasse, CCS, strombasierte Energieträger	67
6.6. Vereinbarkeit mit internationalen Klimaschutzstrategien	67

7.	Fazit	68
	Literaturverzeichnis	69
8.	Datenanhang	70
8.1.	Rahmendaten und Annahmen	70
8.2.	Entwicklung der Treibhausgasminderung	74
8.3.	Entwicklung des Primärenergiebedarfs	77
8.4.	Entwicklung des Endenergiebedarfs	81
8.5.	Entwicklung der Stromnachfrage und Stromerzeugung	85
8.6.	Biomasse, CCS und strombasierte Energieträger	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Rahmendaten: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten (CAGR) bis 2050	17
Abbildung 3-2:	Preisentwicklung für Rohöl	18
Abbildung 3-3:	Preisentwicklung für Erdgas	19
Abbildung 3-4:	Preisentwicklung für Steinkohle	20
Abbildung 3-5:	Preisentwicklung für Emissionszertifikate	21
Abbildung 3-6:	Zeitlicher Verlauf der gesamten THG-Emissionen	24
Abbildung 3-7:	Sektorale Aufteilung der verbleibenden THG-Emissionen in 2030	26
Abbildung 3-8:	Sektorale Aufteilung der verbleibenden THG-Emissionen in 2050	27
Abbildung 3-9:	Sektorale Aufteilung der Emissionsminderungen zwischen 1990 und 2030	28
Abbildung 3-10:	Sektorale Aufteilung der Emissionsminderungen zwischen 1990 und 2050	29
Abbildung 3-11:	Relative Minderung energiebedingter und nicht energiebedingter Emissionen zwischen 1990 und 2030	30
Abbildung 3-12:	Relative Minderung energiebedingter und nicht energiebedingter Emissionen zwischen 1990 und 2050	31
Abbildung 3-13:	Entwicklung des gesamten Primärenergiebedarfs 2010 bis 2060	32
Abbildung 3-14:	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in 2010 und 2030	34
Abbildung 3-15:	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)	35
Abbildung 3-16:	Änderung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern zwischen 2010 und 2030	36
Abbildung 3-17:	Änderung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern zwischen 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)	37
Abbildung 3-18:	Entwicklung der Energieintensität der Wirtschaftsleistung (Primärenergieverbrauch pro BIP) bis 2060	38
Abbildung 3-19:	Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs bis 2060	39
Abbildung 3-20:	Endenergiebedarf nach Sektoren in 2010 und 2030	40
Abbildung 3-21:	Endenergiebedarf nach Sektoren in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)	41
Abbildung 3-22:	Endenergiebedarf in 2010 und 2030 nach Energieträgern	42
Abbildung 3-23:	Endenergiebedarf in 2010 und 2050 nach Energieträgern (2060 für LS 2011-THG95)	43
Abbildung 3-24:	Änderung des Endenergiebedarf nach Energieträgern zwischen 2010 und 2030	44
Abbildung 3-25:	Änderung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern zwischen 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)	45
Abbildung 3-26:	Entwicklung des Strombedarfs bis 2060	47
Abbildung 3-27:	Stromerzeugung nach Energieträgern in 2010 und 2030	48

Abbildung 3-28:	Stromerzeugung nach Energieträgern in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)	49
Abbildung 3-29:	Änderung der Stromerzeugung nach Energieträgern zwischen 2010 und 2030	50
Abbildung 3-30:	Änderung der Stromerzeugung nach Energieträgern zwischen 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)	51
Abbildung 3-31:	Einsatz von Biomasse (Primärenergiegehalt) im Jahr 2010 und 2050.	52
Abbildung 3-32:	Stromverbrauch für die Erzeugung von Wasserstoff, Methan und flüssigen Energieträgern bis 2060	54
Abbildung 5-1:	Rahmendaten des Referenzszenarios 2013 (PRIMES) für Deutschland im Vergleich (CAGR von Basisjahr bis 2050)	57
Abbildung 5-2:	Preise für Primärenergieträger und CO ₂ -Preise für PRIMES und FhG-Szenarien	58
Abbildung 5-3:	Primär- und Endenergiebedarf für Deutschland bis 2030	59
Abbildung 5-4:	Primärenergiebedarfe für Deutschland von PRIMES und Fraunhofer-Szenarien im Vergleich mit nationalen Studien	61
Abbildung 5-5:	Energiebedingte CO ₂ -Emissionen PRIMES2013 für Deutschland	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Übersicht über die untersuchten Szenarien	14
Tabelle 3-1:	Ziel Datensatz des Energiekonzepts 2010/2011 und Rahmenvorgaben für die Klimaschuttszenarien	15
Tabelle 5-1:	Rahmendaten der Szenarien für Deutschland im Vergleich	57
Tabelle 5-2:	Sektoraler Endenergiebedarf für PRIMES2013 und FhG 2014	60
Tabelle 5-3:	Reduktion der THG- bzw. CO ₂ -Emissionen ggü. 1990 im Vergleich	63
Tabelle 5-4:	Bedeutung verschiedener Vermeidungsstrategien in internationalen und deutschen Zielszenarien	63
Tabelle 8-1:	Rahmendaten: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten (CAGR) bis 2050	70
Tabelle 8-2:	Entwicklung des BIP bis 2060	70
Tabelle 8-3:	Bevölkerungsentwicklung bis 2060	71
Tabelle 8-4:	Entwicklung der Wohnfläche bis 2060	71
Tabelle 8-5:	Entwicklung der Wohnfläche pro Kopf bis 2060	71
Tabelle 8-6:	Entwicklung der Beschäftigung bis 2060	72
Tabelle 8-7:	Preisentwicklung für Rohöl	72
Tabelle 8-8:	Preisentwicklung für Erdgas	72
Tabelle 8-9:	Preisentwicklung für Steinkohle	73
Tabelle 8-10:	Preisentwicklung für Emissionszertifikate	73
Tabelle 8-11:	Zeitlicher Verlauf der gesamten THG-Emissionen	74
Tabelle 8-12:	Sektorale Aufteilung der verbleibenden THG-Emissionen in 2030	75
Tabelle 8-13:	Sektorale Aufteilung der verbleibenden THG-Emissionen in 2050	76
Tabelle 8-14:	Entwicklung des gesamten Primärenergiebedarfs 2010 bis 2060	77
Tabelle 8-15:	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in 2010 und 2030	78
Tabelle 8-16:	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011 – THG95)	79
Tabelle 8-17:	Entwicklung der Energieintensität der Wirtschaftsleistung (Primärenergieverbrauch pro BIP) bis 2060	80
Tabelle 8-18:	Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs bis 2060	81
Tabelle 8-19:	Endenergiebedarf nach Sektoren in 2010 und 2030	82
Tabelle 8-20:	Endenergiebedarf nach Sektoren in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011 – THG95)	82
Tabelle 8-21:	Endenergiebedarf in 2010 und 2030 nach Energieträgern	83
Tabelle 8-22:	Endenergiebedarf in 2010 und 2050 nach Energieträgern (2060 für LS 2011 – THG95)	84
Tabelle 8-23:	Entwicklung des Strombedarfs bis 2060	85
Tabelle 8-24:	Stromerzeugung nach Energieträgern in 2010 und 2030	86
Tabelle 8-25:	Stromerzeugung nach Energieträgern in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011 – THG95)	87

Tabelle 8-27: Stromverbrauch für die Erzeugung von Wasserstoff, Methan und flüssigen Energieträgern bis 2060.

88

1. Einleitung

Die Bundesregierung hat sich in den letzten Jahren im Bereich der Klima- und Energiepolitik weitreichende langfristige Ziele gesetzt und mit dem im September 2010 veröffentlichten Energiekonzept und den weitergehenden energiepolitischen Beschlüssen aus 2011 für die Bereiche Klimaschutz, Energie und Verkehr erste Schritte für die Erarbeitung entsprechender Umsetzungsstrategien für den Zeithorizont bis zur Mitte dieses Jahrhunderts unternommen. Dabei ist einerseits klar geworden, dass ein Erreichen der langfristigen Klimaschutzziele eine grundlegende Umgestaltung insbesondere des Energie- und Verkehrssektors, mit dem Ziel einer weitgehenden Dekarbonisierung erforderlich machen wird. Andererseits haben die bisher vorliegenden Analysen deutlich gemacht, dass es vor allem wegen des langlebigen Kapitalstocks (insbesondere im Gebäude- und Kraftwerksbereich sowie der Grundstoffindustrie) bzw. der notwendigen Innovationszyklen ambitionierter Zwischenziele für die Energie- und Klimapolitik bedarf, wenn die Langfristziele effektiv und auf kosteneffiziente Weise erreicht werden sollen. Darüber hinaus sollen neben den klimapolitischen Zielen auch andere energiepolitische Ziele (z.B. Versorgungssicherheit) oder industrie- und sozialpolitische Ziele (Innovationsimpulse für die Wirtschaft, Begrenzung der Kostenbelastungen, Vollbeschäftigung, Rentenabsicherung bei schrumpfender Bevölkerung) berücksichtigt werden.

Da mit den Ergebnissen des Projektionsberichts 2013 der Bundesregierung deutlich wurde, dass bei Fortschreiben der bis dahin ergriffenen Maßnahmen eine Verfehlung des Zwischenziels für 2020 (eine Reduktion der THG-Emissionen um 40 Prozent gegenüber 1990) drohte, hat die Bundesregierung im Dezember 2014 das Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 mit zusätzlichen Maßnahmen beschlossen. Um darüber hinaus zu gewährleisten, dass auch die langfristigen Ziele für 2050 erreicht werden, soll ein Klimaschutzplan 2050 erarbeitet werden, 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. Die Entwicklung des Klimaschutzplans 2050 wird durch einen umfassenden Beteiligungsprozess begleitet, in den Länder, Kommunen, Bürgerinnen und Bürger eingebunden werden sollen.

Um diesen Prozess fachlich zu unterstützen und in den aktuellen wissenschaftlichen Kontext zu stellen, wurde in der hier vorliegenden Analyse untersucht, welche Szenario-Analysen zum langfristigen Klimaschutz in Deutschland bereits existieren. Die Szenarien der Studien wurden vergleichend ausgewertet mit dem Ziel, robuste Kernaussagen und Leitstrategien für den Klimaschutzplan 2050 zu identifizieren. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einer sektorübergreifenden, gesamtwirtschaftlichen Betrachtung. Die vorliegende Studie wird bis zum Ende des Jahres durch eine Reihe von sektorspezifischen Studien ergänzt, in denen die Minderungsstrategien und Handlungsoptionen in den jeweiligen Sektoren detailliert untersucht werden.

Die Studie ist wie folgt aufgebaut: Abschnitt 2 gibt eine Übersicht über die Studien, die untersucht wurden. In Abschnitt 3 erfolgt die vergleichende Auswertung der Studien. Es werden Rahmenbedingungen und Kernergebnisse analysiert. In Abschnitt 4 werden die Szenarien im europäischen und internationalen Kontext diskutiert. Abschnitte 6 und 7 schließen mit einer Zusammenfassung der robusten Kernaussagen, die aus der vergleichenden Analyse der Studien abgeleitet werden können. Im Datenanhang (Abschnitt 8) sind die wichtigsten Daten in Form von Tabellen zusammengefasst.

2. Welche Studien wurden untersucht?

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Studien wurden folgende Kriterien angelegt:

- Der untersuchte Zeithorizont der Studien erstreckt sich mindestens bis zum Jahr 2050.
- Es erfolgt eine gesamtwirtschaftliche, sektorübergreifende Betrachtung, so dass alle relevanten Emissionsquellen berücksichtigt werden.¹
- In zumindest einem Szenario wird mindestens der untere Rand des von der Bundesregierung formulierten THG-Minderungszieles (80% Reduktion bis 2050 gegenüber 1990) erreicht.
- Um eine ausreichende Aktualität zu gewährleisten, werden ausschließlich Studien ab 2012 berücksichtigt.

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wurden die folgenden Studien ausgewählt:

- Klimaschutzszenario 2050 – 1. Modellierungsrunde (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014)² und 2. Modellierungsrunde (in Bearbeitung)³
- Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 (UBA 2013)⁴
- Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose (Prognos 2014)⁵
- BMU-Leitstudie 2011 (DLR 2012)⁶.

Im Folgenden werden die Studien kurz vorgestellt.

Klimaschutzszenario 2050

Diese Studie wird im Auftrag des BMUB durch das Öko-Institut und Fraunhofer ISI durchgeführt. In mehreren Modellierungsrunden werden verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen klimapolitischen Ambitionsniveaus für den Zeithorizont bis 2050 erstellt und analysiert. Dazu gehören jeweils ein „Aktuelle-Maßnahmen-Szenario“, das sowohl in der ersten als auch in der zweiten Modellierungsrunde den Ist-Stand der bereits umgesetzten Maßnahmen bis Oktober 2012 abbildet, und in dem die langfristigen Klimaschutzziele nicht erreicht werden, sowie verschiedene Zielszenarien mit unterschiedlichen Minderungsniveaus. Die Ergebnisse der ersten Modellierungsrunde wurden im Jahr 2014 veröffentlicht. Der Bericht zu den Ergebnissen der zweiten Modellierungsrunde befindet sich derzeit in der Abstimmung mit dem Auftraggeber und wird voraussichtlich im Herbst 2015 veröffentlicht.

In der zweiten Modellierungsrunde wurde im Vergleich zur ersten Modellierungsrunde eine Reihe von Anpassungen vorgenommen:

¹ Eine Ausnahme bildet hier die Energiereferenzprognose, in der nur energiebedingte Emissionen berücksichtigt und somit wesentliche Emissionsquellen außen vor gelassen werden.

² Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2014) - Klimaschutzszenario 2050 – 1. Modellierungsrunde, im Auftrag des BMUB.

³ Öko-Institut und Fraunhofer ISI (in Bearbeitung) - Klimaschutzszenario 2050 – 2. Modellierungsrunde, im Auftrag des BMUB (Der 2. Endbericht findet sich derzeit in der Abstimmung mit dem Auftraggeber und wird voraussichtlich im Herbst 2015 veröffentlicht.)

⁴ Umweltbundesamt (2013) – Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Umweltbundesamt, Dezember 2013.

⁵ Prognos, EWI, GWS (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Hg. v. Bundesminister für Wirtschaft und Technologie.

⁶ DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, im Auftrag des BMU.

- Verschärfung des THG-Minderungszieles für das Jahr 2050 von 90% auf 95%: In dieser Runde wird analysiert, wie die Obergrenze des im Energiekonzept formulierten Minderungsziels des Energiekonzepts umgesetzt werden kann. Dieser zusätzliche Vermeidungsschritt stellt für die meisten Sektoren eine anspruchsvolle Aufgabe dar.
- 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.

In der vorliegenden Studie werden die folgenden Szenarien untersucht:

- „Klimaschutzszenario 80“ (2. Modellierungsrunde): Ziel dieses Szenarios ist es, die im Energiekonzept der Bundesregierung festgelegten Ziele für Treibhausgasemissionen, erneuerbare Energien und Energieeffizienz zu erreichen, wobei für das Treibhausgasziel der weniger ambitionierte Wert (Emissionsminderung um 80% bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990) in Ansatz gebracht wird.
- „Klimaschutzszenario 95“ (2. Modellierungsrunde): Ziel dieses Szenarios ist es, das ambitioniertere Treibhausgasziel des Energiekonzepts, eine Emissionsminderung um 95% bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990 zu erreichen.
- „Klimaschutzszenario 90“ (1. Modellierungsrunde): In der ersten Modellierungsrunde wurde als ambitioniertes Szenario nur eine Emissionsminderung von 90% bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990 erreicht.
- „Aktuelle-Maßnahmen-Szenario“ (2. Modellierungsrunde): In diesem Szenario sind ausschließlich die bereits umgesetzten Maßnahmen bis Oktober 2012 abbildet. Die langfristigen Klimaschutzziele werden deutlich verfehlt.

Es handelt sich bei den Klimaschutzszenarien nicht um eine maßnahmenorientierte, sondern um eine zielorientierte Modellierung. Es wird also untersucht, in welchen Sektoren welche Minderungsbeiträge erbracht werden müssten und welche Maßnahmen hierzu erforderlich wären.

Die Erstellung der Projektionen in den Szenarien erfolgt auf der Basis von Annahmen für Bevölkerungsentwicklung, Wirtschafts- und Wirtschaftsstrukturentwicklung, Energiepreis-, und Emissionszertifikateentwicklung, die für alle Szenarien gleich sind⁷. Für die Ermittlung der Energieeinsätze sowie der Treibhausgasemissionen in den verschiedenen Sektoren werden unterschiedliche methodische Ansätze verfolgt bzw. Modellinstrumentarien genutzt.

Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose

Diese Studie wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)⁸ in Auftrag gegeben und von dem Konsortium Prognos AG / Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln (EWI) / Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS) durchgeführt. Primäres Ziel der Studie war, eine Prognose für die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 durchzuführen („Referenzszenario“). In einem „Trendszenario“ wird die Entwicklung bis 2050 fortgeschrieben. Die Studienautoren sind der Ansicht, dass die notwendigen Maßnahmen zum Erreichen der

⁷ Ausnahme bilden hier die Preise für Emissionszertifikate, die sich zwischen den Szenarien unterscheiden.

⁸ Die Auftragsvergabe erfolgte vor der Ressortumverteilung und der Umbenennung in Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

langfristigen Klimaschutzziele der Bundesregierung nicht ergriffen worden sind und so ein Erreichen dieser Ziele unwahrscheinlich ist. Die Bundesziele werden somit in Referenz- und Trendszenario verfehlt.

Allerdings wird ein zusätzliches „Zielszenario“ entwickelt, in dem die Ziele der Bundesregierung zumindest teilweise erfüllt werden. Da in der Studie nur energiebedingte Emissionen berücksichtigt werden und Emissionsquellen außerhalb des Energiesektors nicht in das Emissionsminderungsziel eingebunden werden, werden insbesondere die Emissionsminderungsziele der Bundesregierung in diesem Szenario deutlich verfehlt. Trotzdem betonen die Autoren der Studie, dass sie die Umsetzung aller für das Erreichen der im „Zielszenario“ beschriebenen Entwicklungen erforderlichen Maßnahmen für sehr unwahrscheinlich halten. Insgesamt repräsentiert die Energierferenzprognose eine eher konservative Perspektive auf die möglichen zukünftigen Entwicklungen im Bereich des Klimaschutzes. Das „Zielszenario“ wird dennoch in der vorliegenden Studie diskutiert, da besonders aus dem Vergleich mit den ambitionierteren Zielszenarien wertvolle Rückschlüsse gezogen werden können (z.B. bezüglich der Bedeutung nicht energiebedingter Emissionen).

In der vorliegenden Studie werden sowohl das Referenz- und Trendszenario als auch das Zielszenario untersucht.

BMU-Leitstudie 2011

Auch die Leitstudie wurde vom BMU in Auftrag gegeben. Sie ist das Ergebnis eines dreijährigen Forschungsprojekts, das durch die Institute DLR, Fraunhofer IWES und IFNE durchgeführt wurde. Ziel der Studie war, verschiedene konsistente Entwicklungspfade zu entwerfen, mit denen die langfristigen, energiepolitischen Ziele der Bundesregierung erfüllt werden können. Dementsprechend führen alle Szenarien zu einer Emissionsminderung von mindestens 80% in 2050. Die Studie präsentiert drei Hauptszenarien, die sich im Wesentlichen bezüglich der Annahmen zur strombasierten Erzeugung von Wasserstoff und Methan unterscheiden:

- Szenario 2011 A: Bis zum Jahr 2050 steigt der Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge an der gesamten Fahrleistung im Verkehrssektor auf 50%. Der übrige Verkehr wird (zu einem kleineren Teil) mit Biokraftstoffen und (zu einem größeren Teil) mittels Wasserstoff gedeckt.
- Szenario 2011 B: Ergänzend zu Szenario A wird ein wesentlicher Teil des durch Elektrolyse erzeugten Wasserstoffs in einem weiteren Umwandlungsprozess in Methan umgewandelt. Methan kann in unbegrenzten Mischungsverhältnissen dem existierenden Erdgasnetz beigemischt werden und wird unter anderem in Verkehrssektor in Fahrzeugen mit Gasmotoren eingesetzt.
- Szenario 2011 C: Hier wird vollständig auf den Einsatz von Wasserstoff und Methan im Verkehrssektor verzichtet. Die Fahrleistung wird vollständig durch vollelektrische Fahrzeuge und Plug-In-Hybride abgedeckt.

Zusätzlich zu diesen Hauptszenarien wurden zwei weitere Szenarien entwickelt:

- Szenario 2011 A': Hier wird – abweichend von Szenario 2011 A – das Ziel einer Reduktion des Stromverbrauchs um 25% bis 2050 nicht auf den gesamten Stromverbrauch, sondern nur auf die Gruppe der „klassischen“ heutigen Stromverbraucher bezogen.
- Szenario 2011 THG95: Hier wird gezeigt, wie die Treibhausgasemissionen nicht nur um 80%, sondern um 95% reduziert werden können. Nach Ansicht der Studienautoren ist eine Umsetzung dieser nahezu vollständigen Dekarbonisierung bis zum Jahr 2050 nicht

realistisch. Daher nehmen die Autoren an, dass dieses Ziel im Szenario THG95 erst im Jahr 2060 erreicht wird.

Auf der aggregierten Ebene, auf der die Analysen in der vorliegenden Studie stattfinden, sind die Unterschiede zwischen den Szenarien A, B, C und A' sehr gering. Daher beschränkt sich die vorliegende Studie auf eine Untersuchung der Szenarien A und THG95. Diese beiden Szenarien unterscheiden sich auf Grund der unterschiedlichen Emissionsminderungsziele erheblich voneinander.

Die in der Studie entwickelten Szenarien sind zwar durch die Emissionsminderungsziele des Energiekonzeptes getrieben, in der Diskussion liegt der Schwerpunkt allerdings nicht auf der Entwicklung der Treibhausgasemissionen, sondern (wie auch der Titel der Studie impliziert) auf dem Ausbau erneuerbarer Energien. Die Studie diskutiert dabei nicht nur technische Maßnahmen, sondern schlägt auch politische Instrumente vor, die zur Umsetzung der Maßnahmen eingesetzt werden können. Diese sind nicht Inhalt des hier vorliegenden Szenarienvergleichs, werden jedoch in den Sektorstudien aufgegriffen.

Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050

Diese Studie, die vom Umweltbundesamt (UBA) durchgeführt und veröffentlicht wurde, weicht in ihrer Methodik von den anderen betrachteten Analysen ab: Ziel ist es, die technische Machbarkeit einer Treibhausgasemissionsminderung um 95% bis 2050 darzustellen. Die Studie berücksichtigt sowohl energiebedingte als auch nicht energiebedingte Emissionen, und verfolgt den Ansatz, bis zum Jahr 2050 den Energiesektor (einschließlich des Verkehrssektors) vollständig treibhausgasneutral zu gestalten. Der Einsatz strombasierter Endenergieträger (Wasserstoff, Methan und flüssige Kraftstoffe) spielt dabei eine wesentliche Rolle.

In der Studie wird ein Szenario entwickelt, welches das Energie- und Wirtschaftssystem im Zieljahr 2050 beschreibt. Transformationspfade und Maßnahmen, die erforderlich wären, um dieses Ziel zu erreichen, werden nicht diskutiert. Auch eine wirtschaftliche Betrachtung (im Sinne einer Kostenschätzung) wird nicht durchgeführt. Daher ist an vielen Stellen ein quantitativer Vergleich mit den anderen Szenarien nicht möglich, da die erforderlichen Daten nicht ausgewiesen werden. Ein Vergleich wird somit nur an ausgewählten Stellen und wo möglich vorgenommen.

Tabelle 2-1 gibt eine Übersicht über die insgesamt neun Szenarien, die in dieser Studie untersucht werden. Darin enthalten sind sieben Zielszenarien, welche den Anspruch erheben, die energiepolitischen Ziele zu erfüllen. Zum Vergleich werden den Zielszenarien zwei Referenzszenarien („ERP-Ref“ und „KSZ-AMS“) gegenübergestellt, in denen die energiepolitischen Ziele deutlich verfehlt werden. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt im Folgenden bei den Zielszenarien.

Tabelle 2-1: Übersicht über die untersuchten Szenarien

Szenario	THG-Minderungsziel in 2050	Abkürzung
Referenzszenarien: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose, Referenzszenario Trendszenario Klimaschutzszenarien 2. Runde, Aktuelle Maßnahmen Szenario	- -	ERP-Ref KSZ-AMS
Zielszenarien: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose, Zielszenario Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 80 Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 95 Klimaschutzszenarien 1. Runde, Klimaschutzszenario 90 Leitstudie 2011, Szenario A Leitstudie 2011, Szenario THG95 Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050	80% ⁽¹⁾ 80% 95% 90% 80% 95% ⁽²⁾ 95%	ERP-Ziel KSZ-KS80 KSZ-KS95 KSZ-KS90 LS 2011-A LS 2011-THG95 THGND
1) nur energiebedingte Emissionen 2) Ziel wird erst in 2060 erreicht		

Quelle: Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013)

3. Auswertung der Szenarien

In diesem Abschnitt werden die Annahmen und die zentralen Ergebnisse der untersuchten Deutschland-Studien diskutiert.

Tabelle 3-1 gibt eine Übersicht über die langfristigen Energie- und Klimaschutzziele der Bundesregierung, die im Rahmen des Energiekonzepts 2010/2011⁹ definiert wurden. Die Ziele beziehen sich nicht ausschließlich auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen, sondern geben auch die Entwicklung bezüglich des Ausbaus erneuerbarer Energien und der Minderung des Energiebedarfs vor. Für alle Parameter sind kurzfristige (2020) und langfristige (2050) Zielmarken definiert. Für die Treibhausgasreduzierung und den Ausbau erneuerbare Energien sind Zwischenziele auch für die Jahre 2030 und 2040 vorgesehen. Für die Treibhausgasreduzierung bis zum Jahr 2050 ist anstelle eines festen Wertes eine Spannbreite von 80-95% (gegenüber 1990) definiert.

Die untersuchten Szenarien erfüllen diese Ziele in unterschiedlichem Maße. Drei Szenarien erreichen explizit den oberen Rand des Zielbereichs zur Minderung der Treibhausgasemissionen (95% Minderung bis 2050). Diese sind die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland 2050“ („THGND“), das Szenario „KS95“ der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ sowie das Szenario „THG95“ der „Leitstudie 2011“. Im zuletzt genannten Szenario werden die 95% THG-Reduktion allerdings erst im Jahr 2060 erreicht. Das politische Ziel einer solchen Reduktion bis 2050 wird in diesem Szenario somit verfehlt. Im Szenario „KS90“ wird eine Minderung von 90% erreicht. In den übrigen Szenarien werden bis zum Jahr 2050 nur 80% THG-Minderung erreicht, wobei sich die Minderung im Zielszenario der Energiereferenzprognose nur auf die energiebedingten Emissionen bezieht.

⁹ BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2011: Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011. Berlin, Oktober 2011.

Tabelle 3-1: Zieldatensatz des Energiekonzepts 2010/2011 und Rahmenvorgaben für die Klimaschutzszenarien¹⁰

	Senkung Treibhausgasemissionen	Erneuerbare Anteile		Senkung Energieverbrauch				Steigerung Energieproduktivität
		Bruttoendenergie	Bruttostromverbrauch	Primärenergie	Gebäude-Wärme ^a	Endenergie Verkehr	Brutto-stromverbrauch	
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

^a Minderung Endenergiebedarf im Jahr 2020, Minderung nichterneuerbarer Primärenergiebedarf im Jahr 2050

Quelle: BMU (2011); EEG 2014;

3.1. Rahmendaten und Annahmen

3.1.1. Gesamtwirtschaftliche und demographische Rahmendaten

Abbildung 3-1 zeigt, soweit verfügbar, die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten (Compound Annual Growth Rate, CAGR) für einige zentrale gesamtwirtschaftliche und demographische Rahmendaten. Ausgewertet wurde der gesamte Zeitraum zwischen dem Basisjahr der Studie und dem Zieljahr 2050. In einigen Studien werden nicht zu allen Parametern Angaben gemacht. Soweit möglich, wurden fehlende Parameter aus anderen Daten abgeleitet.

Für die hier betrachteten Parameter (Bruttoinlandsprodukt, Bevölkerungs- und Beschäftigungsentwicklung sowie Wohnfläche) unterscheiden sich die Studien in Bezug auf die Annahmen voneinander. Innerhalb einer Studie wird jedoch für alle untersuchten Szenarien jeweils immer nur ein Datensatz verwendet.

Bezüglich des Bruttoinlandsprodukts (BIP) zeigt sich, dass alle Studien von einem stetig ansteigenden Wirtschaftswachstum ausgehen. Die durchschnittlichen Wachstumsraten klaffen allerdings deutlich auseinander: Die niedrigste Wachstumsrate mit durchschnittlich 0,7%/a wird im Szenario „THGND“ angenommen. An der Spitze mit durchschnittlich 1,0%/a liegt die Energiereferenzprognose („ERP“). Die untersuchten Studien gehen somit davon aus, dass wirtschaftliches Wachstum und Minderung der Emissionen miteinander vereinbar sind. Die Auswirkungen einer langsamer wachsenden oder sich stabilisierenden Wirtschaftsleistung werden in keinem der Szenarien untersucht.

Bei der Bevölkerungsentwicklung zeigt sich durch alle Szenarien hindurch ein sehr homogenes Bild. Alle Studien gehen von einem Bevölkerungsrückgang von ca. 0,2%/a aus. Damit sinkt die Bevölkerung bis zum Jahr 2050 um ca. 10% auf 72 bis 74 Millionen Einwohner.

Die Anzahl der Beschäftigten geht ebenfalls in allen Studien zurück. Vor dem Hintergrund der in Deutschland stattfindenden demographischen Entwicklung und der damit einhergehenden Alterung der Gesellschaft stellt sich die Frage inwiefern der Rückgang der Gesamtbevölkerung

¹⁰ Die Energieproduktivität ist bezogen auf den Endenergieverbrauch (BMU 2011).

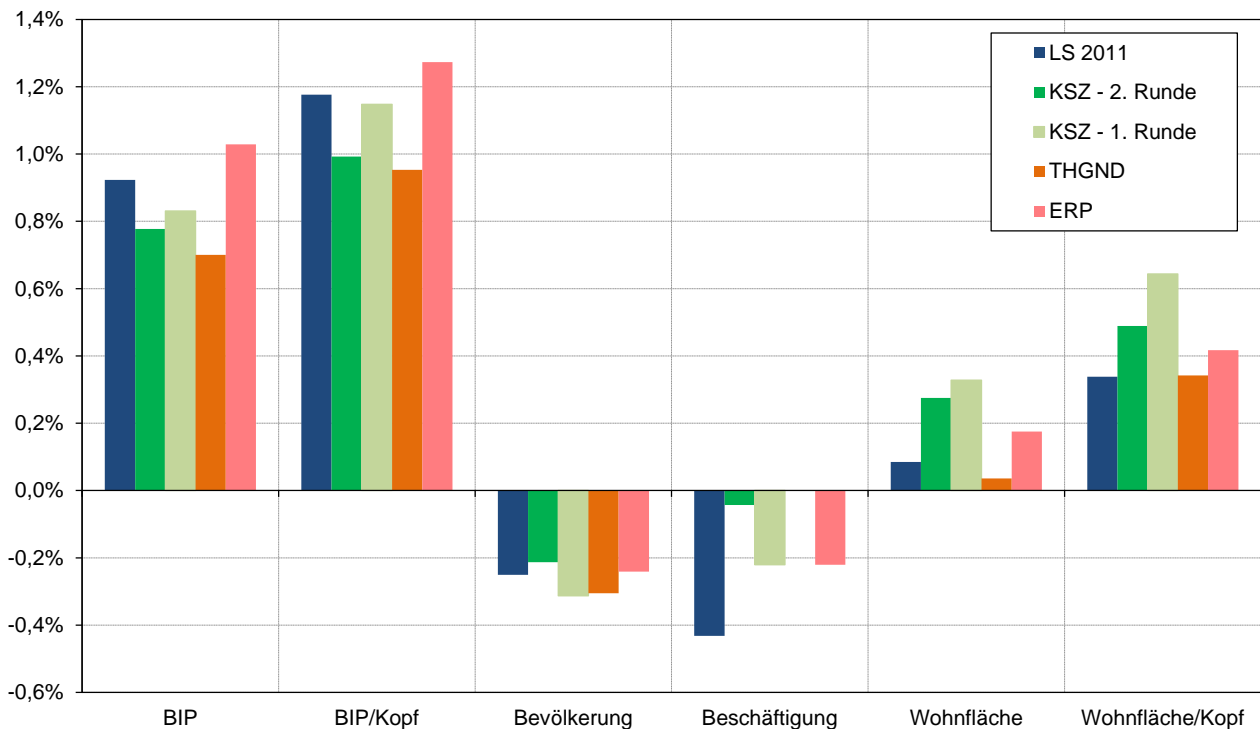
einen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Erwerbstätigen und damit auch die Beschäftigungsentwicklung hat. Die Studie „Klimaschutzszenario 2050“ beruft sich auf den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (2011), der eine konstante Beschäftigung mit einem Anstieg des Alters der Erwerbstätigen begründet.

In der „Leitstudie 2011“ sowie der „Energierferenzprognose“ schrumpft die Anzahl der Beschäftigten schneller, was den Erwartungen bezüglich der Überalterung der schrumpfenden Bevölkerung entspricht und bei gleichzeitig steigender Wirtschaftsleistung auf die Annahme einer höheren Arbeitsproduktivität schließen lässt.

Bezüglich der Wohnfläche gehen alle Studien von einer Fortschreibung des ansteigenden Trends aus. In den Szenarien der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ und dem Szenario „ERP-Ziel“ wird dabei von deutlich höheren Wachstumsraten ausgegangen als in den übrigen Szenarien. Die pro-Kopf-Wohnfläche nimmt zum Einem mit der Alterung der Bevölkerung zu, da ältere Leute in der Regel in ihren früheren Familienwohnungen/-häusern bleiben und dann eine höhere pro-Kopf-Wohnfläche haben. Zum anderen gibt es mehr Single-Haushalte, die ebenso die pro-Kopf-Wohnfläche steigern. Dem entgegen wirkt die allgemein sinkende Bevölkerung, so dass die Gesamtwohnfläche nicht in gleichem Maße wie die pro-Kopf-Wohnfläche steigt.

Wie in Abbildung 3-1 zu sehen ist, befinden sich die angenommenen Wachstumsraten in einer vergleichbaren Größenordnung. Hierbei liegen die Annahmen der Klimaschutzszenarien über dem Durchschnitt der übrigen Szenarien.

Wichtig für den Vergleich der gesamtwirtschaftlichen Rahmendaten und ihrem Einfluss auf Energieverbrauch und Emissionen ist die Verdeutlichung der Zusammenhänge untereinander und mit anderen Parametern. Von zentraler Bedeutung ist zunächst die Bevölkerungsentwicklung, die mit den Annahmen über die Altersstruktur der Bevölkerung und über das Rentenalter, die Verfügbarkeit von Erwerbstätigen für den Arbeitsmarkt bestimmt und damit mit den Beschäftigtenzahlen gekoppelt sind. Diese wiederum zusammen mit den Annahmen zur Arbeitsproduktivität beeinflussen maßgeblich das Bruttoinlandsprodukt, welches wiederum auf die Nachfrage (Kaufkraft) der Konsumenten im In- und Ausland reagiert. Ein steigendes Bruttoinlandsprodukt kann je nach Effizienz und der Art der eingesetzten Ressourcen (Brennstoffe) in der Produktion mit steigenden oder sinkenden THG-Emissionen verwirklicht werden. In Dekarbonisierungsszenarien wird regelmäßig eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und THG-Emissionen umgesetzt.

Abbildung 3-1: Rahmendaten: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten (CAGR) bis 2050

Die Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-1 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013), Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

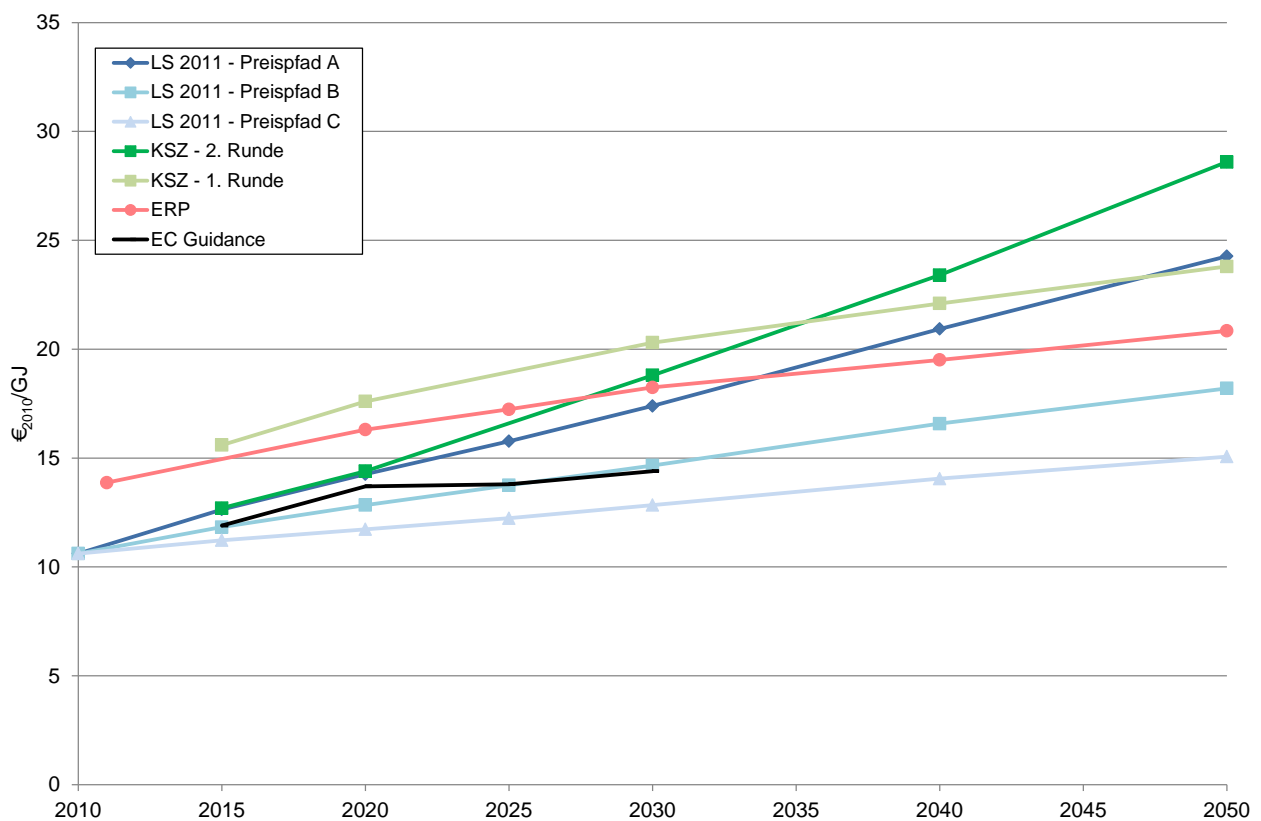
3.1.2. Preisentwicklung für Primärenergieträger und Emissionszertifikate

Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 zeigen die in den Szenarien unterstellten Preisentwicklungen für die Primärenergieträger Erdöl, Erdgas und Steinkohle. Für die Jahre 2015-2035 sind zum Vergleich die Empfehlungen der Europäischen Kommission (2015) für die Berichterstattung zur Projektion von Treibhausgasemissionen angegeben. Innerhalb einer Studie wird für alle untersuchten Szenarien jeweils dieselbe Preisentwicklung angenommen. Es wird also unterstellt, dass das Ambitionsniveau nationaler Klimapolitik keinen Einfluss auf die Preisentwicklung auf den internationalen Brennstoffmärkten hat. In der „Leitstudie 2011“ werden drei verschiedene Preispfade (A, B, C) ausgewiesen, die für Sensitivitäts- und Kostenrechnungen in allen Szenarien der Studie verwendet werden. Im Szenario „THGND“ werden, da keine fossilen Energieträger eingesetzt werden, keine Angaben zu Primärenergiepreisen oder CO₂-Preisen gemacht.

Alle Studien gehen von einem Anstieg der realen Preise für alle drei betrachteten Energieträger aus, basierend auf einer Auswertung der zum Zeitpunkt der Studiererstellung verfügbaren einschlägigen Literatur. In keinem der Szenarien werden die Auswirkungen stabiler oder sinkender Preise untersucht. Das ist durchaus kritisch zu sehen, da im Kontext einer ambitionierten internationalen Klimapolitik derartige Entwicklungen durchaus vorstellbar sind. Die unterstellten Wachstumsraten unterscheiden sich jedoch deutlich und spiegeln die Unsicherheit bezüglich der langfristigen Entwicklung der Brennstoffmärkte wieder. Die optimistischsten Annahmen bezüglich der Preisentwicklung bei allen drei Energieträgern werden in der „Energierferenzprognose“ gemacht. In diesem Szenario liegen die Teuerungsraten für Öl, Erdgas und Steinkohle bei unter 1%/a. Die drei Preispfade der „Leitstudie 2011“ decken einen weiten Bereich ab. Das mittlere

Szenario „B“ liegt jedoch für alle drei Energieträger deutlich über den Annahmen aus Szenario „ERP-Ziel“. Für die zweite Modellierungsrunde der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ wurden die Preisannahmen gegenüber der ersten Modellierungsrunde überarbeitet, um die Projektionen zur Entwicklung des Rohölpreises im „Annual Energy Outlook 2013“ der EIA zu berücksichtigen. Auf Grund der im Jahr 2012 stärker als erwartet gewachsenen Ölproduktion in den USA und fallenden Ölpreisen wurde das Ausgangsniveau im „Annual Energy Outlook 2013“ nach unten korrigiert. Gleichzeitig steigt der Ölpreis zu Beginn des Projektionszeitraums langsamer, zieht dann aber an und übertrifft die Projektion des Vorjahres im Jahr 2050. Die Preisentwicklung für Kohle und Gas wurde entsprechend angepasst, so dass die Verhältnisse der Preise unterschiedlicher Energieträger zueinander unverändert blieben.

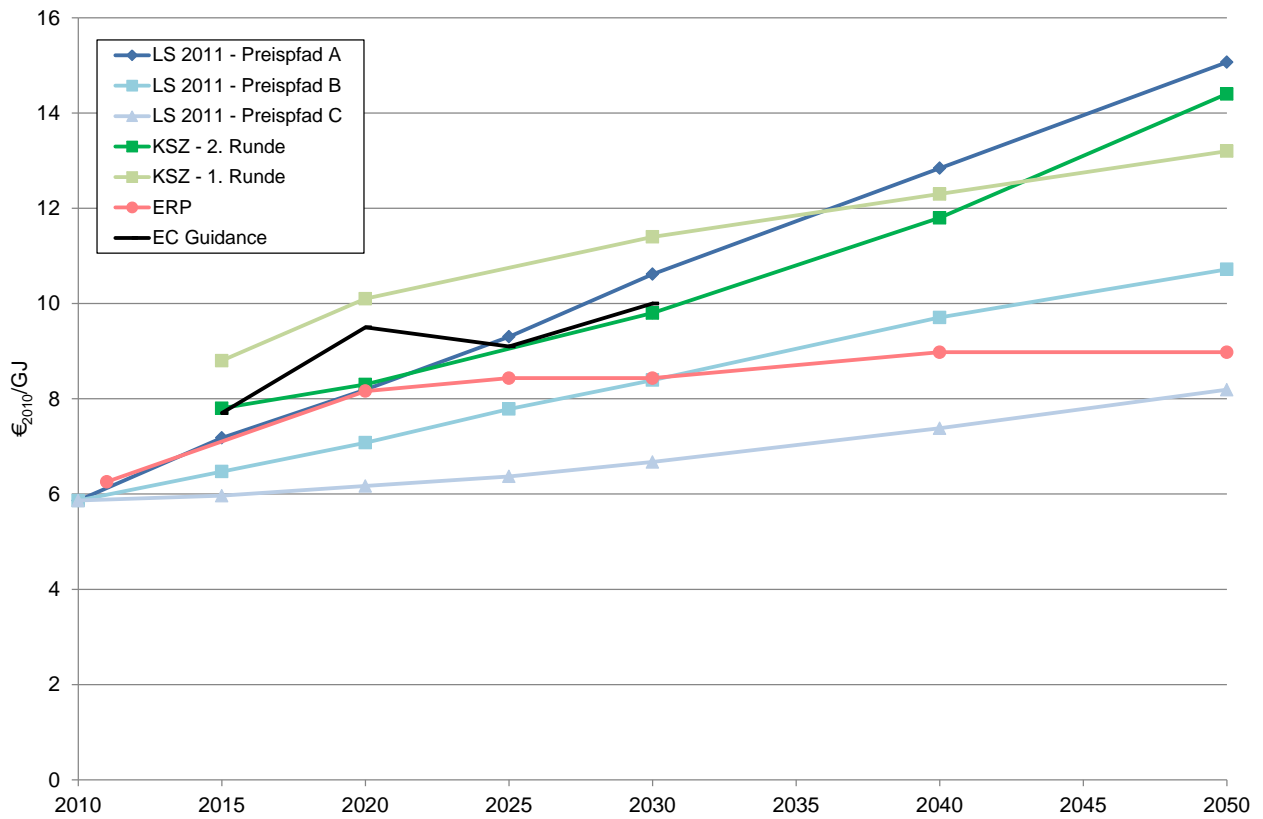
Abbildung 3-2: Preisentwicklung für Rohöl



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-7 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); EK (2015); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

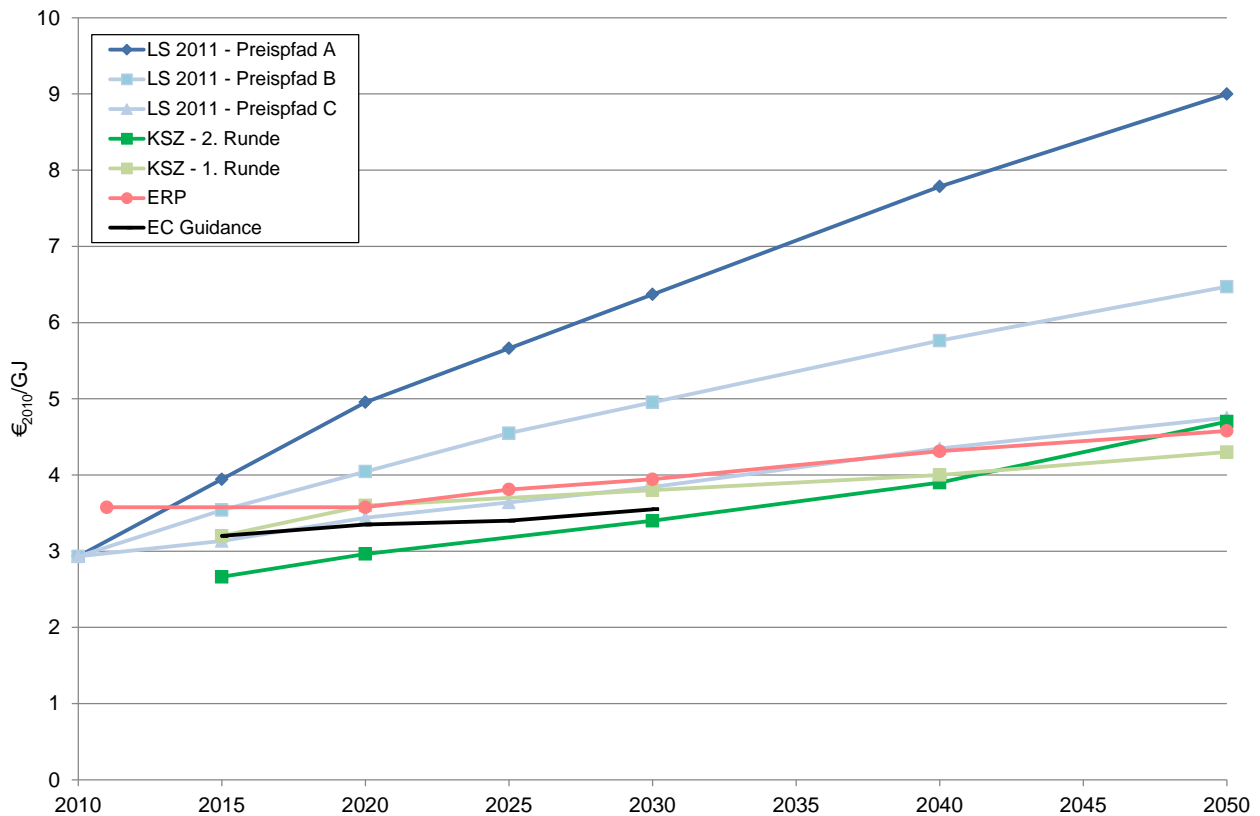
Abbildung 3-3: Preisentwicklung für Erdgas



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-8 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); EK (2015); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

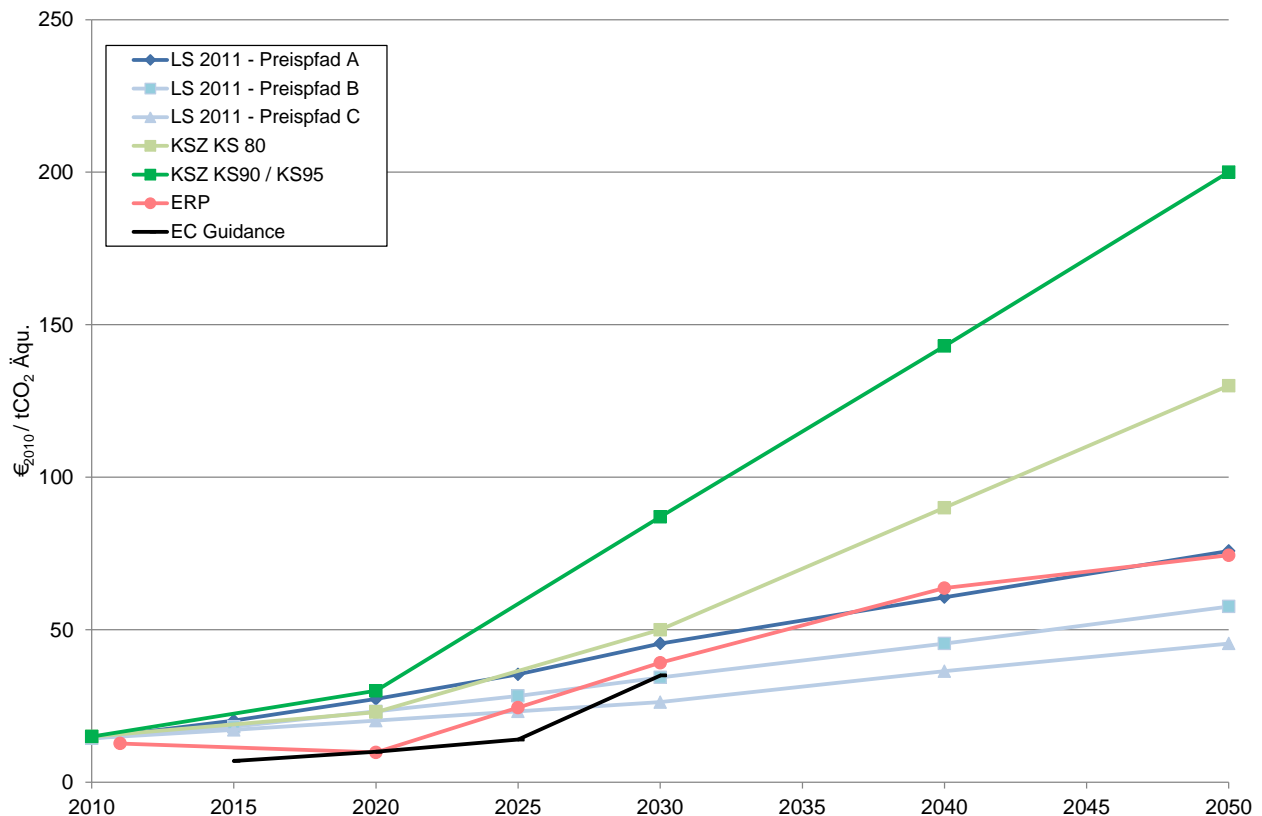
Abbildung 3-4: Preisentwicklung für Steinkohle



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-9 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); EK (2015); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Abbildung 3-5 zeigt die Entwicklung der Preise für Emissionszertifikate im Europäischen Emissionshandelssystem. Alle Szenarien gehen von einem deutlichen Anstieg der CO₂-Zertifikatepreise aus, was die Annahme widerspiegelt, dass auch im europäischen Kontext langfristig ambitionierter Klimaschutz betrieben wird. Das Ausmaß des Preisanstiegs variiert jedoch erheblich. Den unteren Rand bilden hier die drei Preisfade der „Leitstudie 2011“. Am oberen Rand liegen die beiden Szenarien „KSZ-KS90“ und „KSZ-KS95“ der Studie „Klimaschutzszenario 2050“. Werden alle Szenarien betrachtet, ist die Spannbreite der absoluten Zertifikatepreise im Jahr 2050 enorm: sie reicht von 46 EUR₂₀₁₀/tCO₂ im Preisfad „C“ der „Leitstudie 2011“ bis hin zu 200 EUR₂₀₁₀/tCO₂ in den Szenarien „KSZ-KS90“ und „KSZ-KS95“. Dies demonstriert eindrücklich die große Unsicherheit bezüglich der langfristigen Entwicklung der Zertifikatepreise bzw. die unterschiedliche Bedeutung, welche in den Szenarien der Emissionsbepricing als politisches Instrument beigemessen wird.

Abbildung 3-5: Preisentwicklung für Emissionszertifikate

Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-10 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); EK (2015) Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

3.2. Entwicklung der Treibhausgasminderung

3.2.1. Betrachtete Treibhausgase und Sektoren

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Treibhausgase und Emissionsquellen, die von den hier untersuchten Studien in unterschiedlichem Maße berücksichtigt werden.

Die Studien „Klimaschutzszenario 2050“ und „Treibhausgasneutrales Deutschland“ beziehen alle relevanten Emissionsquellen ein, die im Nationalen Inventarbericht (NIR)¹¹ zum Treibhausgasinventar beschrieben werden. Es werden also nicht nur die energiebedingten THG betrachtet, sondern auch die nicht energiebedingten THG-Emissionen von Industrieprozessen und -produkten, Abfallwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft sowie Emissionen, die durch Landnutzungsänderungen (LULUCF) verursacht werden. Über die NIR-Systematik hinausgehend wird in beiden Studien auch der national verursachte Anteil am internationalen Flug- und Seeverkehr berücksichtigt.

In der „Leitstudie 2011“ liegt ein deutlicher Schwerpunkt der Analyse auf den energiebedingten THG-Emissionen. Explizit diskutiert (und auf Basis von Modellrechnungen bestimmt) werden nur die energiebedingten CO₂-, Methan- und N₂O-Emissionen. Die Entwicklung nicht energiebedingter

¹¹ UBA (2013a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2013. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2011. Dessau-Roßlau.

Emissionen (inklusive LULUCF) wird nicht explizit ermittelt, allerdings wird hierfür auf Emissionstrajektorien aus der Studie „Modell Deutschland“ von Prognos und Öko-Institut (2009)¹² zurückgegriffen. Die Szenarien für den Energiesektor werden so gestaltet, dass Minderungsziele (80% bzw. 95% Minderung bis 2050) für die Summe aus energiebedingten und nicht energiebedingten Treibhausgasemissionen erfüllt werden. Emissionen im internationalen Luft- und Seeverkehr werden nicht berücksichtigt.

In der Studie „Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose“ wird ebenfalls nur die Entwicklung der THG-Emissionen des Energiesektors untersucht. Anders als in der „Leitstudie 2011“ werden hier allerdings die nicht energiebedingten Emissionen nicht berücksichtigt. Die Zielvorgabe einer THG-Minderung um 80%, die im Zielszenario der Studie erfüllt wird, wird ausschließlich auf die energiebedingten Emissionen (CO₂, Methan und N₂O) bezogen. Dahinter steht die implizite Annahme, dass auch in den nicht energiebedingten Sektoren eine Minderung der Emissionen um 80% erfolgt, so dass das Minderungsziel für das Gesamtsystem erreicht werden kann. Dies führt dazu, dass die erzielten Minderungen im Energiesektor in der Energierferenzprognose deutlich weniger stark ausfallen als in den anderen Studien und das politisch gesetzte Mindestminderungsziel in diesem Szenario nicht erreicht wird.

Im Folgenden werden die Emissionsminderungen in den verschiedenen Studien und Szenarien verglichen. Es wird dabei nicht zwischen verschiedenen Treibhausgasen unterschieden; die Angaben erfolgen aggregiert in CO₂-Äquivalenten.

3.2.2. Entwicklung der gesamten Treibhausgasminderung

Abbildung 3-6 zeigt den zeitlichen Verlauf der gesamten Treibhausgasemissionen in den verschiedenen Szenarien sowie die Minderungsziele¹³ für die Jahre 2020-2050 sowie die reale Entwicklung der Emissionen für die Jahre 2010-2014. Dargestellt ist die Summe energiebedingter und nicht energiebedingter Emissionen, inklusive Emissionen durch Landnutzungsänderungen (LULUCF) und Emissionen des deutschen Anteils am internationalen Luft- und Seeverkehr. In der Energierferenzprognose werden nur energiebedingte Emissionen berücksichtigt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden für die Ergebnisse dieser Studie in den Szenarien „ERP-Ref“ und „ERP-Ziel“ eine Entwicklung der nicht energiebedingten Emissionen (inklusive LULUCF) und der Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr gemäß der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ angenommen.¹⁴ Für die Szenarien der „Leitstudie 2011“ wurde angenommen, dass die Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr sich gemäß dem Szenario „KSZ-KS80“ der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ entwickeln.

In den beiden Referenzszenarien (KSZ-AMS und ERP-Ref) sinken die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 54% bzw. 56%. (relativ zum Jahr 1990) Die Emissionsminderungsziele werden somit in beiden Szenarien deutlich verfehlt. Auch die Zwischenziele für die Jahre 2020 bis 2040 können in diesen beiden Szenarien nicht eingehalten werden.

¹² Prognos, Öko-Institut (2009): Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Hg. v. WWF. Basel, Berlin.

¹³ Die Minderungsziele beziehen sich auf die Gesamtemissionen im Jahr 1990 (energiebedingte und nicht energiebedingte Emissionen inklusive LULUCF und internationalem Luft- und Seeverkehr) in Höhe von 1234,6 Mio tCO₂-Äqu.

¹⁴ Für das Szenario „ERP-Ref“ wurden die nicht energiebedingten Emissionen des Szenarios „KSZ-AMS“ unterstellt, für das Szenario „ERP-Ziel“ die des Szenarios „KSZ-KS80“. Damit wird angenommen, dass im Szenario „ERP-Ziel“, obwohl nur der Energiesektor explizit betrachtet wird, auch außerhalb des Energiesektors Maßnahmen zur Emissionsminderung durchgeführt werden. Ohne diese Annahme würde das Gesamt-Minderungsziel in diesem Szenario noch deutlicher verfehlt werden.

In den Szenarien KSZ–KS80 und LS 2011 – A wird bis zum Jahr 2050 eine THG-Minderung von 80% bzw. 79% erreicht. Die Zwischenziele für die Jahre 2020 bis 2040 werden im Szenario KSZ–KS80 allerdings verfehlt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der hier gezeigten Darstellung die Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr in das Minderungsziel einbezogen werden. Ohne diese Emissionen würden im Szenario KSZ-KS80 die Zwischenziele erreicht werden (siehe Abbildung 3-7 für die sektoralen Emissionen im Jahr 2030).

Das Zielszenario der Energierferenzprognose erreicht eine Minderung von 80%, allerdings nur im Bereich der energiebedingten Treibhausgasemissionen. Nicht energiebedingte Emissionen werden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Werden für die Entwicklung der nicht energiebedingten Emissionen die Daten aus Szenario KS 80 der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ unterstellt (wie in Abbildung 3-6 dargestellt), ergibt sich in Summe für das Zielszenario der Energierferenzprognose im Jahr 2050 nur eine Minderung von 73%. Das Minderungsziel wird also um sieben Prozentpunkte (entspricht ca. 81 Mio. tCO₂äq) verfehlt. Auch die Zwischenziele für die Jahre 2020 bis 2040 werden in diesem Szenario nicht erreicht.

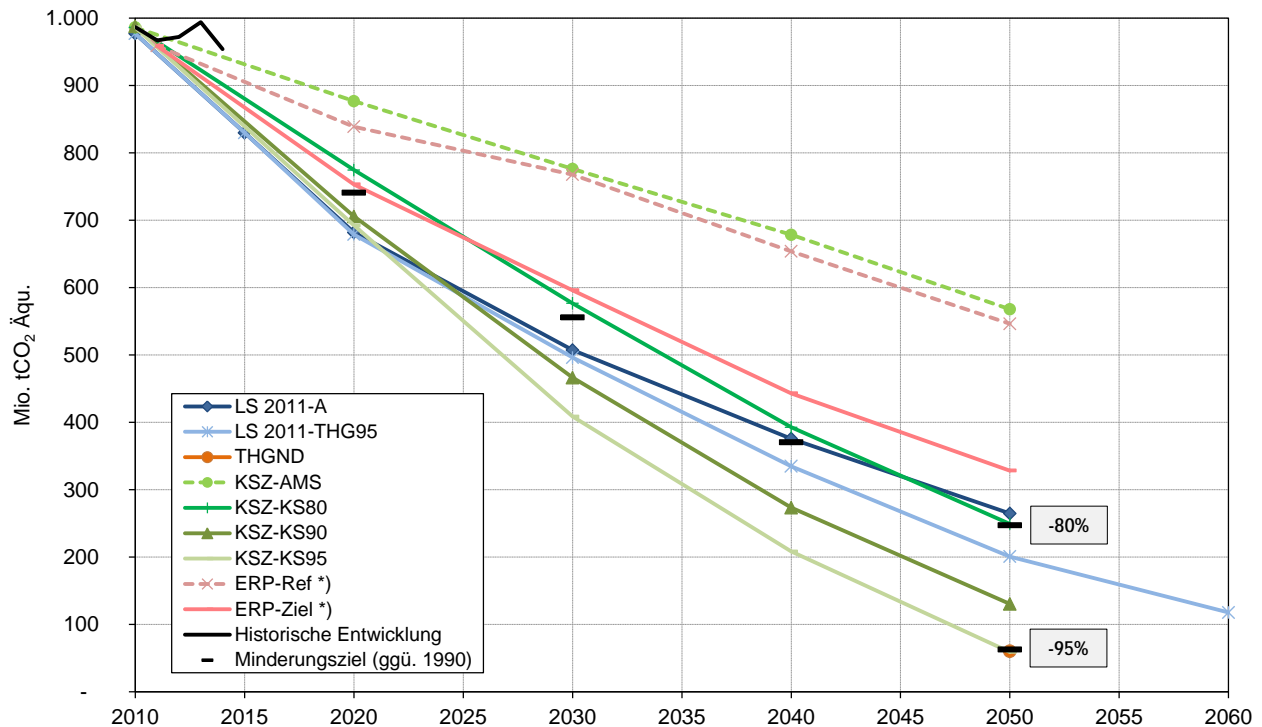
Im Szenario THG95 der „Leitstudie 2011“ wird eine Emissionsminderung von 90%¹⁵ erreicht, allerdings halten die Autoren der Studie eine derart tiefgreifende Transformation erst bis zum Jahr 2060 für durchführbar. Bis zum Jahr 2050 wird in diesem Szenario eine Emissionsminderung von 84% erreicht. Nur im Szenario KS95 des „Klimaschutzszenario 2050“ und in der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ kann das 95% Minderungsziel bereits im Jahr 2050 erreicht werden.

Die Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Emissionsminderung lässt einen weiteren Schluss zu. Der Gradient der Minderungskurve, also die Geschwindigkeit, mit der Emissionen reduziert werden, nimmt über die Zeit hinweg ab. Je niedriger das Emissionsniveau ist, desto anspruchsvoller sind die verbleibenden Minderungsoptionen in der Umsetzung. Dies spiegelt sich aber nicht im zeitlichen Verlauf der Zwischenziele wider, die einen eher linearen Verlauf der Emissionsminderungen unterstellen. Dies resultiert darin, dass die Zwischenziele in den Jahren 2020-2040 in allen Zielszenarien (mit Ausnahme des Zielszenarios der Energierferenzprognose und dem Szenario KSZ-KS80) deutlich übererfüllt werden. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei den Szenarien, die eine Emissionsminderung von mehr als 80% anstreben.

Anders formuliert: Die Zwischenziele des Energiekonzepts für die Jahre 2020-2040 sind nicht ambitioniert genug gesetzt – besonders dann, wenn als Ziel für 2050 eine Minderung angestrebt wird, die über das Minimalziel von 80% hinausgeht.

Diese schnellen THG-Minderungen zwischen 2010 und 2020 stehen in deutlichem Widerspruch zur heutigen Situation 2015, wo darüber diskutiert wird, ob und mit welchen zusätzlichen politischen Maßnahmen das Ziel von 2020 überhaupt erreicht werden kann. Abbildung 3-6 zeigt eindrücklich, dass die aktuelle Entwicklung der Treibhausgasemissionen weit von den Minderungen entfernt ist, die in den betrachteten Zielszenarien für notwendig erachtet werden. Die Entwicklung des Aktionsprogramms 2020 ist in diesem Zusammenhang ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung.

¹⁵ Auch hier ist die Differenz zu den von den im Szenario angestrebten 95% Minderung durch die Berücksichtigung der Emissionen im internationalen Luft- und Seeverkehr verursacht.

Abbildung 3-6: Zeitlicher Verlauf der gesamten THG-Emissionen

*) ERP-Ref: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-AMS. ERP-Ziel: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-KS80. LS2011-A und LS2011-THG95: Inklusive intern. Luft- und Seeverkehr gem. KSZ-KS80.

Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-11 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013, 2015); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

3.2.3. Entwicklung der sektoralen Treibhausgasminderung

Die folgenden sechs Abbildungen zeigen, welchen Beitrag die verschiedenen Verbrauchssektoren zur Minderung der Treibhausgasemissionen leisten. Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 stellen die sektorale Aufteilung der verbleibenden Emissionen in den Jahren 2030 und 2050 für verschiedene Szenarien dar.¹⁶ Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10 verdeutlichen, welchen absoluten Minderungsbeitrag die einzelnen Sektoren bis zu den Jahren 2030 und 2050 erbringen (verglichen mit dem Jahr 1990). Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12 schließlich zeigen die relative Minderung energiebedingter und nicht energiebedingter Emissionen im selben Zeitraum. Die Szenarien der „Leitstudie 2011“ werden hier nicht diskutiert, da in dieser Studie keine Aufteilung der Emissionen auf Verbrauchssektoren, sondern nur in die Verbrauchsegmente Strom, Wärme und Kraftstoffe erfolgt.

Die energiebedingten Emissionen werden in allen betrachteten Zielszenarien wesentlich reduziert. In den beiden weniger ambitionierten Zielszenarien (KSZ-KS80 und ERP-Ziel) werden in diesem Bereich (bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990) 857 Mio. tCO₂äq bzw. 799 Mio. tCO₂äq vermieden. Dies entspricht einer relativen Minderung (bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990) von 85% bzw. 80%. In den anderen Szenarien wird eine (fast) treibhausgasneutrale Energieversorgung realisiert:

¹⁶ Die Emissionen, die bei der Erzeugung von Strom für strombasierte Endenergieträger entstehen, werden dabei dem Stromsektor zugeordnet.

Im Szenario KSZ-KS90 der „Klimaschutzszenario“-Studie werden noch ca. 95 Mio. tCO₂äq energiebedingte Restemissionen unterstellt, im KSZ-KS95 sind es nur noch 36 Mio. tCO₂äq. Im Szenario „Treibhausgasneutrales Deutschland“ ist die Energieversorgung vollständig emissionsfrei. Den größten absoluten Minderungsbeitrag leistet in allen Szenarien die Energiewirtschaft, aber auch in den Sektoren Industrie, GHD, Haushalte und Verkehr werden erhebliche Minderungspotenziale genutzt.

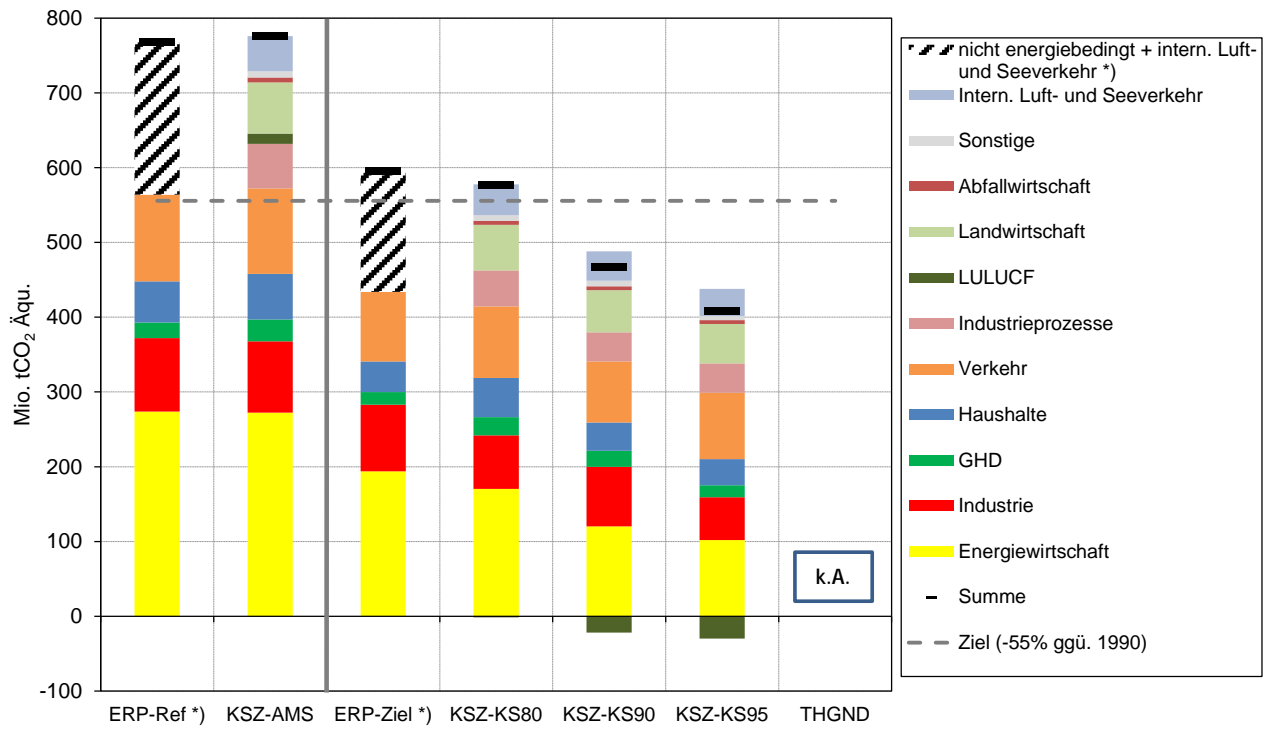
Die Emissionen aus der Energiewirtschaft sind im Jahr 2050 in Szenario „KSZ-KS90“ niedriger als im ambitionierteren Szenario „KSZ-KS95“. Dies liegt daran, dass in der ersten Modellierungsrunde die negativen Emissionen der Biomassenutzung als CCS bei Biogasanlagen im Sektor Energiewirtschaft abgezogen wurden. In der zweiten Modellierungsrunde kam grundsätzlich weniger CCS zum Einsatz und wurde wenn, nur in der Industrie eingesetzt.

Die nicht energiebedingten Emissionen von Industrie, Abfallwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft sowie aus Landnutzungsänderungen (LULUCF) hingegen werden in wesentlich geringerem Maße reduziert. Im Szenario KSZ-KS80 erfolgt in diesem Bereich bis zum Jahr 2050 eine Minderung um lediglich 57%. Auch den beiden ambitionierten Szenarien können nur Minderungen von 73% („Treibhausgasneutrales Deutschland“) bzw. 84% (KS 95 aus „Klimaschutzszenario“) realisiert werden. Dies führt dazu, dass die Bedeutung der nicht energiebedingten Emissionen im Zeitverlauf deutlich zunimmt: Ihr Anteil am gesamten Emissionsbudget lag im Jahr 1990 noch bei 18%. Im Jahr 2050 steigt dieser Anteil in den Szenarien KSZ-KS80 bzw. KSZ-KS95 auf 45% bzw. 66%. Im Szenario „Treibhausgasneutrales Deutschland“ liegen die verbleibenden Emissionsquellen ausschließlich außerhalb des Energiebereichs. Dabei sind die Minderungspotenziale in den verschiedenen Sektoren unterschiedlich groß – über alle Szenarien kann die Industrie einen größeren Beitrag zur Minderung nicht energiebedingter Emission leisten als die Landwirtschaft. In den beiden Szenarien, die eine Emissionsminderung von 95% bis 2050 anstreben, entwickelt sich der Landwirtschaftssektor bis zum Jahr 2050 zum Hauptemittenten. Der Sektor der Landnutzungsänderungen (LULUCF) nimmt eine Sonderstellung ein: Der LULUCF-Sektor stellte im Jahr 1990 eine Emissionssenke in der Größenordnung von ca. 36 Mio. tCO₂äq dar. Die Senkenfunktion nimmt im KS-95 leicht ab, und im KS-80 sowie im Szenario THGND wird im LULUCF-Sektor sogar eine leicht positive Emissionsbilanz angenommen. Dies resultiert in der Differenzbetrachtung zwischen den Jahren 2050 und 1990 zu einem positiven Minderungsbeitrag für den LULUCF-Sektor.

Beide Studien betonen, dass die realisierten Minderungen der nicht energiebedingten Emissionen äußerst ambitioniert sind und die beteiligten Sektoren vor große Herausforderungen stellen. Entsprechende Lösungsansätze werden in der zugehörigen Sektorstudie ausführlich diskutiert.

Die Schwierigkeit der Reduktion von nicht energiebedingten Treibhausgasemissionen führt dazu, dass in ambitionierten Klimaschutzszenarien in der Energieversorgung entsprechend größere Minderungsbeiträge geleistet werden müssen. Im Zielszenario der Energierferenzprognose ist deutlich zu erkennen, dass der erforderliche Minderungsbeitrag im Energiesystem unterschätzt wird, wenn die Entwicklung im Bereich der nicht energiebedingten Emissionen nicht berücksichtigt wird.

Abbildung 3-7: Sektorale Aufteilung der verbleibenden THG-Emissionen in 2030

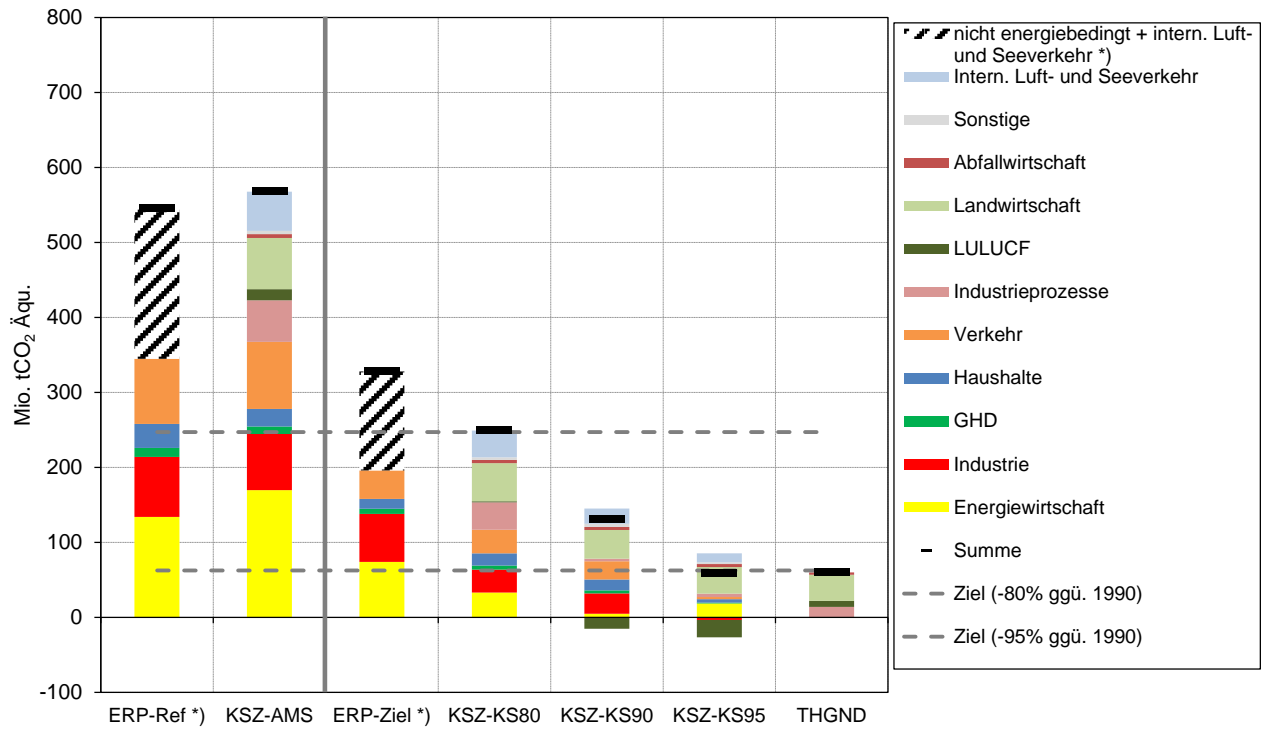


*) ERP-Ref: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-AMS. ERP-Ziel: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-KS80.

Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-12 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Abbildung 3-8: Sektorale Aufteilung der verbleibenden THG-Emissionen in 2050

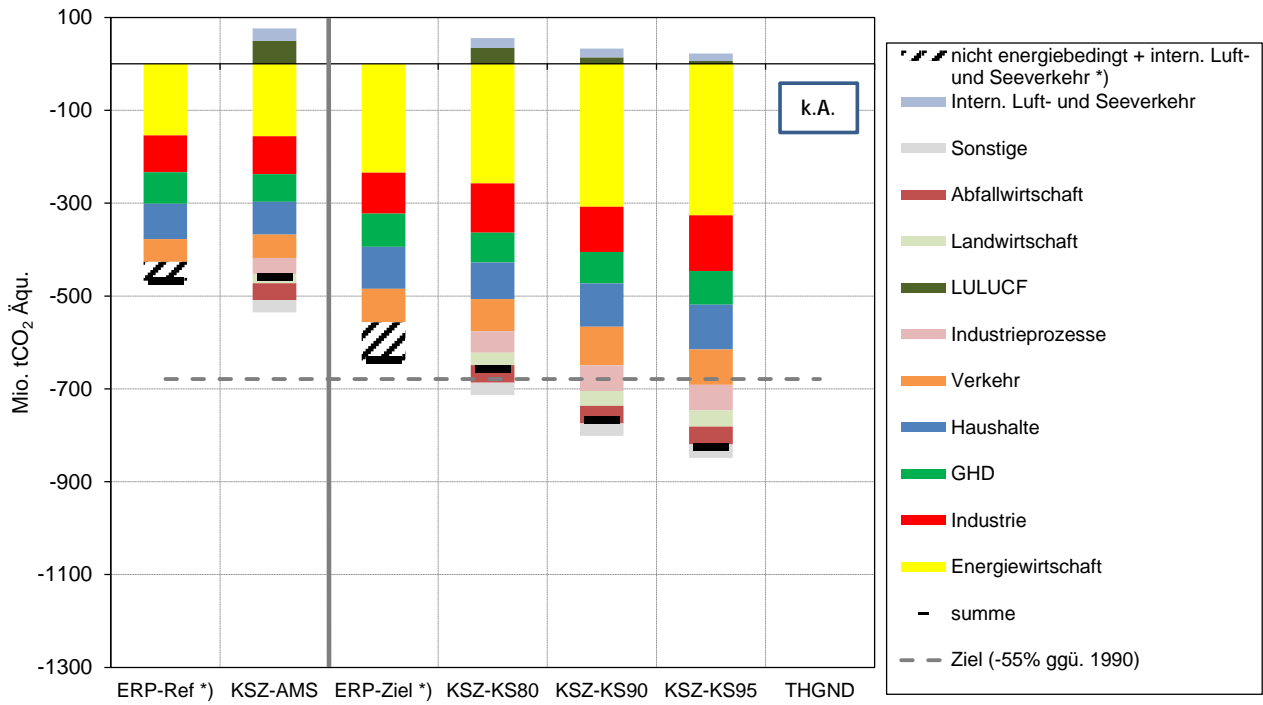


*) ERP-Ref: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-AMS. ERP-Ziel: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-KS80.

Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-13 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

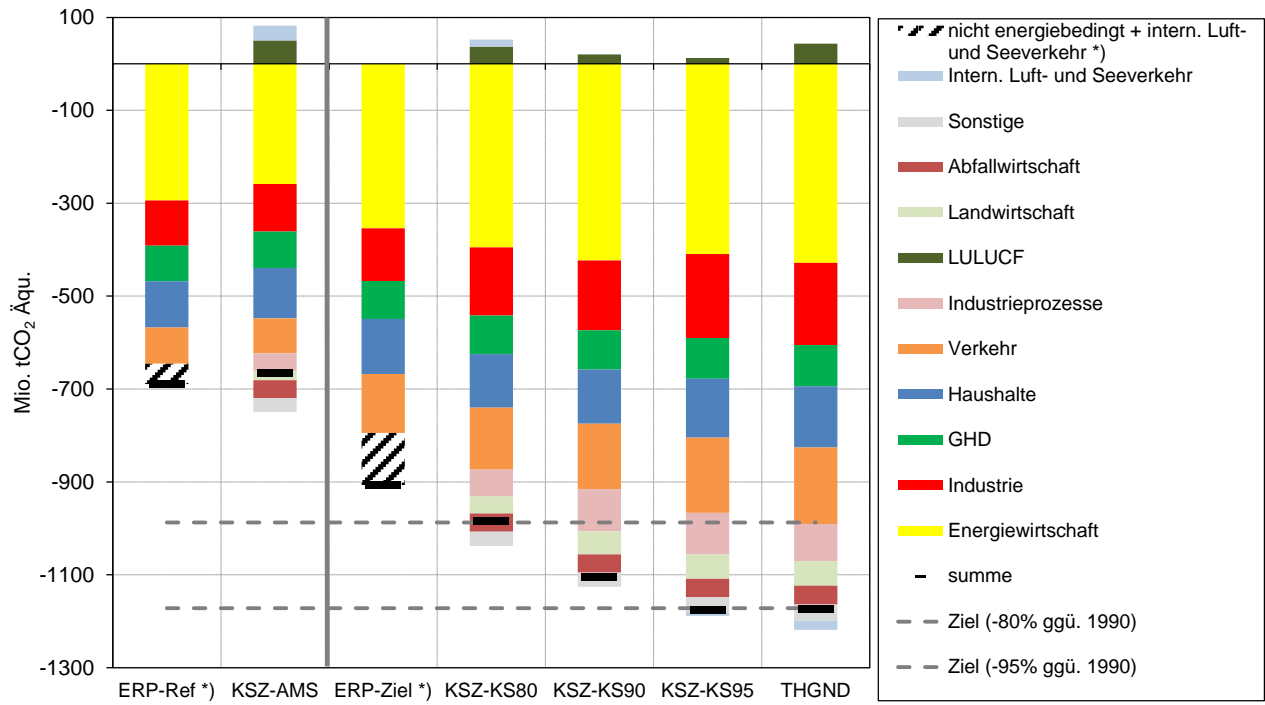
Abbildung 3-9: Sektorale Aufteilung der Emissionsminderungen zwischen 1990 und 2030



*) ERP-Ref: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-AMS. ERP-Ziel: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-KS80.

Quelle: UBA (2013a); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

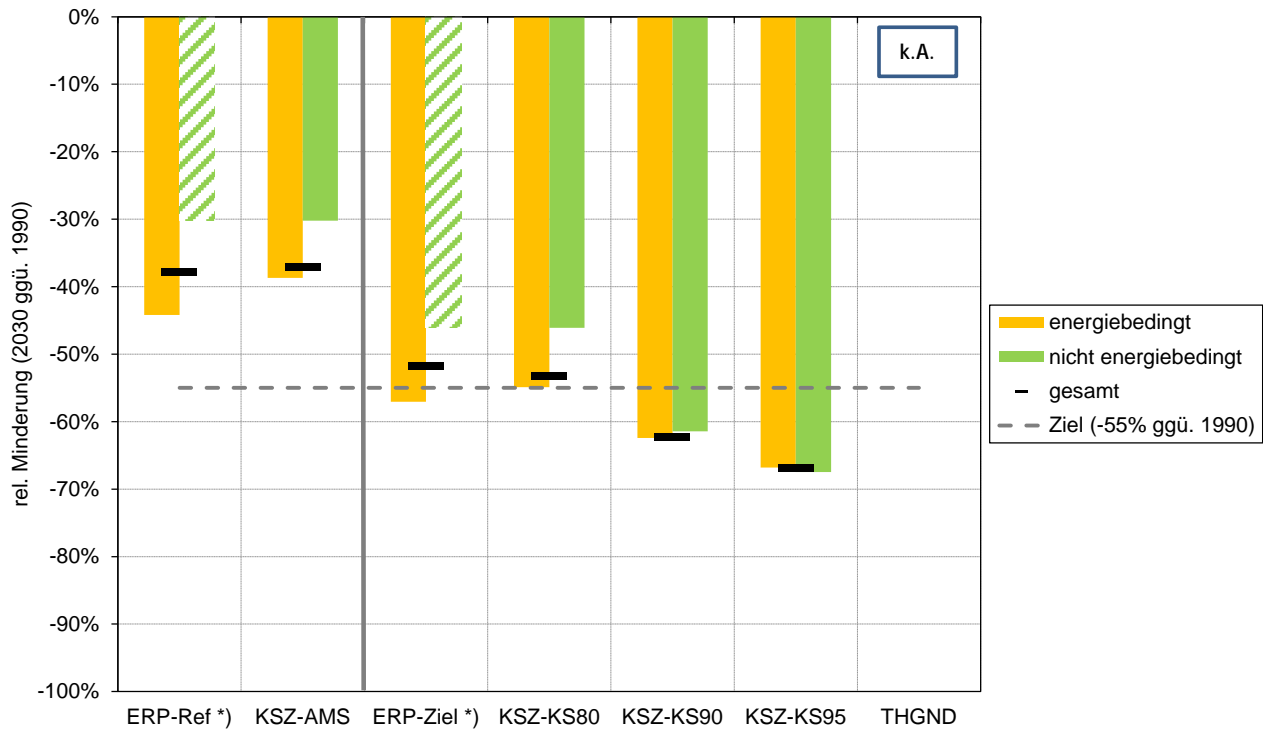
Abbildung 3-10: Sektorale Aufteilung der Emissionsminderungen zwischen 1990 und 2050



*) ERP-Ref: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-AMS. ERP-Ziel: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-KS80.

Quelle: UBA (2013a); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

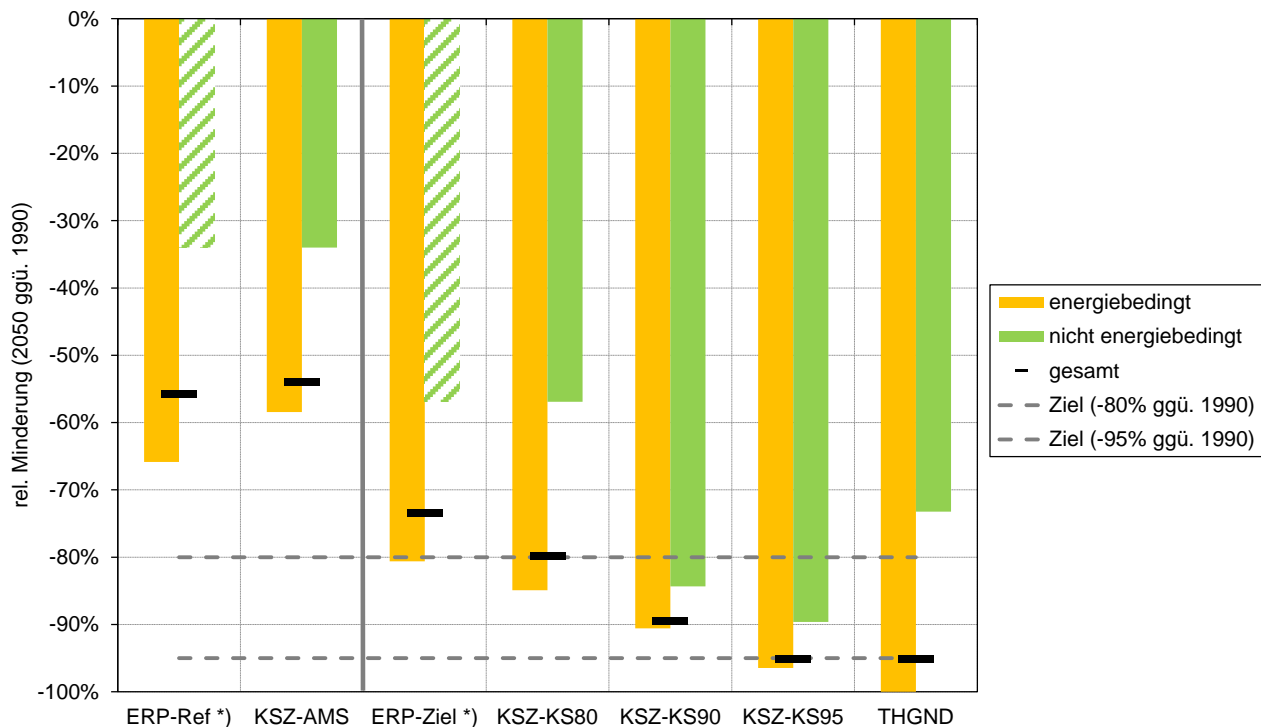
Abbildung 3-11: Relative Minderung energiebedingter und nicht energiebedingter Emissionen zwischen 1990 und 2030



*) ERP-Ref: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-AMS. ERP-Ziel: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-KS80.

Quelle: UBA (2013a); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

Abbildung 3-12: Relative Minderung energiebedingter und nicht energiebedingter Emissionen zwischen 1990 und 2050



*) ERP-Ref: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-AMS. ERP-Ziel: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-KS80.

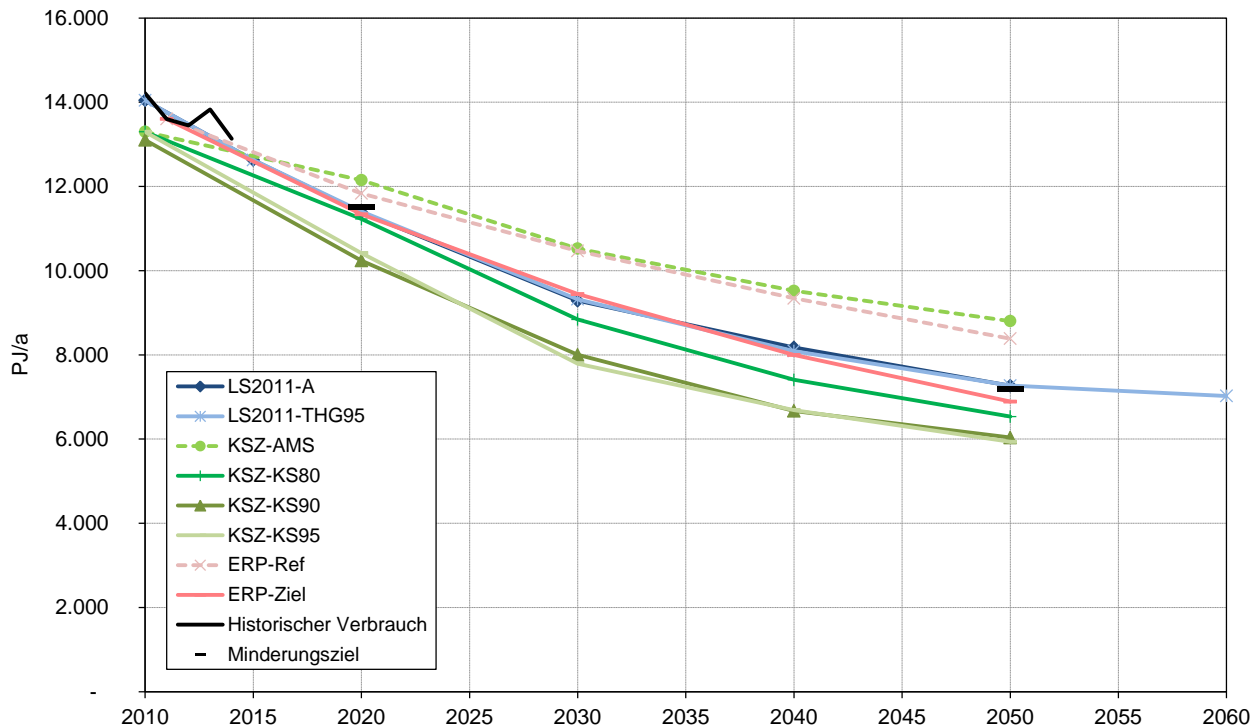
Quelle: UBA (2013a); Prognos, EWl, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

3.3. Entwicklung des Primärenergiebedarfs

Abbildung 3-13 zeigt, wie sich der gesamte Primärenergiebedarf in den untersuchten Szenarien bis zum Jahr 2050 entwickelt. Die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ wird nicht diskutiert, da dort keine Angaben zum Primärenergieeinsatz gemacht werden. Die Szenarien der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ weisen durchgehend niedrigere Verbrauchswerte als die übrigen Szenarien aus, da in dieser Studie Hochseebunkerungen der internationalen Seeschifffahrt beim Primärenergieverbrauch nicht erfasst werden.

In allen Szenarien ist im Zeitverlauf eine deutliche Minderung des Primärenergiebedarfs zu verzeichnen. Dies ist im Wesentlichen auf zwei Effekte zurückzuführen: Zum einen sinkt der Energiebedarf durch die Umsetzung zahlreicher Effizienzmaßnahmen in allen Sektoren. Zum anderen steigt in allen Szenarien der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergiemix. Da der Primärenergiebedarf für erneuerbare Energien mittels der Wirkungsgradmethode berechnet wird, führt die Verdrängung konventioneller Energieträger zu einer Abnahme des Primärenergiebedarfs, auch wenn der Endenergiebedarf konstant bleiben würde.

Die im Energiekonzept verankerten Minderungsziele für den Primärenergiebedarf (20% Reduktion bis 2020, 50% Reduktion bis 2050) werden in allen betrachteten Zielszenarien erfüllt. In den beiden Referenzszenarien („ERP-Ref“ und „KSZ-AMS“) werden die Ziele sowohl für 2020 als auch für 2050 verfehlt.

Abbildung 3-13: Entwicklung des gesamten Primärenergiebedarfs 2010 bis 2060¹⁷

Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-14 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); AG Energiebilanzen (2014a); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Entwicklung des Primärenergiemixes. Abbildung 3-14 und Abbildung 3-15 zeigen die Aufteilung des Primärenergiebedarfs nach Energieträgern in den verschiedenen Szenarien für die Jahre 2030 und 2050 sowie zum Vergleich den Primärenergiemix im Jahr 2010.¹⁸ Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17 zeigen die Änderung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern zwischen den Jahren 2010 und 2030 bzw. 2050. Für das Szenario THG95 der „Leitstudie 2011“ (LS-THG95) wird - abweichend von den übrigen Szenarien – das Jahr 2060 gezeigt, da in diesem Szenario das angestrebte Emissionsminderungsziel für das Jahr 2050 erst im Jahr 2060 erreicht wird. Da in der „Leitstudie 2011“ der Primärenergieverbrauch für erneuerbare Energieträger nicht nach Energieträgern getrennt ausgewiesen wird, ist dieser Posten für die entsprechenden Szenarien in aggregierter Form („Sonstige Erneuerbare“) dargestellt.

Der Anteil erneuerbarer Energieträger am gesamten Primärenergieverbrauch nimmt deutlich zu. Von 11% im Jahr 2010 steigt dieser Wert in den drei weniger ambitionierten Zielszenarien („ERP-Ziel“, „LS2011-A“ und „KSZ-KS80“) auf 51% bis 65% im Jahr 2050. In den beiden ambitionierteren Szenarien (KSZ-KS95 und LS2011-THG95) steigt der erneuerbare Anteil am Primärenergieverbrauch sogar auf 85% bzw. 83%. Diese Entwicklung wird getrieben durch den Ausbau erneuerbarer Energien einerseits und die Verdrängung nicht erneuerbarer Energieträger andererseits.

¹⁷ In der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ sind Hochseebunkerungen der internationalen Seeschifffahrt nicht im Primärenergieverbrauch enthalten.

¹⁸ Die Daten für das Basisjahr 2010 wurden, wenn nicht anders angegeben, der Studie „Klimaschutzszenarien 2050“ entnommen. Dies gilt auch für alle folgenden Abbildungen in diesem Kapitel.

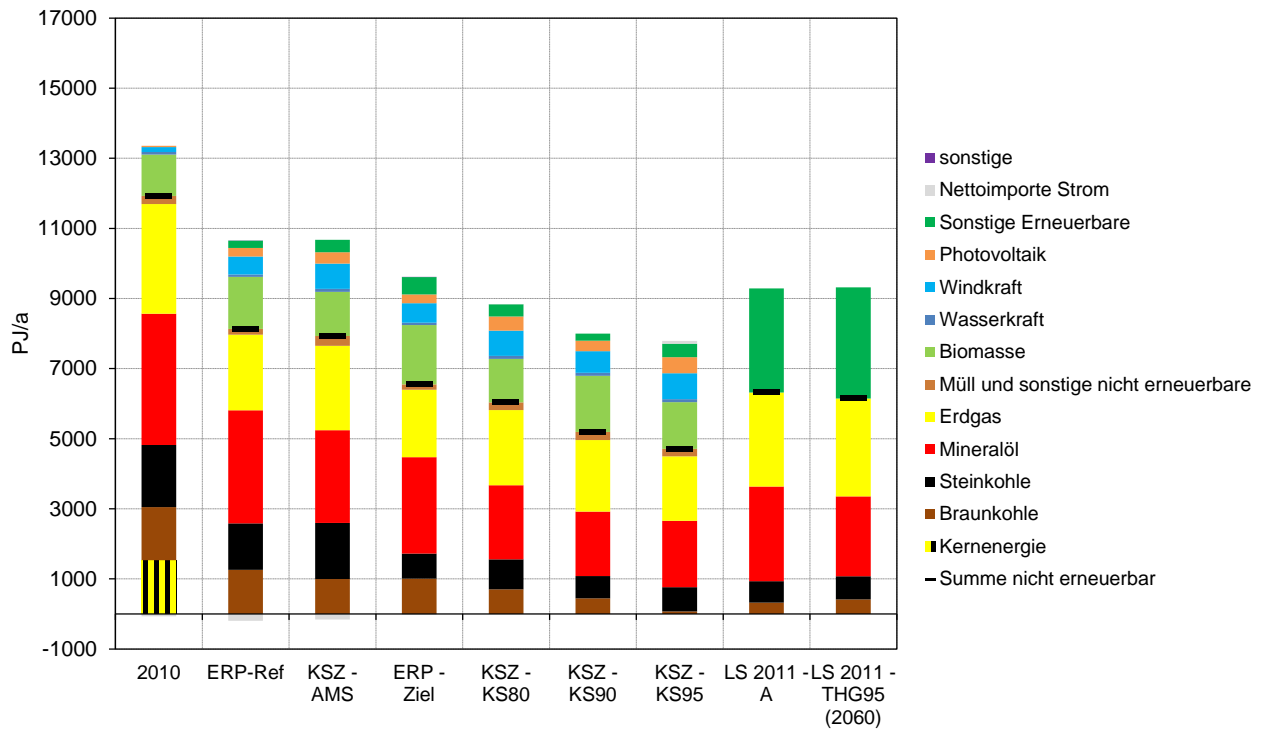
In allen Szenarien wird die Nutzung von Kernenergie gemäß des beschlossenen Atomausstiegs beendet. Darüber hinaus wird ein (nahezu) vollständiger Ausstieg aus der Braunkohlenutzung vollzogen: Lediglich in den weniger ambitionierten Szenarien ERP-Ziel und KSZ-KS80 wird auch im Jahr 2050 noch (in sehr geringem Umfang) Braunkohle eingesetzt. Auch die Verwendung von Steinkohle wird über alle Szenarien hinweg stark reduziert, allerdings verbleibt in allen Szenarien mit Ausnahme des Szenario LS2011-THG95 auch im Jahr 2050 noch ein kleiner Beitrag. Erdgas wird in allen Szenarien auch im Jahr 2050 noch eingesetzt. In den beiden ambitionierteren Szenarien ist dies auf Grund des schmalen Emissionsbudgets nur noch in sehr begrenztem Maße möglich.

Beim Einsatz von Mineralölen (diese werden zum allergrößten Teil als Kraftstoffe im Verkehrssektor eingesetzt) bietet sich ein heterogenes Bild: ERP-Ziel und LS2011-A messen diesem Energieträger auch in 2050 noch eine wesentliche Bedeutung bei. Selbst im ambitionierten Szenario LS2011-THG95 verbleibt im Jahr 2060 noch ein Mineralöl-Primärenergiebedarf von 820PJ/a. Lediglich im KSZ-KS95 kann im Jahr 2050 auf den Einsatz von Mineralöl fast vollständig verzichtet werden.¹⁹

Eine studienübergreifende Aussage bezüglich der Bedeutung der verschiedenen erneuerbaren Energieträger ist schwierig, da die Abgrenzung und die Verfügbarkeit der Daten sehr heterogen ist. Quer über alle Studien hinweg, ist ein deutlicher Ausbau der Nutzung von Solarenergie und Windkraft zu verzeichnen. Eine Ausweitung der Biomassenutzung findet nur im Zielszenario der Energiereferenzprognose in signifikanten Größenordnungen statt, da in den anderen Studien strenge Nachhaltigkeitskriterien zu einer Einschränkung der nutzbaren Biomassepotenziale führen (siehe Abschnitt 3.6.1).

¹⁹ In der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ wird vollständig auf den Einsatz fossiler Energieträger (und somit auch auf den Einsatz von Mineralöl) verzichtet.

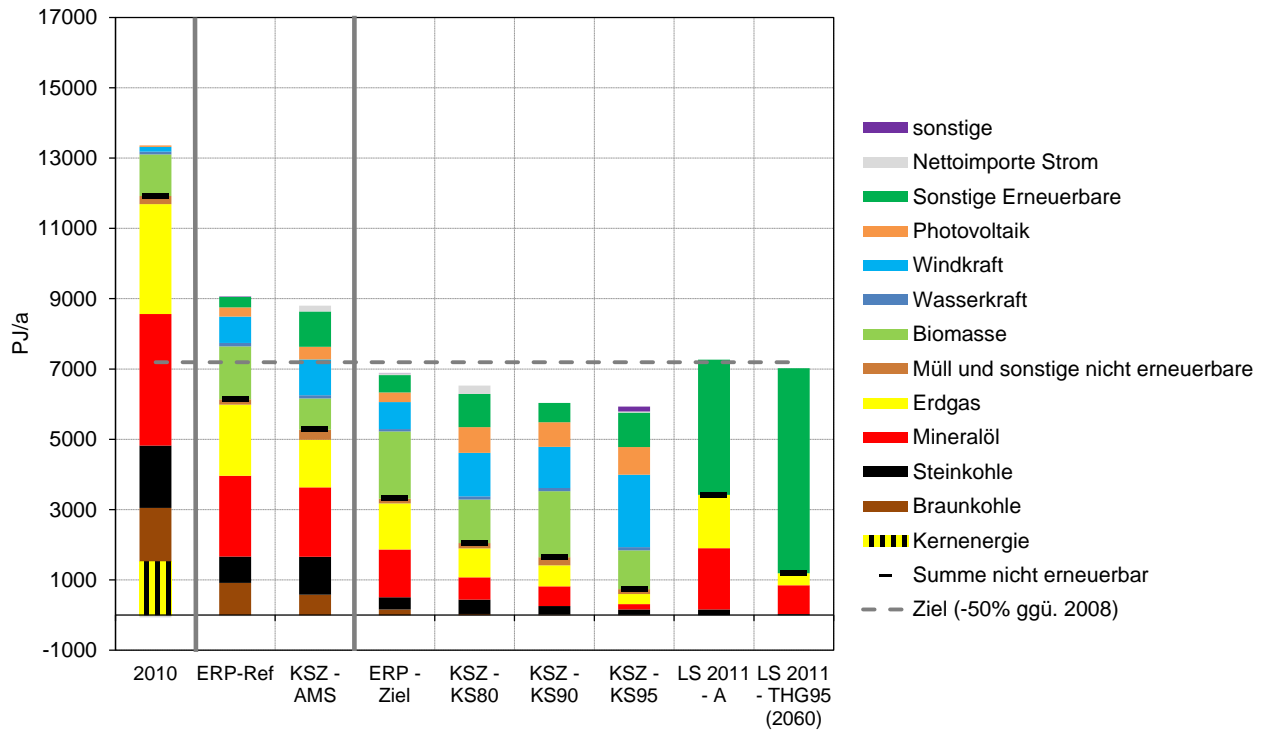
Abbildung 3-14: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in 2010 und 2030



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-15 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

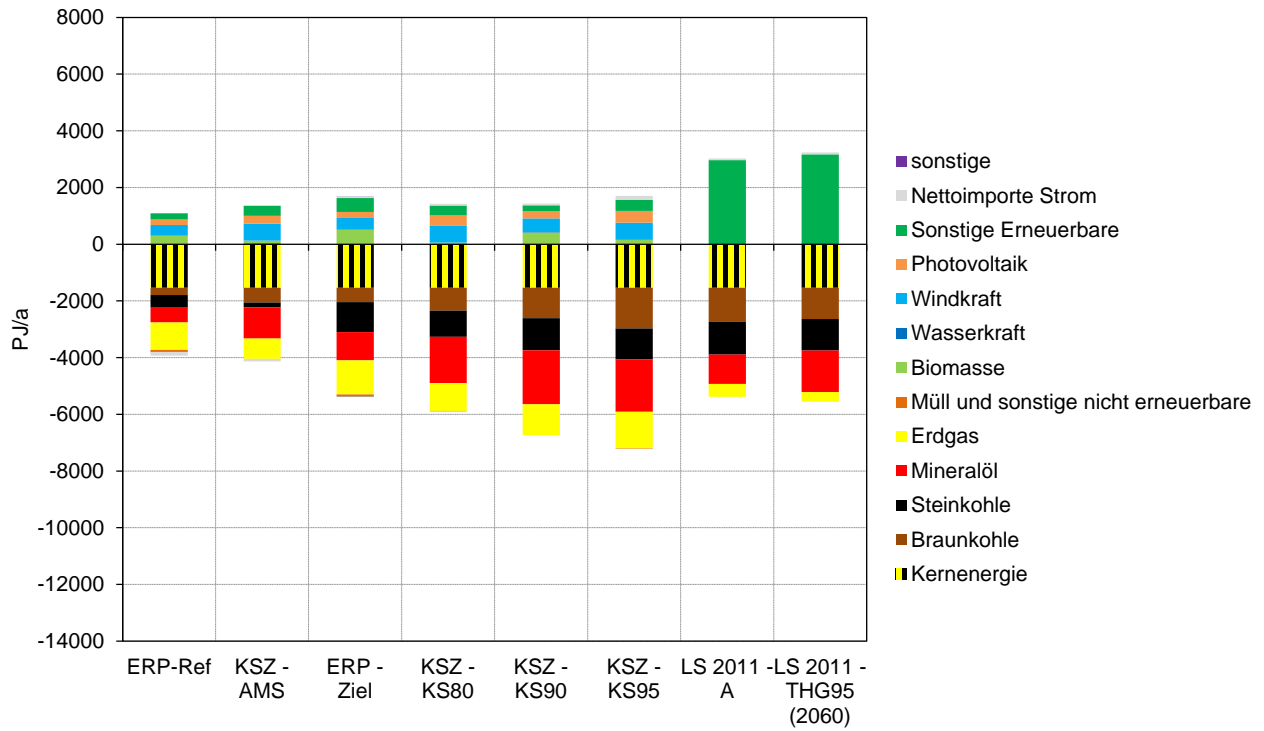
Abbildung 3-15: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-16 des Datenanhangs zu finden.

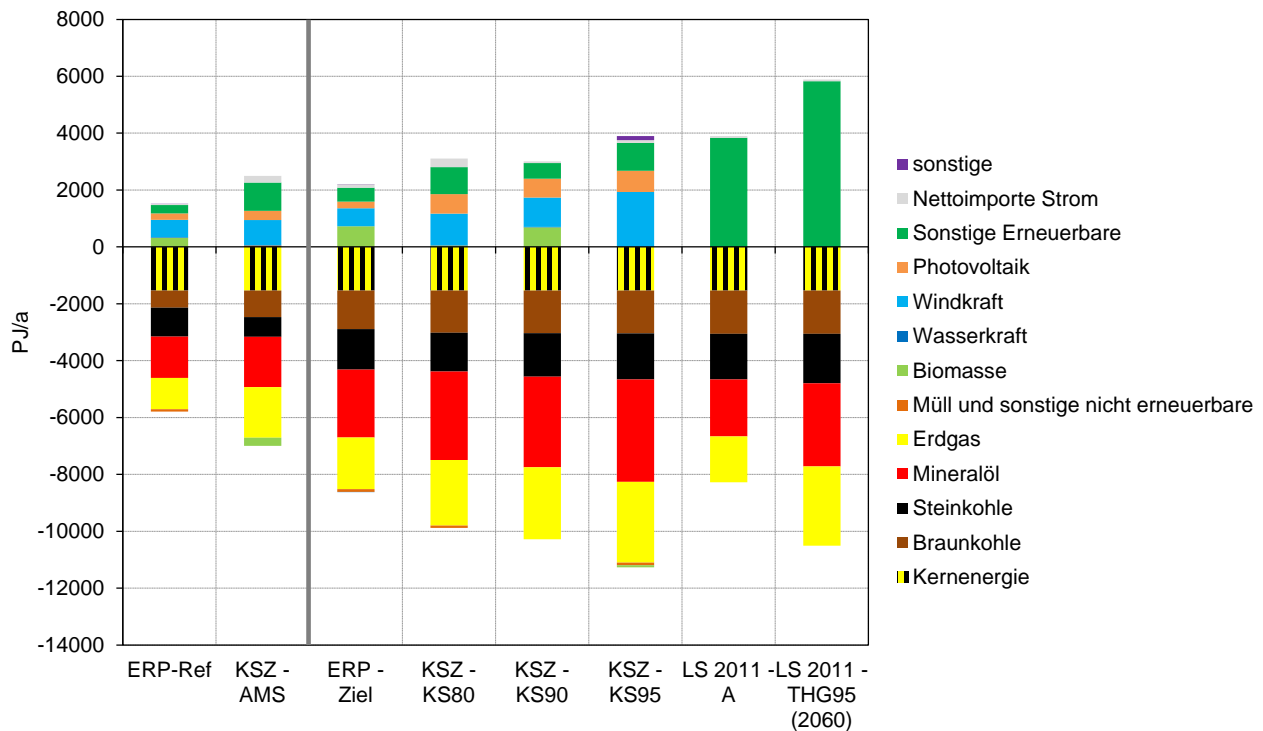
Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

Abbildung 3-16: Änderung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern zwischen 2010 und 2030



Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen

Abbildung 3-17: Änderung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern zwischen 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)

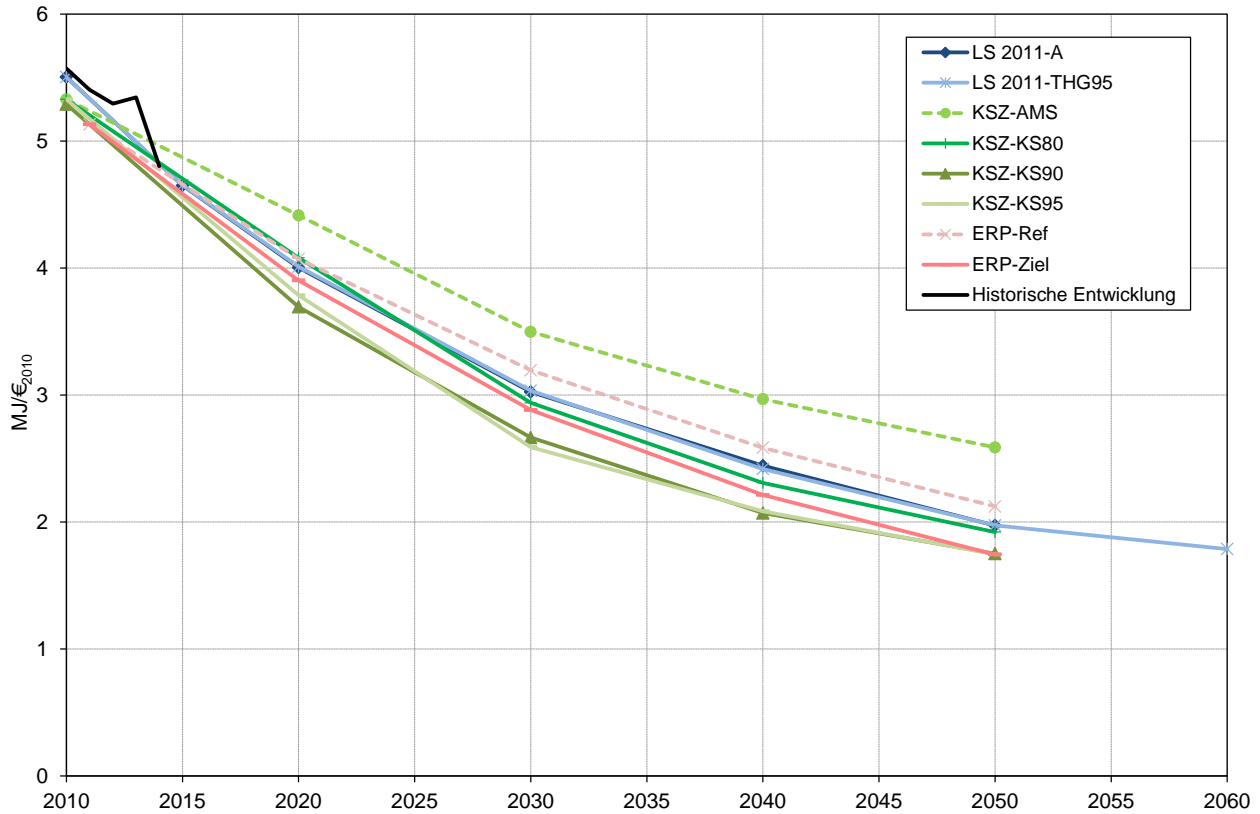


Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen

Abbildung 3-18 zeigt, wie sich die Energieintensität der Wirtschaftsleistung (Primärenergieverbrauch pro Bruttoinlandsprodukt) über die Zeit hinweg in den verschiedenen Szenarien entwickelt. In allen Szenarien ist eine deutliche Verringerung der Energieintensität zu erkennen, also eine zunehmende Entkopplung von Primärenergieverbrauch und Wirtschaftsleistung. Am deutlichsten ist dies erwartungsgemäß in den ambitionierteren Klimaschutzszenarien KSZ-KS90 und KSZ-KS95 zu sehen. Um das langfristig das Minderungsziel für den Primärenergieverbrauch und ebenso die THG-Emissionen zu erreichen, sind hohe Entkopplungsraten erforderlich – Effizienz spielt also eine ganz wesentliche Rolle bei der Erreichung ambitionierter Minderungsziele.

Die Entkopplung von Primärenergieverbrauch und Wirtschaftsleistung ist ein aggregiertes Maß über die Aktivitäten in der Gesamtwirtschaft und wird durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst, die zum Teil exogen in die Modellierung vorgegeben werden. Die Entkopplung kann auf Basis von technologischem Fortschritt und daraus resultierender effizienterer Nutzung von Endenergie stattfinden, auf Basis von Strukturwandel in der Wirtschaft hin zu weniger energieintensiven Wirtschaftssegmenten (beispielsweise Dienstleistungen), auf Basis von Brennstoffwechsel im Endenergiesektor oder in der effizienteren Umwandlung von Primärenergie zu Endenergie.

Abbildung 3-18: Entwicklung der Energieintensität der Wirtschaftsleistung (Primärenergieverbrauch pro BIP) bis 2060



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-17 des Datenanhangs zu finden.

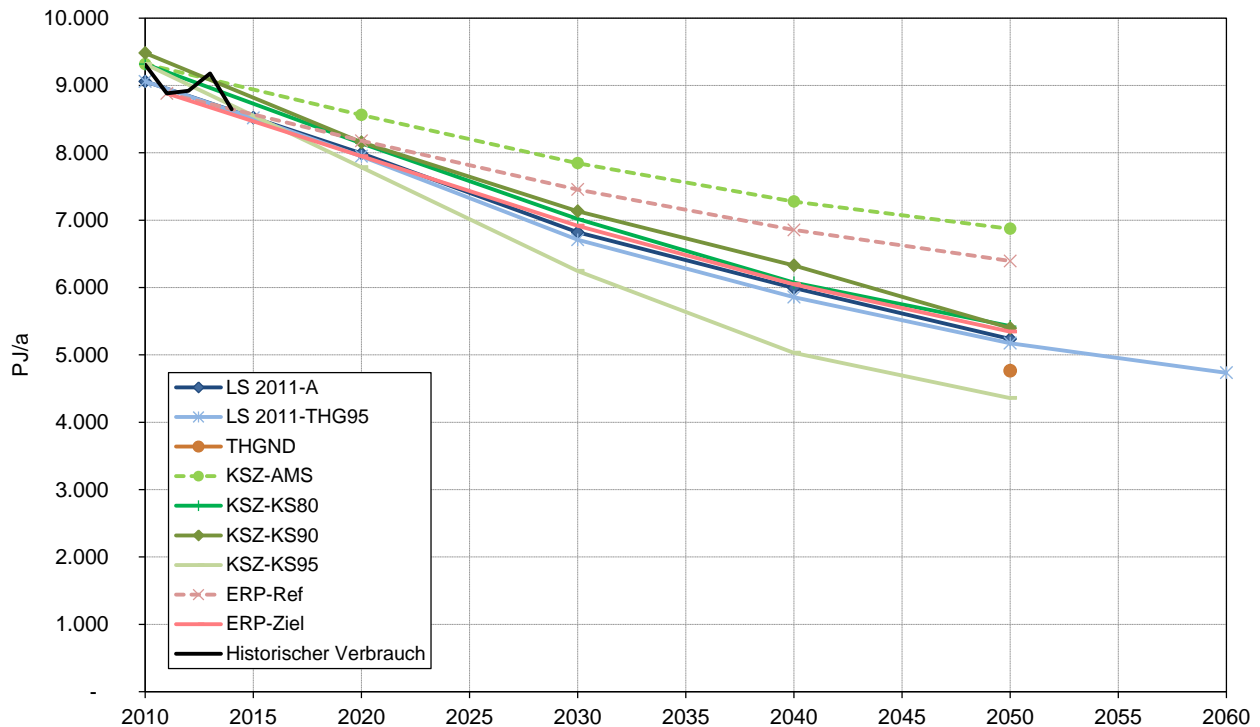
Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

3.4. Entwicklung des Endenergiebedarfs

In Abbildung 3-19 ist die zeitliche Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs für die verschiedenen untersuchten Szenarien dargestellt.

Ein Minderungsziel für den gesamten Endenergiebedarf ist im Energiekonzept nicht definiert. Der zunehmend effiziente Einsatz von Energie führt dennoch in allen Szenarien zu einer deutlichen Abnahme des Endenergiebedarfs. Der Endenergiebedarf sinkt in den Zielszenarien deutlich stärker ab als in den beiden Referenzszenarien („ERP-Ref“ und „KSZ-AMS“). Dies weist darauf hin, dass Effizienzmaßnahmen einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele leisten. Im ambitionierten Szenario KS95 aus der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ spielen Effizienzmaßnahmen eine besonders wichtige Rolle.

Abbildung 3-19: Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs bis 2060



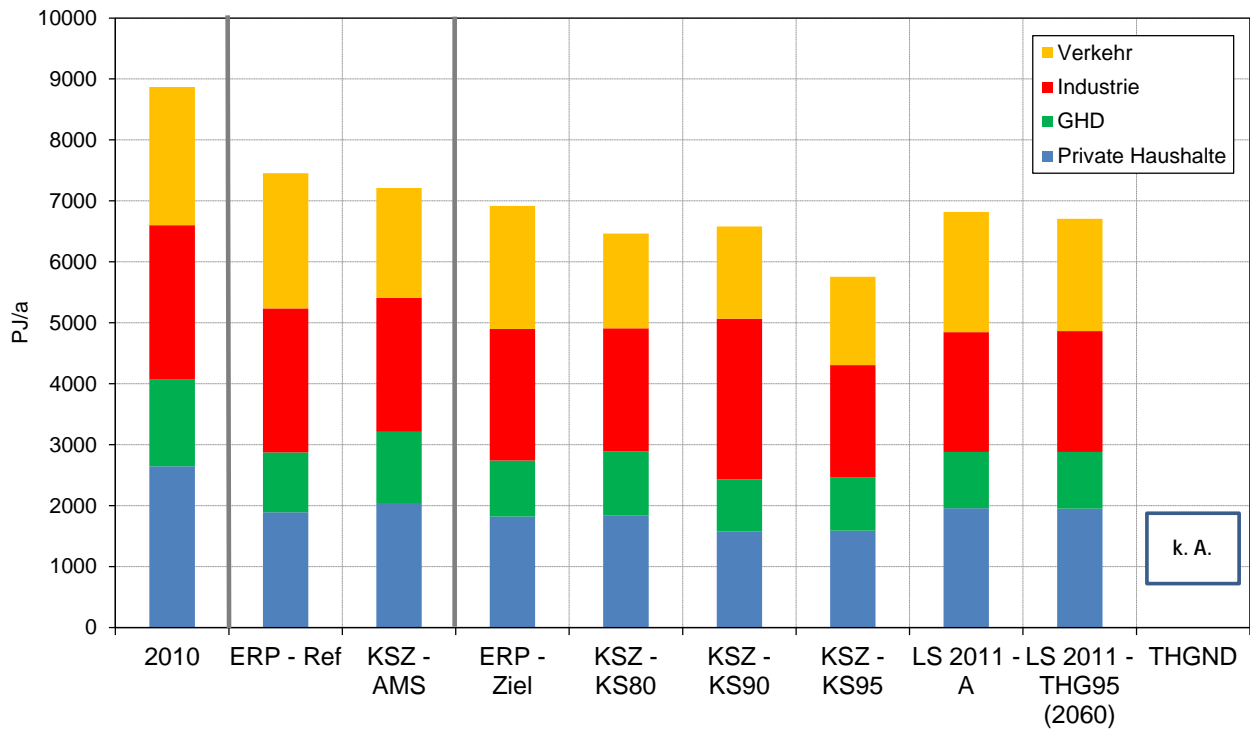
Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-18 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: AG Energiebilanzen (2011, 2012, 2013, 2014); DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 zeigen die Aufteilung des Endenergiebedarfs in den Jahren 2030 und 2050 nach Verbrauchssektoren. Zum Vergleich ist diesen Daten die sektorale Aufteilung des Endenergiebedarfs in 2010 gegenübergestellt. Obwohl das Ausmaß der Verbrauchsreduktion in den verschiedenen Szenarien unterschiedlich ausfällt, sind die relativen Beiträge der Sektoren Industrie, GHD und private Haushalte vergleichbar. Alle drei Sektoren leisten über alle Szenarien hinweg deutliche Beiträge zur Reduktion des Energieverbrauchs.

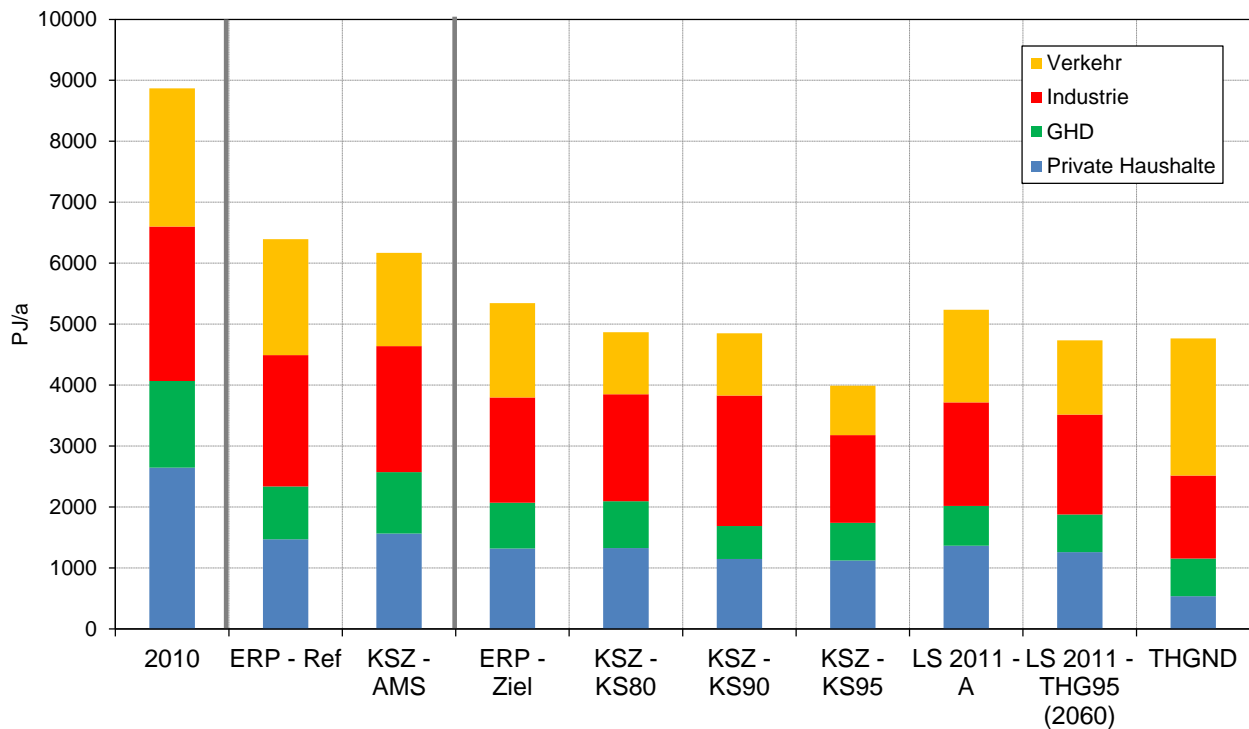
Lediglich für den Beitrag des Verkehrssektors bietet sich ein heterogenes Bild. Energierferenzprognose und Leitstudie 2011 gehen hier von einer Reduktion des Endenergiebedarfs um 30-40% aus. In den Szenarien der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ wird eine Reduktion um 55-64% unterstellt. In der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ bleibt der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor nahezu konstant. Dies ist allerdings darauf zurückzuführen, dass im Szenario THGND – anders als in den anderen Szenarien – der deutsche Anteil am internationalen Flug- und Seeverkehr mit bilanziert wird.

Abbildung 3-20: Endenergiebedarf nach Sektoren in 2010 und 2030



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-19 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWl, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

Abbildung 3-21: Endenergiebedarf nach Sektoren in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)

Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-20 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen

Die folgenden Abbildungen zeigen, welche Energieträger in den verschiedenen Szenarien eingesetzt werden, um den Endenergiebedarf zu decken. Abbildung 3-22 und Abbildung 3-23 zeigen den energieträgerspezifischen Endenergiebedarf in den Jahren 2030 und 2050. Abbildung 3-24 und Abbildung 3-25 zeigen die absolute Änderung des energieträgerspezifischen Endenergiebedarf zwischen den Jahren 2010 und 2030 bzw. 2050.

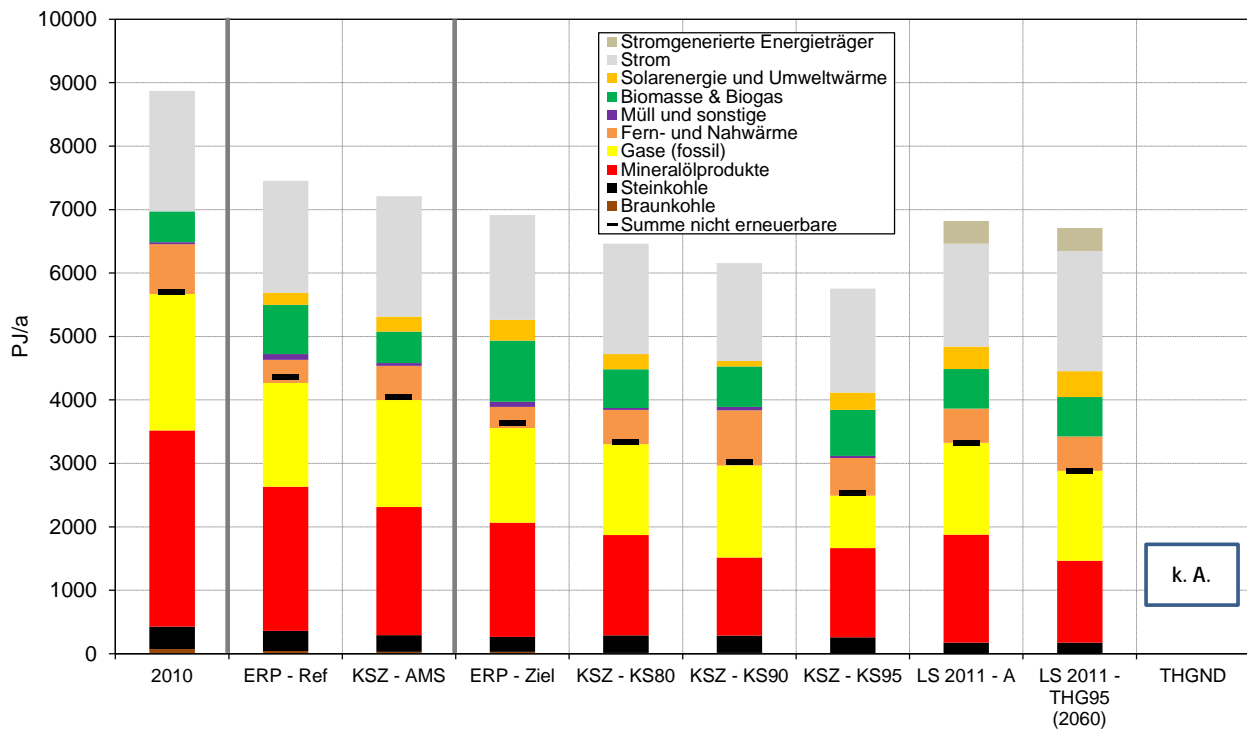
Über alle Szenarien hinweg ist eine Reduktion des Verbrauchs fossiler Endenergeträger zu beobachten. Im Jahr 2010 betrug der Anteil direkt genutzter fossiler Energieträger am gesamten Endenergieverbrauch 64%. In den Szenarien, in denen eine Emissionsminderung um 80% erreicht wird, sinkt dieser Wert bis zum Jahr 2050 auf 26-35%. In den ambitionierteren Szenarien sinkt der Anteil fossiler Energieträger noch weiter (auf 8% im KS95 der Klimaschutzszenarien und - im Jahr 2060 - auf 3% im Szenario THG95 der Leitstudie 2011). In der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ werden im Jahr 2050 überhaupt keine fossilen Energieträger mehr eingesetzt.

Bei der Entwicklung der Stromnachfrage zeigt sich ein heterogenes Bild: Während in den wenig ambitionierten Szenarien die Nachfrage entweder sinkt (ERP-Ziel sowie LS2011-A) oder unverändert bleiben (KSZ-KS80 und KSZ-KS90), steigt sie in den ambitionierteren Szenarien (KSZ-KS95 und THG95) deutlich an. Dies ist auf die wachsende Bedeutung neuer Stromnachfrager (insbesondere Elektromobilität und den Einsatz von Wärmepumpen) zurückzuführen (siehe auch Abschnitt 0). Die Bedeutung strombasierter Energieträger wird in den untersuchten Szenarien sehr unterschiedlich bewertet. In der Energierferenzprognose und dem Szenario KSZ-KS80 werden strombasierte Energieträger überhaupt nicht eingesetzt. In den Szenarien der „Leitstudie 2011“ spielen Wasserstoff und Methan eine wichtige Rolle bei der

Substituierung von ölasierten Kraftstoffen im Verkehrssektor. In der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ wird strombasierten Energieträgern eine tragende Rolle für die gesamte Energieversorgung zugeschrieben – im Endverbrauchsmix übersteigt ihr Anteil den Anteil direkt genutzten Stroms um fast das Doppelte. Eine detailliertere Analyse der Nutzung strombasierter Kraftstoffe ist in Abschnitt 3.6 zu finden.

Die energetische Nutzung von Biomasse wird gegenüber 2010 in allen Szenarien ausgeweitet. Der Einsatz ist jedoch auf Grund von Nachhaltigkeitsanforderung begrenzt (siehe Abschnitt 3.6.1 zum Einsatz von Biomasse).

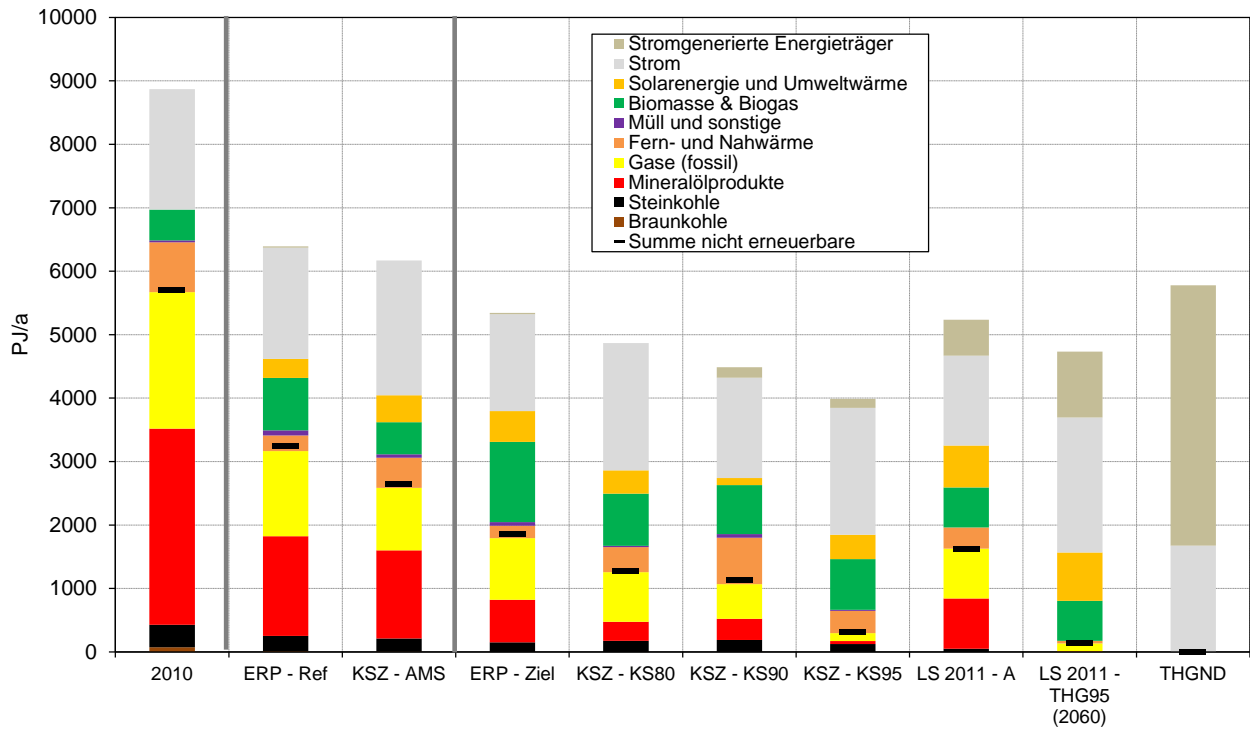
Abbildung 3-22: Endenergiebedarf in 2010 und 2030 nach Energieträgern



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-21 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

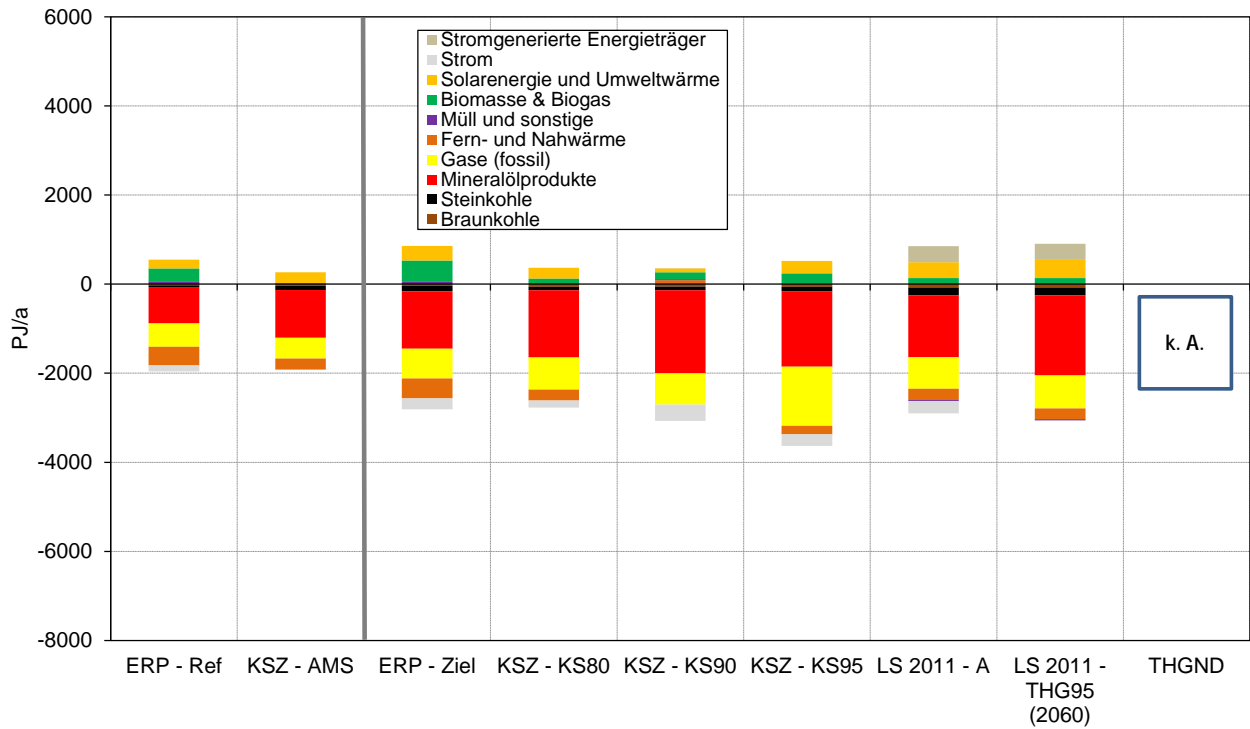
Abbildung 3-23: Endenergiebedarf in 2010 und 2050 nach Energieträgern (2060 für LS 2011-THG95)



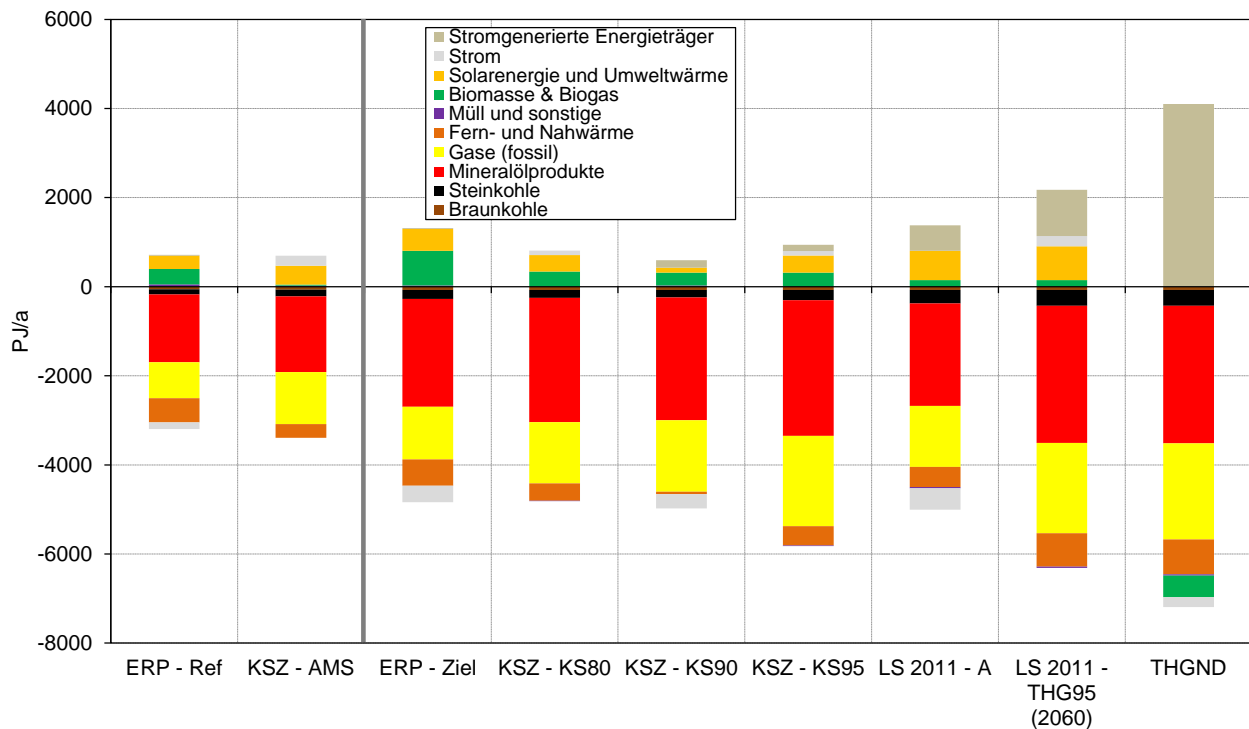
Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-22 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

Abbildung 3-24: Änderung des Endenergiebedarf nach Energieträgern zwischen 2010 und 2030



Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

Abbildung 3-25: Änderung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern zwischen 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

3.5. Entwicklung von Stromnachfrage und Stromerzeugung

In diesem Abschnitt werden die Entwicklung der Stromnachfrage sowie die Bedeutung einzelner Erzeugungstechnologien diskutiert. Ziel ist es, einen groben Überblick über die Strategien der einzelnen Szenarien zu bieten.

Abbildung 3-26 zeigt die Entwicklung der Stromnachfrage in den untersuchten Szenarien bis zum Jahr 2060. Anders als bei den bereits diskutierten Entwicklungen der Primär- und Endenergienachfrage unterscheiden sich hier die langfristigen Trends in den untersuchten Szenarien deutlich.

Grundsätzlich können in allen Szenarien zwei Effekte beobachtet werden, welche die langfristige Entwicklung der Stromnachfrage beeinflussen: Zum einen führt der zunehmend effizientere Einsatz von Elektrizität und die Umsetzung von Stromsparmaßnahmen im Bereich „klassischer Stromverbraucher“ zu einer Verringerung des Strombedarfs. Dieser Effekt ist über den gesamten betrachteten Zeitraum hinweg zu beobachten. Dem gegenüber steht der wachsende Strombedarf durch neue Einsatzgebiete für Elektrizität. Zum Kreis dieser „neuen Stromverbraucher“ gehören, Elektromobilität, strombasierte Wärmebereitstellung und die Erzeugung strombasierter Energieträger wie Wasserstoff, Methan und flüssige Kohlenwasserstoffe (Power-to-Heat, Power-to-Gas, Power-to-Liquids).

Effizienzmaßnahmen werden in allen Szenarien eingesetzt, wenn auch ihr Umfang innerhalb einer gewissen Spannweite variiert. Dies resultiert in allen Szenarien (mit Ausnahme des Szenarios „ERP-Ref“) kurz- bis mittelfristig in einer Senkung des Strombedarfs. Besonders gut zu erkennen

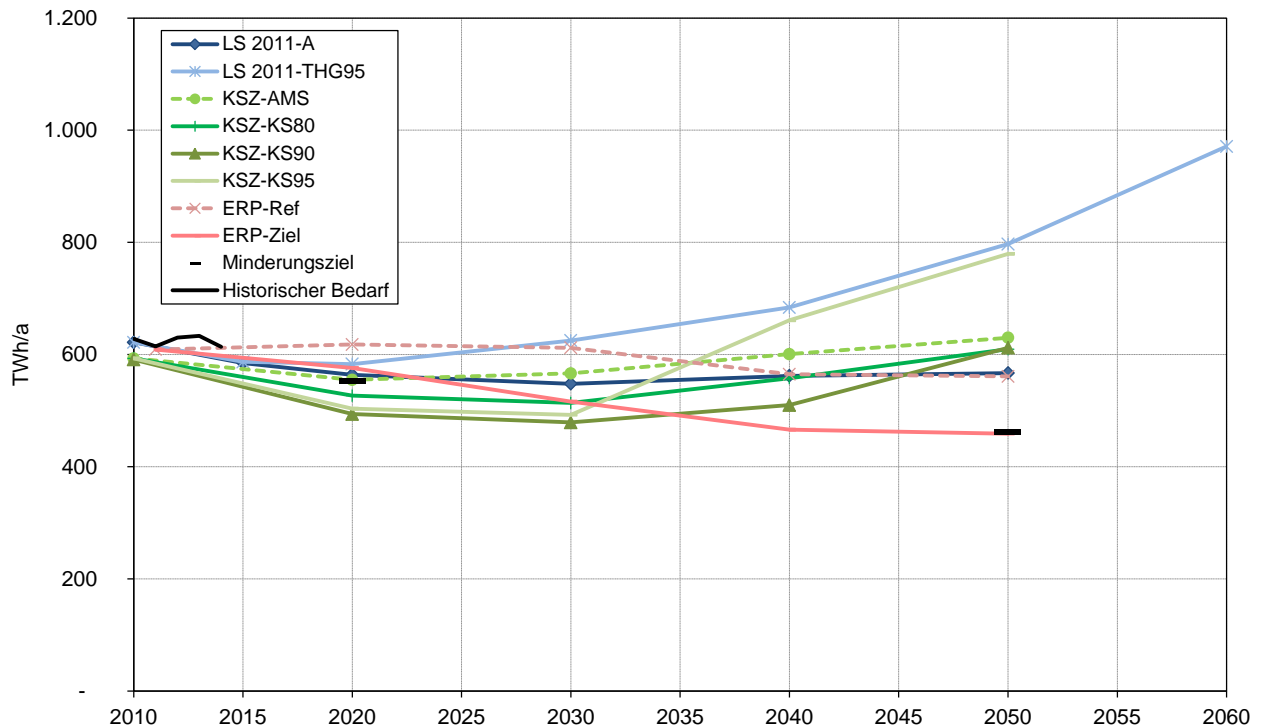
ist dieser Effekt in den Szenarien „KSZ-KS90“ und „KSZ-KS95“, in denen Effizienzmaßnahmen eine besonders wichtige Rolle spielen und in denen das Zwischenziel für die Minderung des Stromverbrauchs im Jahr 2020 deutlich übererfüllt wird.

Bezüglich der Bedeutung der neuen Stromverbraucher, insbesondere des Einsatzes strombasierter Energieträger, unterscheiden sich die Szenarien erheblich. Dies führt in der Konsequenz zu deutlichen Unterschieden bei den langfristigen Trends:

- Im wenig ambitionierten Szenario „ERP-Ziel“ spielen neue Verbraucher nur eine sehr geringe Rolle. Daher sinkt in diesem Szenario die Stromnachfrage bis zum Jahr 2050 kontinuierlich. Dieses Szenario ist das einzige, welches das im Energiekonzept definierte Minderungsziel für die Gesamtstromnachfrage (-25% bis 2050) erreicht.
- In den Szenarien „KSZ-KS80“ und „LS 2011-A“ die eine Emissionsminderung um 80% bis 2050 anstreben, steigt die Stromnachfrage ab ca. 2030 wieder leicht an und erreicht im Jahr 2050 in etwa das heutige Niveau.
- In den ambitionierten Szenarien „KSZ-KS95“ und „LS 2011-TNG95“ spielen neue Stromverbraucher eine wesentlich größere Rolle, und der Strombedarf steigt langfristig auf Werte, die deutlich über dem heutigen Niveau liegen.
- Das Szenario „THGND“ ist in Abbildung 3-26 und in den folgenden Abbildungen nicht aufgeführt, da in dieser Studie der gesamte Stromverbrauch nicht exakt ausgewiesen wird. Da in Szenario „THGND“ vollständig auf den Einsatz fossiler Energieträger verzichtet wird, spielen strombasierte Energieträger dort eine wesentliche Rolle. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass nur die direkt als Endenergie eingesetzte Strommenge (diese wird mit 466TWh/a beziffert) innerhalb Deutschlands produziert wird. Die strombasierten Energieträger (Methan und flüssige Kohlenwasserstoffe) werden hingegen im Ausland produziert und importiert. Der weitaus größte Teil des gesamten Strombedarfs (der in der Studie auf ca. 3000TWh/a geschätzt wird), wird also im Ausland erzeugt.

In der Gesamtschau führt dies dazu, dass (mit Ausnahme des bezüglich der Treibhausgas-minderung wenig ambitionierten Szenarios „ERP-Ziel“) keines der Szenarien das im Energiekonzept definierte Minderungsziel für den Stromverbrauch einhalten kann. In diesem Zusammenhang könnte eine Differenzierung der Verbrauchsziele für „klassische“ und „neue“ Stromverbraucher sinnvoll sein.

Abbildung 3-26: Entwicklung des Strombedarfs bis 2060²⁰



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-23 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); AG Energiebilanzen (2014a); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

In den folgenden Abbildungen wird die Bedeutung einzelner Technologiegruppen für die Deckung des Strombedarfs aufgezeigt. Abbildung 3-27 und Abbildung 3-28 zeigen für die untersuchten Szenarien die Aufteilung der Stromerzeugung nach Energieträgern bzw. Technologiegruppen in den Jahren 2030 und 2050. Abbildung 3-29 und Abbildung 3-30 zeigen die absolute Änderung der Stromerzeugung pro Energieträger zwischen den Jahren 2010 und 2030 bzw. 2050.

Im Stromsektor ist in allen Szenarien ein sehr ausgeprägter Strukturwandel zu beobachten. Durch den Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung werden die konventionellen Energieträger nahezu vollständig aus dem System gedrängt. Der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie wird in allen Szenarien unterstellt, und auch auf die Verstromung von Braun- und Steinkohle wird im Jahr 2050 in allen Szenarien völlig oder nahezu vollständig verzichtet. In den Szenarien, die ein Emissionsminderungsziel von 80% anstreben, verbleibt eine fossile Sockelproduktion von 50-90TWh/a, vorwiegend auf der Basis von Erdgas. In den Szenarien, die eine Minderung der Emissionen um 95% erreichen, wird auch Erdgas vollständig oder nahezu vollständig aus dem Strommix verdrängt.

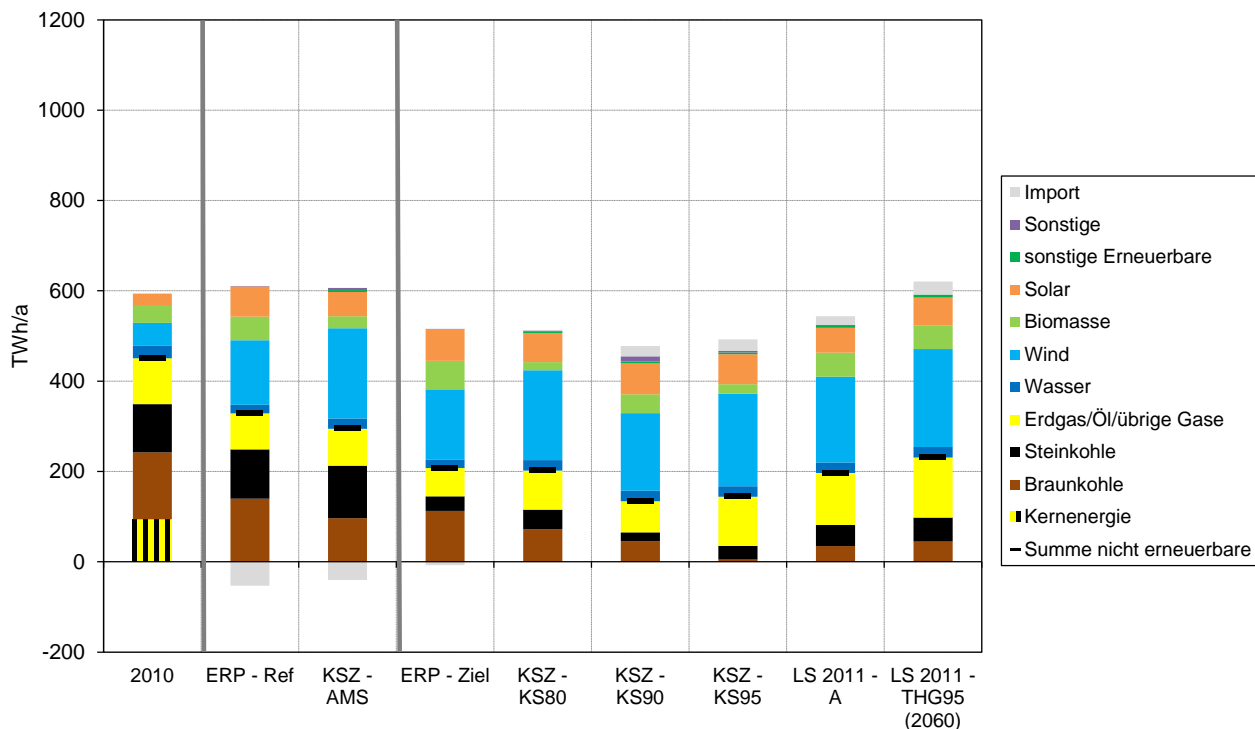
Den größten Beitrag zur Stromversorgung leistet im Jahr 2050 in allen Szenarien die Windenergie. Der Anteil der Windenergie an der gesamten Stromerzeugung steigt von 6% in 2010 auf 44% (Szenario „ERP-Ziel“) bis 74% (Szenario „KSZ-KS95“). Dies entspricht einer absoluten Stromerzeugung von 214 bis 570 TWh/a. Erzeugungsseitig steht an zweiter Stelle die Solarenergie, deren Anteil ebenfalls in allen Szenarien deutlich ausgebaut wird. Die Spannweite liegt hier bei 64 TWh/a (Szenario „LS 2011-A“) bis 123 TWh/a (Szenario „KSZ-KS95“).

²⁰ Im Szenario THGND wird der gesamte Strombedarf in 2050 auf ca. 3000TWh/a geschätzt.

Eine sehr unterschiedliche Rolle wird in den Szenarien den Stromimporten zugewiesen. In allen Studien wandelt sich die Rolle Deutschlands vom Nettoexporteur zum Nettoimporteur. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt führen deutliche Überkapazitäten im Bereich konventioneller Erzeugung zu einer positiven Exportbilanz. Mit einer Umstellung auf erneuerbare Stromquellen wandelt sich dieses Bild, und nationale Potenziale zur erneuerbaren Stromerzeugung konkurrieren mit erneuerbaren Potenzialen im europäischen Verbundsystem. Dies führt, im Kontext steigender Stromnachfragen durch die wachsende Bedeutung neuer Stromverbraucher, zu einer Zunahme der Stromimporte. Die Größenordnungen der Importe sind jedoch in den verschiedenen Szenarien sehr unterschiedlich. Im Szenario „ERP-Ziel“ ist die Importbilanz nahezu ausgeglichen. In den Szenarien „KSZ-KS80“ und „LS 2011-A“ liegen die Nettoimporte im Jahr 2050 bei ca. 60TWh/a. Im Szenario „LS 2011-THG95“ steigen sie deutlich auf 269TWh/a und decken somit 28% der Stromnachfrage.

Im Szenario „THGND“ werden Stromimporte nicht exakt ausgewiesen. In der Studie wird mittels einer Potenzialanalyse nachgewiesen, dass die technisch-ökologischen Potenziale erneuerbarer Energien groß genug sind, um den direkten Endenergiebedarf an Strom (466 TWh/a) durch nationale Erzeugung zu decken. Aus einer Analyse von Studien zum zukünftigen Ausbau der Grenzkuppelkapazitäten wird darüber hinaus abgeleitet, dass im Jahr 2050 Stromimporte von 137-150 TWh/a technisch möglich sein könnten.

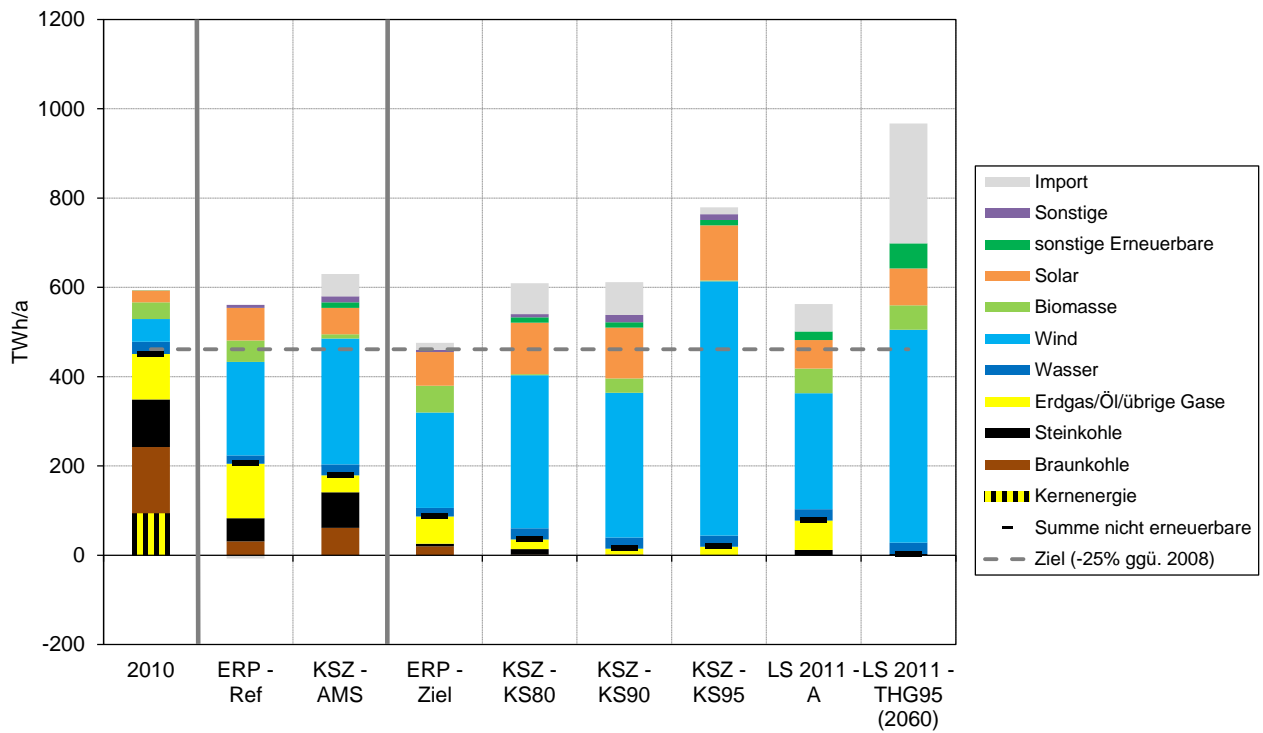
Abbildung 3-27: Stromerzeugung nach Energieträgern in 2010 und 2030



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-24 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

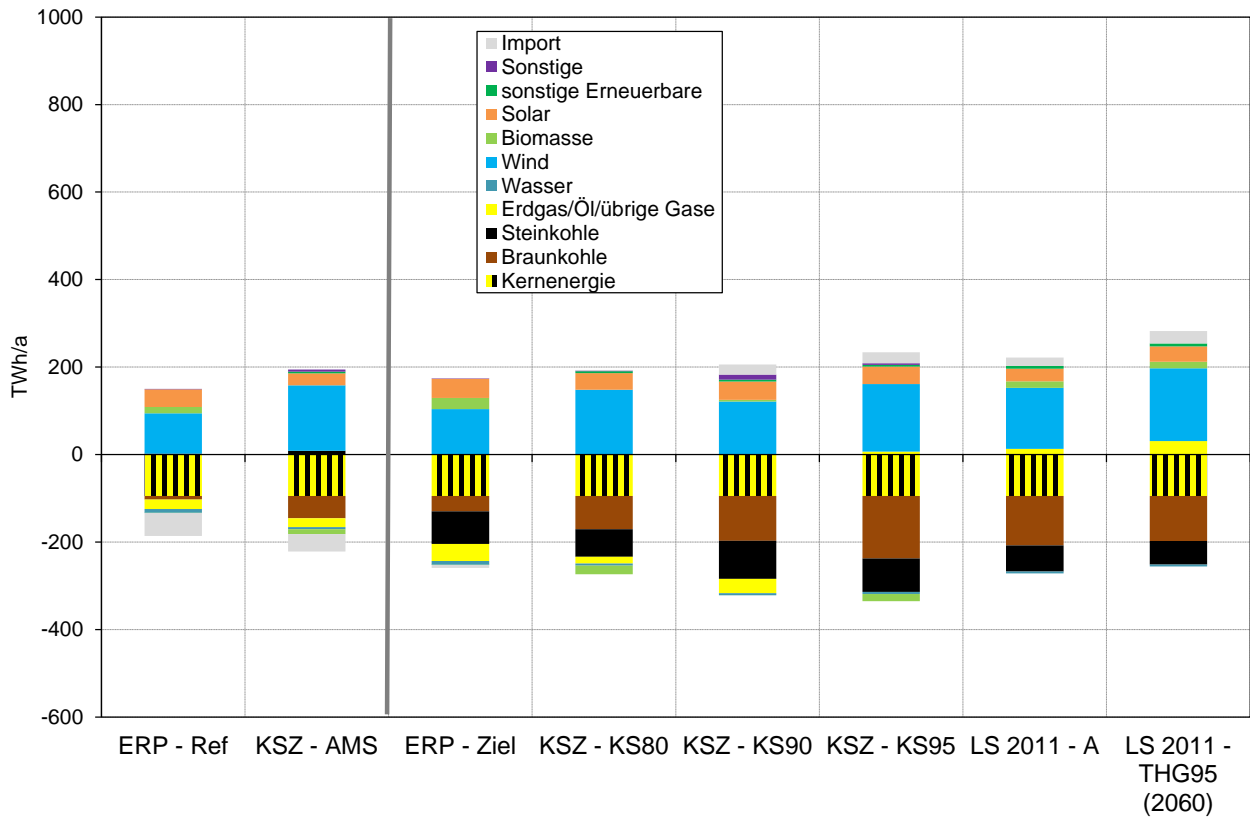
Abbildung 3-28: Stromerzeugung nach Energieträgern in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-25 des Datenanhangs zu finden.

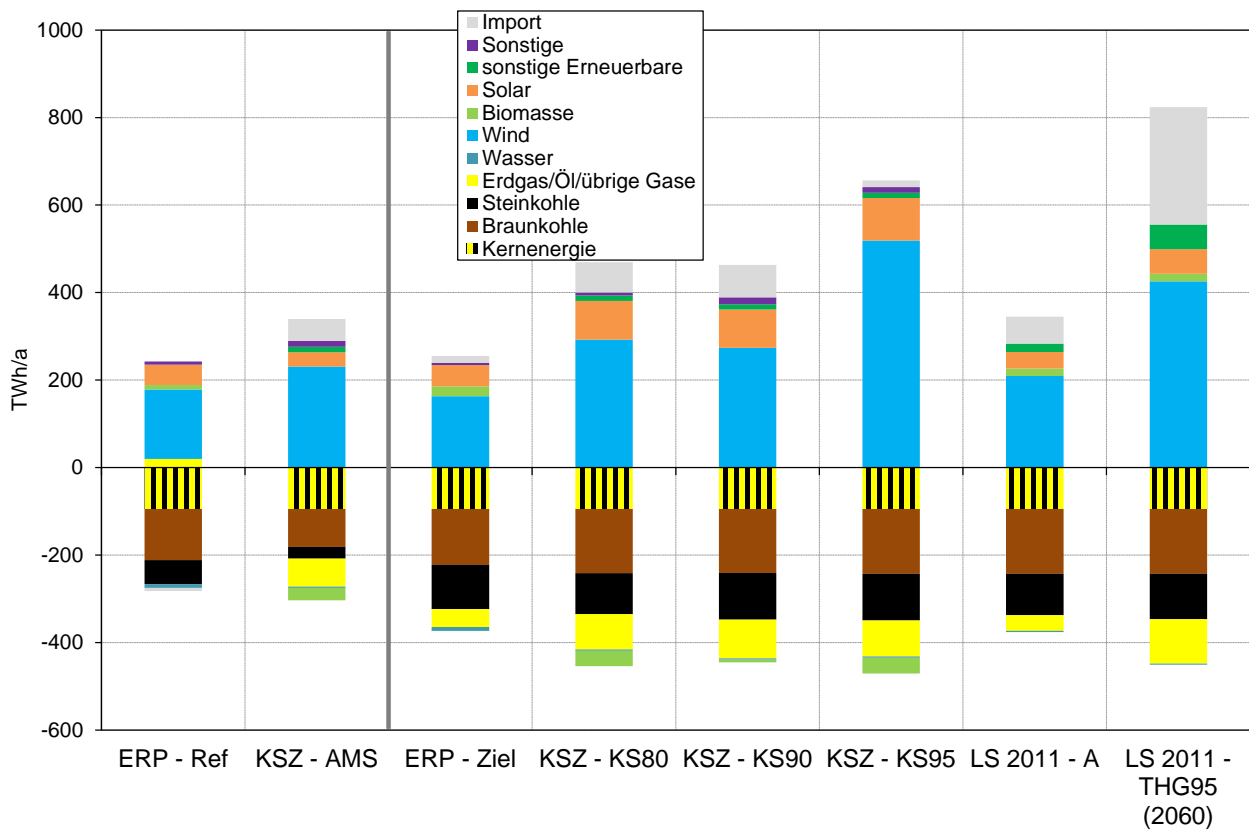
Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

Abbildung 3-29: Änderung der Stromerzeugung nach Energieträgern zwischen 2010 und 2030



Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

Abbildung 3-30: Änderung der Stromerzeugung nach Energieträgern zwischen 2010 und 2050 (2060 für LS 2011-THG95)



Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

3.6. Biomasse, CCS und strombasierte Energieträger

3.6.1. Biomasse

Abbildung 3-31 zeigt, in welchem Umfang im Jahr 2050 in den untersuchten Szenarien die energetische Nutzung von Biomasse stattfindet. In allen Szenarien (mit Ausnahme des Szenarios „THGND“) wird die Nutzung relativ zum Jahr 2010 ausgeweitet. Das Ausmaß des Zuwachses ist jedoch begrenzt.

Im Szenario „THGND“ wird die tatsächliche Nutzung von Biomasse nicht ausgewiesen. Aus Nachhaltigkeitserwägungen wird jedoch empfohlen, auf die Nutzung von Anbaubiomasse und auf dem Import von Biomasse zu verzichten. Das verfügbare Potenzial an einheimischen Abfall- und Reststoffen beschränkt sich somit auf 726 PJ/a.

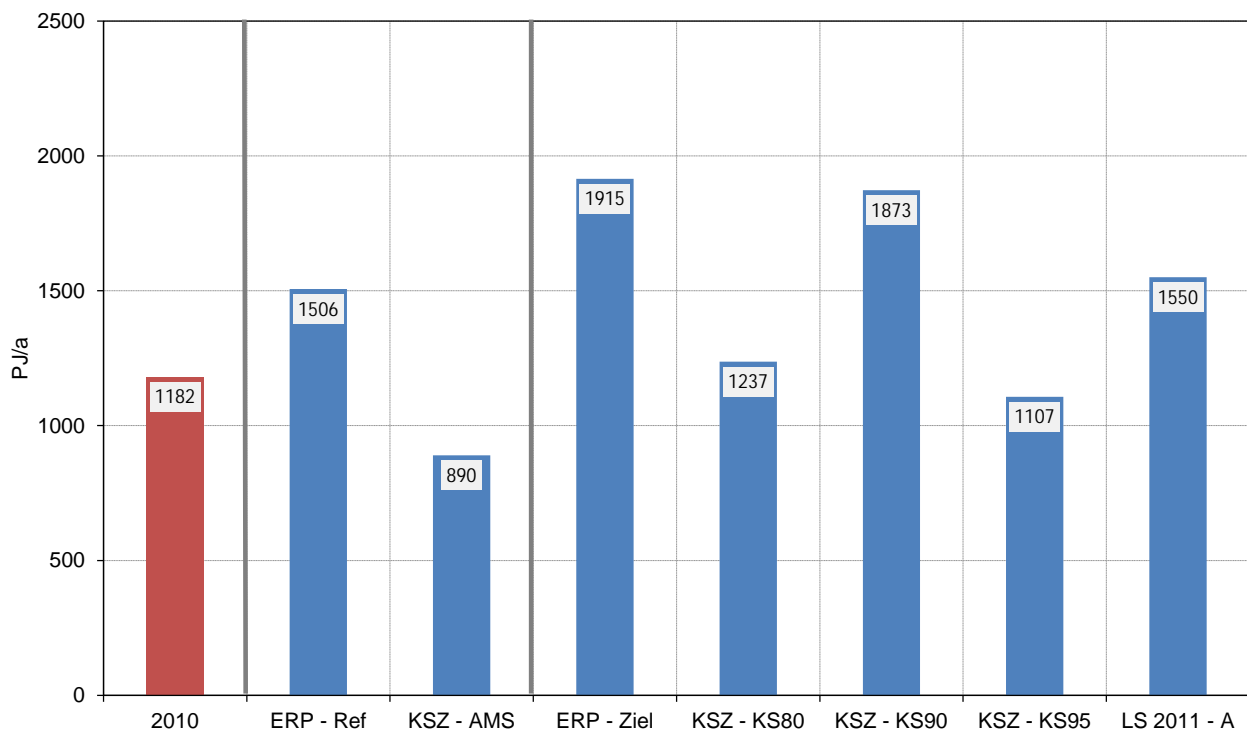
Auch in den Szenarien der „Leitstudie 2011“ (gezeigt ist hier Szenario „LS 2011-A“) wird aus Nachhaltigkeitsgründen auf den Import von Biomasse verzichtet. Zusätzlich zu einem Reststoffpotenzial von 800 PJ/a wird jedoch ein nachhaltig nutzbares Potenzial für Anbaubiomasse in Höhe von 750 PJ/a angenommen. Dies unterstellt (gegenüber 2010) eine Verdopplung der verfügbaren Anbaufläche auf ca. 4 Mio. ha in 2050.

In den Szenarien „KSZ80“ und „KSZ95“ wird die Ausweitung der verfügbaren Anbaufläche für energetische Biomassenutzung kritisch beurteilt. Hier liegt das insgesamt verfügbare Biomassepotenzial bei ca. 1200 PJ/a. Im KS 90 hingegen wurde noch von einem höheren global nachhaltig nutzbaren Biomassepotenzial ausgegangen.

Das größte verfügbare Potenzial wird im Szenario „ERP-Ziel“ angenommen. In der Studie werden keine Angaben zu den unterstellten Nachhaltigkeitskriterien gemacht. Anders als in den übrigen untersuchten Studien wird hier jedoch im Jahr 2050 ein Biomasseimport in Höhe von 215 PJ/a angenommen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Biomasse zwar auf Grund ihrer Treibhausgasneutralität und ihrer vielfältigen, sektorübergreifenden Einsetzbarkeit ihre Berechtigung in bestimmten Bereichen hat, eine Ausweitung der Nutzung über den aktuellen Stand hinaus jedoch auf Grund der Potenzialbeschränkungen (Flächenrestriktionen, Nachhaltigkeit) nur in sehr begrenztem Maße möglich ist.

Abbildung 3-31: Einsatz von Biomasse (Primärenergiegehalt) im Jahr 2010 und 2050.



Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); Eigene Berechnungen;

3.6.2. Carbon Capture and Storage (CCS)

Die Abscheidung und Speicherung von CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS) stellt zwar theoretisch eine Option zur Minderung der CO₂-Emissionen dar, spielt aber in keinem der untersuchten Szenarien eine wichtige Rolle. Auf den Einsatz von CCS als Minderungsoption wird entweder auf Grund der Unsicherheit bezüglich der langfristigen ökologischen Folgen und der hohen Kosten bewusst verzichtet („LS 2011“, „THGND“), oder der Einsatz wird auf Grund der

mangelnden Akzeptanz als nicht realistisch betrachtet („ERP-Ziel“). In der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ wird CCS eingesetzt, allerdings nur in den ambitionierten Szenarien KSZ-KS90 und KSZ-KS95. Im KSZ-KS90 bleibt der Einsatz auf die Vermeidung prozessbedingter Emissionen im Industriesektor sowie Biogas- und Bioethanolanlagen beschränkt. Wegen der Nutzungskonkurrenz von biogenem CO₂ für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe (Power-to-Liquid) findet im Szenario KSZ-KS95 kein CCS an Biomasseumwandlungsanlagen statt. Die realisierte Emissionsminderung liegen hier bei ca. 41 Mio. tCO₂-Äqu (KSZ-KS95) bzw. 66 Mio. tCO₂-Äqu (KSZ-KS90). Darüber hinaus wird auch in der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ mit Verweis auf die zahlreichen Alternativen im Bereich emissionsarmer Stromerzeugung auf den Einsatz von CCS verzichtet. Die Abscheidung von CO₂ und anschließende Verwendung in Prozessen (Carbon Capture and Usage, CCU) wird in keinem der untersuchten Szenarien diskutiert.

3.6.3. Einsatz strombasierter Endenergieträger

Die Nutzung von Elektrizität zur Erzeugung von Endenergieträgern spielt in den untersuchten Studien eine sehr unterschiedliche Rolle. Relevante Energieträger sind Wasserstoff, Methan und flüssige Kohlenwasserstoffverbindungen. Methan wird dabei in einem zusätzlichen Umwandlungsprozess („Methanisierung“) aus Wasserstoff erzeugt. Den zusätzlichen Umwandlungsverlusten steht der Vorteil gegenüber, dass Methan – im Gegensatz zu Wasserstoff – in unbegrenztem Umfang dem existierenden Erdgas-Leitungsnetz beigemischt werden kann. Methan kann neben der energetischen Nutzung auch zur Substituierung fossiler Kohlenstoffquellen in industriellen Prozessen verwendet werden. Flüssige Kohlenwasserstoffe können mittels verschiedener Syntheseprozesse generiert werden. Sie zeichnen sich gegenüber Wasserstoff und Methan durch eine sehr viel größere Energiedichte aus und kommen daher beispielsweise im Flugverkehr zum Einsatz. Viele Szenarien bilden nicht im Detail ab, in wie weit durch Elektrizität produzierte Energieträger aus dem Ausland importiert werden (sollen).

Neben der energetischen Nutzung strombasierter Energieträger entstehen auch indirekte Nutzeffekte: Die Produktionsprozesse können in den allermeisten Fällen als flexible Nachfrager die Flexibilität des Stromsystems erhöhen, und über den Weg der Rückverstromung können strombasierte Energieträger als langfristige Stromspeicheroptionen eingesetzt werden. Hierbei sind jedoch hohe Umwandlungsverluste in Kauf zu nehmen.

Für die Herstellung von synthetischen Methan wird CO₂ benötigt. Tendenziell sinkt die Verfügbarkeit von CO₂ in einer dekarbonisierten Volkswirtschaft. Wenn CO₂ bereits hochkonzentriert vorliegt, könnte es auch mit CCS vermieden werden.

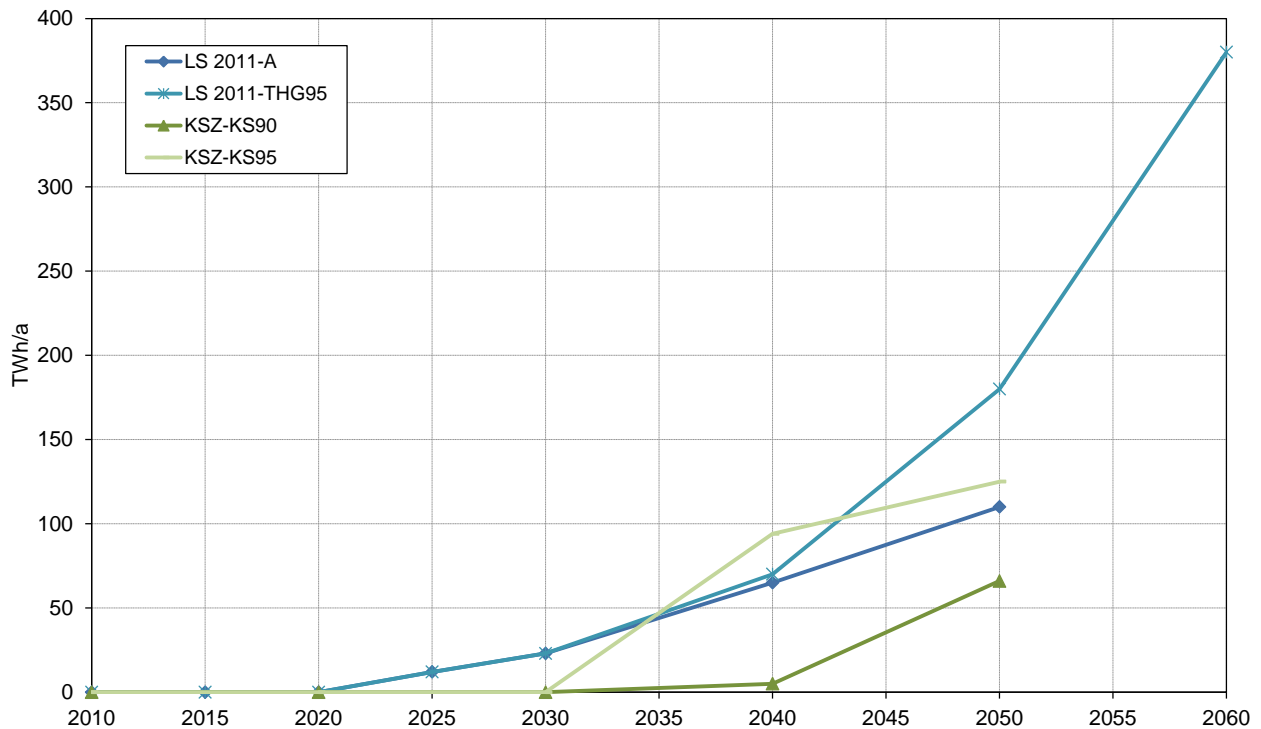
Abbildung 3-32 zeigt die Entwicklung der Strommengen, die für die Produktion von Wasserstoff, Methan und flüssigen Kohlenwasserstoffen in den verschiedenen Szenarien zum Einsatz kommen.

In den Szenarien, die eine Emissionsminderung von 80% anstreben, werden lediglich im Szenario „LS 2011-A“ in nennenswerten Größenordnungen strombasierte Energieträger verwendet. Sie kommen dort hauptsächlich als Kraftstoffe im Verkehrssektor zum Einsatz. In den Szenarien „ERP-Ziel“ und „KSZ-KS80“ wird stattdessen eine raschere Entwicklung der Elektromobilität unterstellt, so dass Elektrizität direkt als Energieträger im Verkehrssektor eingesetzt werden kann. Im Szenario „ERP-Ziel“ wird ein (sehr geringer) Wasserstoff-Endenergieverbrauch von 22 PJ/a angenommen. Die für die Produktion veranschlagte Strommenge wird nicht ausgewiesen.

In den Szenarien, in denen eine Emissionsminderung von 95% erreicht wird, spielen strombasierte Kraftstoffe eine wesentliche größere Rolle. Das Ausmaß, in dem die Option gezogen wird, ist dabei in den drei Szenarien („KSZ-KS95“, „LS 2011-THG95“ und „THGND“) sehr unterschiedlich.

Im Szenario THGND wird der Stromverbrauch für die Erzeugung von Methan und anderen Endenergieträgern im Jahr auf ca. 2500 TWh/a geschätzt.

Abbildung 3-32: Stromverbrauch für die Erzeugung von Wasserstoff, Methan und flüssigen Energieträgern bis 2060²¹



Der Datensatz zur Abbildung ist in Tabelle 8-26 des Datenanhangs zu finden.

Quelle: Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015); DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Eigene Berechnungen

²¹ Im Szenario THGND wird der Stromverbrauch für die Erzeugung von Methan und anderen Endenergieträgern im Jahr auf ca. 2500 TWh/a geschätzt. In den Szenarien KSZ-AMS und KSZ-KS80 werden keine strombasierten Endenergieträger eingesetzt.

5. Anschlussfähigkeit der Szenarien mit Blick auf internationale Studien

Studienauswahl

In diesem Abschnitt sollen die nationalen Studien in einen Bezug zu übergreifenden internationalen Studien und den dort berechneten Szenarien gesetzt werden. Zunächst werden dafür die Szenarienergebnisse für Deutschland aus internationalen Studien mit den im vorangehenden Kapitel untersuchten nationalen Studien verglichen. Für diesen Vergleich wurden folgende Studien ausgewählt:

- „EU ENERGY, TRANSPORT AND GHG EMISSIONS TRENDS TO 2050 – REFERENCE SCENARIO 2013“ (*PRIMES2013*). Technische Universität Athen im Auftrag der Europäischen Kommission (Europäische Kommission 2014)
- Potential-Studie Fraunhofer ISI²² für die Europäische Union und ihre Mitgliedstaaten bis 2035. Im Auftrag von DG ENER (Fraunhofer ISI et al. 2014)
- „World Energy Outlook 2014“ der IEA (IEA 2014).

Im Anschluss daran werden einige zentrale Trends und Strategien aus internationalen Szenarien denen aus nationalen Szenarien gegenübergestellt. Für diesen Vergleich wird neben dem IEA 450-Szenario auch auf die IPCC-Szenarien (IPCC 2014) zurückgegriffen.

Szenariendefinition

Das PRIMES Referenzszenario 2013 (*PRIMES2013*) berücksichtigt alle (bindenden) EU-Ziele bezüglich erneuerbarer Energien, Treibhausgasemissionen und Energieeffizienz. Es bildet die markt- und technologiegetriebenen ökonomische Entscheidungen im Rahmen von nationalen und EU-Politiken ab, die bis zum Frühjahr 2012 eingeführt wurden.

Aus der Studie des Fraunhofer ISI werden die Szenarien „*Base_InclEA*“ und „*Potential_2030_HPI*“ ausgewählt, die wie folgt definiert sind:

- „Baseline incl. Early Action“ (*Base_InclEA*): Beinhaltet Maßnahmen bis einschließlich 2013 und ist mit den PRIMES2013-Projektionen vergleichbar.
- „Potential 2030 (high policy intensity)“ (*Potential_2030_HPI*): Zeigt die (ökonomischen) Potentiale bis 2030 mit niedrigen sektorspezifischen Diskontraten (von 2% bei Haushaltsgeräten bis 15% für Heizungssysteme in der Industrie) und nur kleinen oder keinen Hemmnissen.

Die Rahmendaten für diese Szenarien sind identisch mit den im PRIMES-Referenzszenario angenommenen.

Die genannten Szenarien beinhalten jeweils Projektionen für Deutschland sowie für die Europäische Union (EU28). Für letztere werden weiterhin die Szenarien des World Energy Outlook der IEA aus dem Jahr 2014 einbezogen:

- *New-Policies-Scenario*: Berücksichtigt Politiken und Maßnahmen die Energiewirtschaft betreffend, die bis Mitte 2014 eingeführt wurden, und solche, für die Vorschläge bestehen, auch wenn konkrete Ausgestaltungen noch ausstehen. Dies umfasst vor allem Politiken, die zum Ziel haben, den Ausbau von erneuerbaren Energien und die Steigerung von Energieeffizienz zu fördern und THG-Emissionen zu mindern.

²² Im Folgenden auch bezeichnet als „FhG“.

- *Current-Policies-Scenario*: Berücksichtigt hingegen nur Politiken, die bis Mitte 2014 offiziell eingeführt wurden.
- *450-Szenario (450)*: Orientiert sich an dem Ziel, den Anstieg der langfristigen globalen Durchschnittstemperatur auf 2°C bzw. die Konzentration von Treibhausgasen auf 450ppm im Jahr 2100 zu limitieren. Es werden Politiken angenommen, die eine mit diesem Ziel konsistente Minderung der THG-Emissionen ermöglichen.

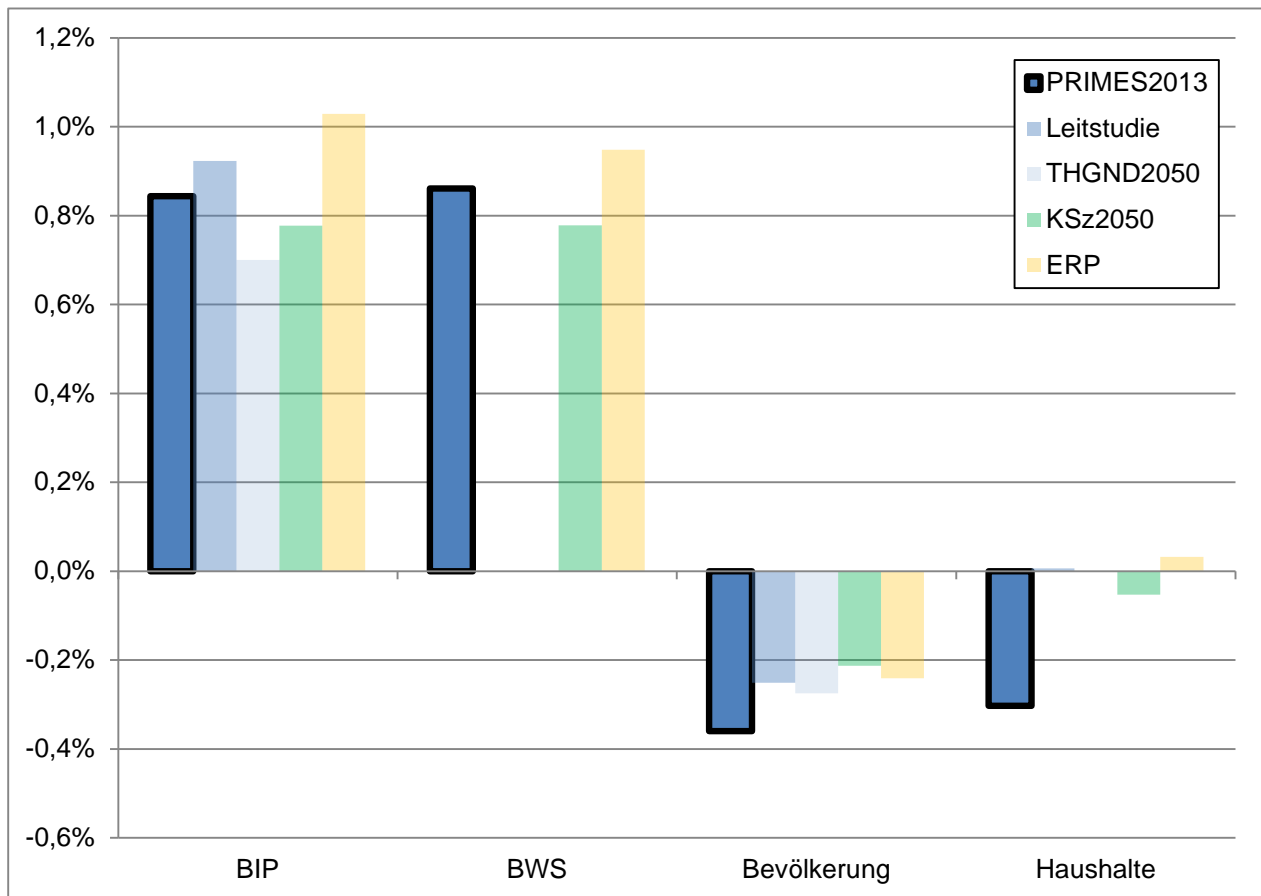
5.1. Szenarien für Deutschland aus internationalen Studien

5.1.1. Rahmendaten für Deutschland

Für einen Vergleich mit nationalen Szenarien werden die Projektionen aus PRIMES 2013 und der Fraunhofer Studie betrachtet. Abbildung 5-1 zeigt die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten (CAGR) für in diesem Modell verwendete Rahmendaten.

Bezüglich des Bruttoinlandsprodukts (BIP) zeigt sich, dass das PRIMES-Referenzszenario wie alle anderen betrachteten Studien ein stetiges Wirtschaftswachstum annimmt. Hierbei liegt es bei der Höhe der Wachstumsrate mit jährlich 0,84% für den Zeitraum 2010 bis 2050 etwa zwischen dem Szenario THGND (0,7% pro Jahr) und dem Szenario ERP-Ziel (1,0% pro Jahr). Gleiches gilt für die Entwicklung der Bruttowertschöpfung, wobei diese nur für die Klimaschutzszenarien 2050 und ERP angegeben werden. Bei der Bevölkerungsentwicklung bis 2050 wird im PRIMES-Szenario jedoch ein weitaus stärkerer Rückgang auf etwa 71 Millionen Einwohner angenommen (0,36% pro Jahr) während die anderen Studien von einem Bevölkerungsrückgang von ca. 0,2% pro Jahr ausgehen. Auch die Anzahl der Haushalte wird bei PRIMES, anders als in den anderen Szenarien, mit -0,3% pro Jahr als stark sinkend angenommen. Die Rahmendaten der FhG-Szenarien sind identisch mit denen aus PRIMES.

Abbildung 5-1: Rahmendaten des Referenzszenarios 2013 (PRIMES) für Deutschland im Vergleich (CAGR von Basisjahr bis 2050)



PRIMES: 2010; Leitstudie: 2010; THGND2050: 2010; KSz2050: 2010 bzw. 2008; ERP: 2011

Quelle: Europäische Kommission (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2014), Prognos EWI, GWS (2014); DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012)

Tabelle 5-1: Rahmendaten der Szenarien für Deutschland im Vergleich

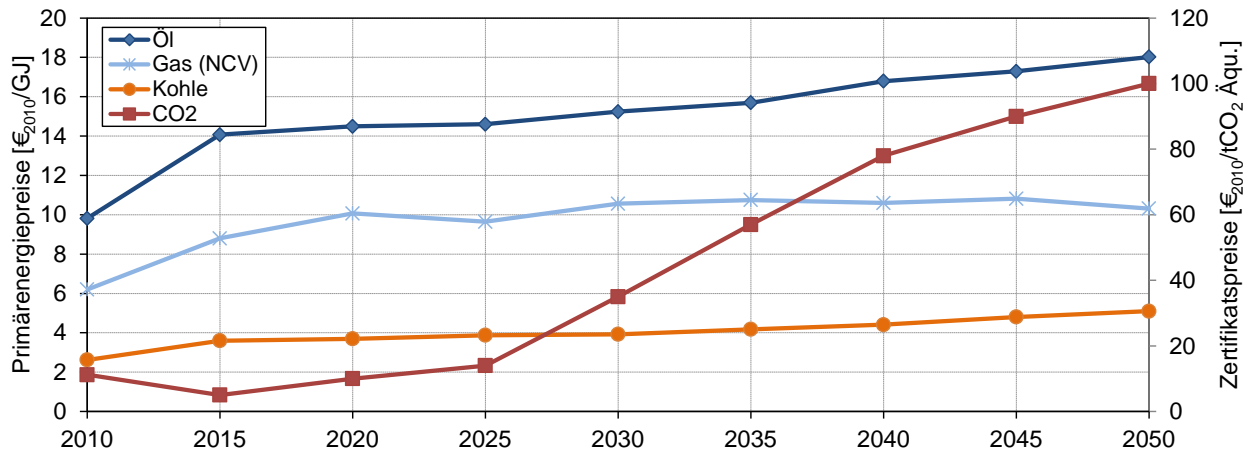
	BIP [Mrd. € ₂₀₁₀]		BWS [Mrd. € ₂₀₁₀]		Bevölkerung [Mio.]		Haushalte [Mio.]	
	Basisjahr *	2050	Basisjahr *	2050	Basisjahr *	2050	Basisjahr *	2050
PRIMES2013/ FhG-Studie	2477	3466	2056	2898	81,8	70,8	38,9	34,5
Leitstudie	2552	3685	-	-	81,6	73,8	39,9	40,0
THGND2050	-	3299	-	-	80,6	72,2	-	-
KSz2050	2496	3402	2235	3047	80,6	74,0	39,48	38,6
ERP	2651	3951	2398	3465	80,2	73,0	39,7	40,2

*PRIMES: 2010; Leitstudie: 2010; THGND2050: 2010; KSz2050: 2010 bzw. 2008; ERP: 2011

Quelle: Europäische Kommission (2014); Fraunhofer ISI (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2014), Prognos EWI, GWS (2014); DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012)

Die angenommene Entwicklung der Preise für Primärenergieträger und CO₂-Zertifikate für das Szenario PRIMES2013 zeigt Abbildung 5-2. Diese Preise gelten gleichermaßen für die Szenarien Base_InclEA und Potential2030_HPI.

Abbildung 5-2: Preise für Primärenergieträger und CO₂-Preise für PRIMES und FhG-Szenarien



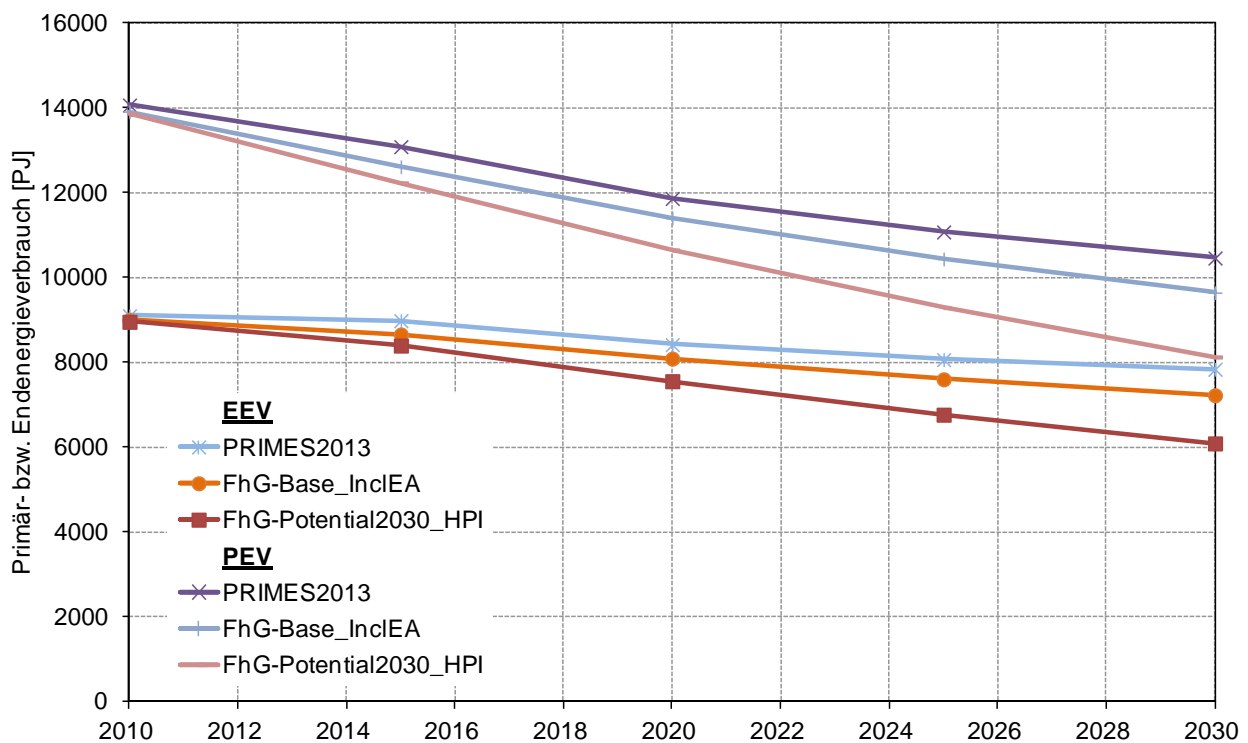
Quelle: Europäische Kommission (2014)

Die hier angenommenen jährlichen Wachstumsraten bis 2050 liegen mit 1,5%/a für Öl, 1,3%/a für Gas und 1,7%/a für Kohle etwa im Bereich des „mäßigen“ Preispfades der Leitstudie 2011. Der Preis für CO₂-Zertifikate wächst bis 2050 mit 5,6%/a auf bis zu 100 €/tCO₂ und liegt damit zwischen dem des Preispfades „deutlich“ der Leitstudie 2011 und dem des Szenarios KS80 der Klimaszenarien 2050.

5.1.2. Primär- und Endenergiebedarf Deutschland

Abbildung 5-3 zeigt die im PRIMES2013 Referenzszenario und in den Szenarien Base_InclEA und Potential2030_HPI projizierten Primär- und Endenergiebedarfe für Deutschland. Für das Szenario Base_InclEA der Fraunhofer Potentialstudie ergeben sich die Werte für den Primärenergieverbrauch aus den Faktoren, die im Szenario PRIMES2013 errechnet wurden. Im Szenario Potential_2030_HPI wird hingegen auf Ebene der EU27 eine Erreichung des 2030-Ziels mit einem Anteil der erneuerbaren Energien von 27% am Endenergieverbrauch unterstellt.

Abbildung 5-3: Primär- und Endenergiebedarf für Deutschland bis 2030



Quelle: Europäische Kommission (2014); Fraunhofer ISI (2014)

In allen Szenarien sinkt der Primärverbrauch bis 2030 stark ab. Diese Entwicklung ist vor allem bedingt durch den sinkenden Endenergieverbrauch im Zuge steigender Energieeffizienz und die Zunahme von erneuerbaren Energien im Primärenergiemix. Letzteres zeigt sich auch im veränderten Verhältnis von Primär- zu Endenergie, da erneuerbare Energien mit einem angenommenen Wirkungsgrad von 100% in die Primärenergiebilanz eingehen. Dieser Faktor sinkt so von 1,55 im Jahr 2010 auf 1,34 für 2030, während der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch im Szenario PRIMES2013 von 11% auf 23% ansteigt.

Der Endenergieverbrauch im Szenario PRIMES2013 sinkt von 2010 bis 2030 um insgesamt 14% (1262PJ) auf 7838 PJ. Hieran hat die Senkung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor mit 440 PJ den größten Anteil (siehe Tabelle 5-2). In den Szenarien Base_InclEA und Potential_2030_HPI sinkt der Endenergieverbrauch im betrachteten Zeitraum um 20% bzw. 32%. In beiden spielt jedoch, anders als im Szenario PRIMES2013, der Sektor private Haushalte die größte Rolle und trägt mit 719 bzw. 1029 PJ zur Senkung bei. Dieser Unterschied ist vor allem auf die in den Szenarien der Fraunhofer Potentialstudie zusätzlich berücksichtigten Politiken und im

Falle des Szenario Potential_2030_HPI auf die niedrigeren Diskontraten und geringen Hemmnisse zurückzuführen.

Tabelle 5-2: Sektoraler Endenergiebedarf für PRIMES2013 und FhG 2014

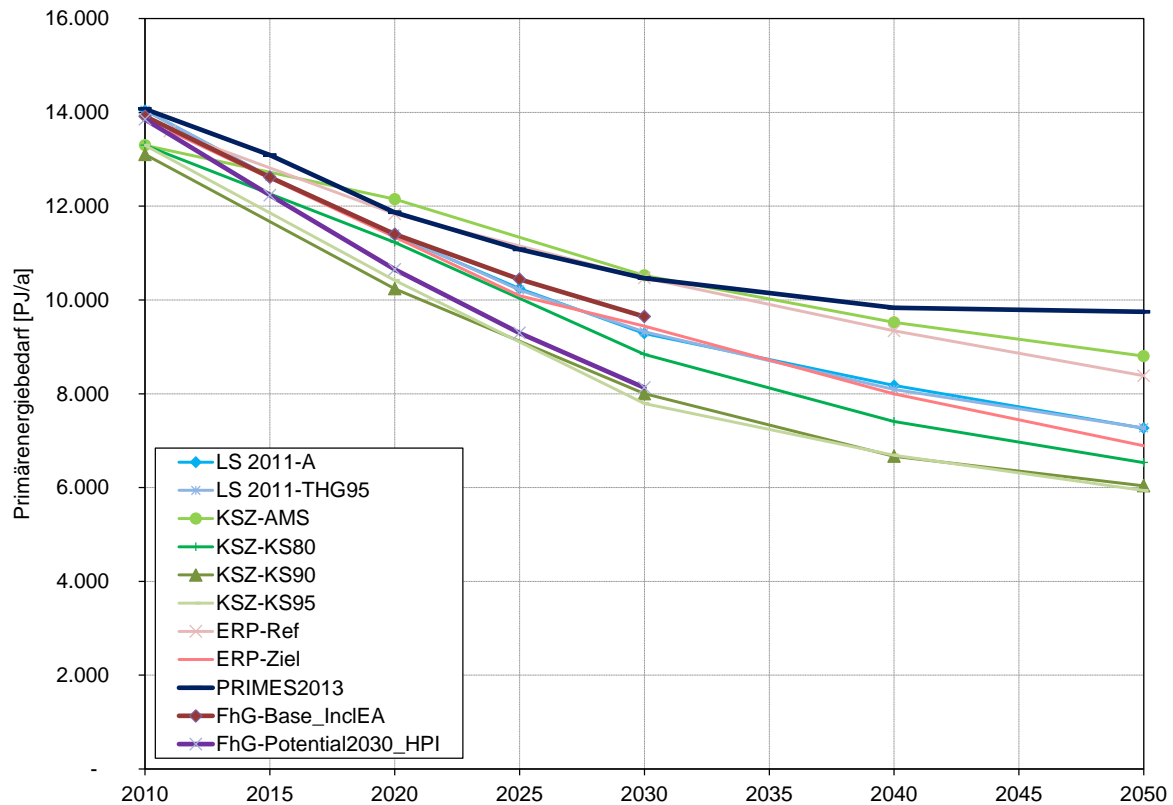
	<i>Primes Referenzszenario 2013</i>				<i>Fraunhofer Studie 2014</i>				
					<i>Base_InclEA</i>			<i>Potential2030_HPI</i>	
[PJ]	2010	2020	2030	2050	2010	2020	2030	2020	2030
PHH	2598	2380	2318	2379	2841	2462	2103	2237	1644
GHD	1377	1158	1053	956	1219	1112	1009	1016	785
Industrie	2535	2498	2316	2058	2364	2213	1998	2095	1723
Verkehr	2591	2384	2151	2015	2585	2310	2122	2181	1900

Quelle: Europäische Kommission (2014); Fraunhofer ISI (2014)

Abbildung 5-4 zeigt die projizierten Primärenergiebedarfe aus PRIMES und den FhG-Szenarien im Vergleich zu ausgewählten Szenarien aus den betrachteten nationalen Studien.

Der Primärenergiebedarf geht dabei in allen betrachteten Szenarien zurück, wobei PRIMES die obere und das Szenario KS95 die untere Grenze der Projektionen bildet. Im Vergleich zu den anderen Referenzszenarien ERP-Ref und KSZ-AMS liegt PRIMES bis 2040 auf ähnlichem Niveau, weicht aber für 2050 deutlich nach oben ab. Das FhG-Szenario Base_InclEA liegt in seinem Projektionshorizont mit Primärenergiebedarf von 9646 PJ im Jahr 2030 nahe an dem des Szenarios ERP-Ziel und des Szenarios A der Leitstudie 2011 (9444 bzw 9287 PJ). Das ambitioniertere FhG-Szenario Potential2030_HPI liegt mit einem projizierten Primärenergiebedarf von 8130 PJ für das Jahr 2030 etwa im gleichen Bereich des Szenarios KS95 der Klimaschutzszenarien (7792 PJ), wobei der Wert im Basisjahr 2010 für letzteres mit 13103 PJ niedriger liegt, so dass die Reduktion des Primärenergiebedarf im FhG-Szenario im gleichen Zeitraum deutlicher ausfällt. Diese Differenz des Primärenergieverbrauchs im Basisjahr der Szenarien der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ zu den Übrigen ist unter anderem auf die nicht einbezogenen Hochseebunkerungen der internationalen Seeschifffahrt beim Primärenergieverbrauch zurückzuführen (siehe Kapitel 3.3).

Abbildung 5-4: Primärenergiebedarfe für Deutschland von PRIMES und Fraunhofer-Szenarien im Vergleich mit nationalen Studien

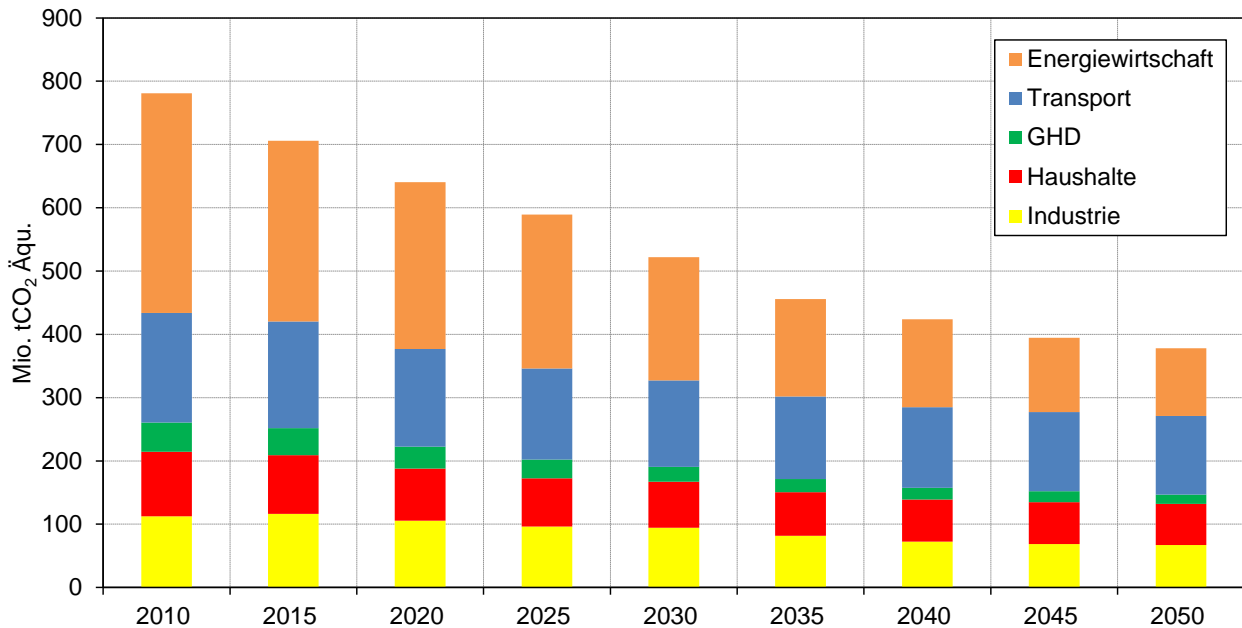


Quelle: Europäische Kommission (2014); Fraunhofer ISI (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2014), Prognos EWI, GWS (2014); DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012)

5.1.3. Treibhausgas-Emissionen für Deutschland

Abbildung 5-5 zeigt die Entwicklung der energiebedingten CO₂-Emissionen des Szenarios PRIMES2013. Diese sinken im Zeitraum von 2010 bis 2050 um 52%. Am stärksten werden dabei die aus der Energiewirtschaft stammenden CO₂-Emissionen reduziert (-70%). Diese Entwicklung ist vor allem auf die sinkende CO₂-Intensität thermischer Kraftwerke (-65%) und den Anstieg der erneuerbaren Energien zurückzuführen.

Insgesamt erfolgt im Szenario PRIMES2013 eine Senkung der CO₂-Emissionen für Deutschland bis 2050 auf 37 Prozent des Niveaus von 1990. Gleiches gilt für das Fraunhofer-Szenario Base_InclEA. Im Szenario Potential2030_HPI wird auf Ebene der EU28 eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 49,3% gegenüber 1990 bis zum Jahr 2030 angenommen. Auf nationaler Ebene werden in den FhG-Szenarien jedoch keine Aussagen gemacht.

Abbildung 5-5: Energiebedingte CO₂-Emissionen PRIMES2013 für Deutschland

Quelle: PRIMES: 2010

Innerhalb des PRIMES2013-Szenarios werden die gesetzten Ziele bezüglich der Reduktion von THG-Emissionen sowohl auf europäischer als auch nationaler Ebene nicht erreicht (siehe Tabelle 5-3). Da PRIMES auf nationaler Ebene nur Emissionen von CO₂ angibt und nicht die für Nicht-CO₂-Treibhausgase, kann hierbei davon ausgegangen werden, dass die Abweichung vom Ziel für Deutschland noch größer ist als in Tabelle 5-3 angegeben. In den IEA-Szenarien wird nur im 450-Szenario, das von einer Einhaltung des 2°C-Ziels ausgeht, das 2030-Ziel mit einer Minderung der CO₂-Emissionen um 50% auf EU-Ebene sicher erreicht. Mit einer Minderung der CO₂-Emissionen von 33% bzw. 23% ist in den Szenarien New Policies bzw. Current Policies nicht von einer Zielerreichung auszugehen. Für den Zeithorizont über 2040 hinaus machen die IEA-Szenarien keine Aussage.

Dieses Bild zeigt sich jedoch nicht in den betrachteten nationalen Studien. Diese projizieren entweder eine nur knappe Verfehlung (ERP-Ziel) oder aber eine Übererfüllung der im Energiekonzept gesetzten Ziele. Die hierzu einfließenden Annahmen werden in Kapitel 3.2 näher betrachtet.

Tabelle 5-3: Reduktion der THG- bzw. CO₂-Emissionen ggü. 1990 im Vergleich

	2030	2050	Ziel 2030	Ziel 2050
PRIMES2013 / FhG-Studie	EU: -32%*	EU: -44%*	-40%	-80% bis -95%
PRIMES2013 / FhG-Studie	DE: -46%*	DE: -63%*		
LS 2011 - A	DE: -63%	DE: -82%		
LS 2011 - THG95	DE: -64%	DE: -87%		
KSZ – KS80	DE: -58%	DE: -84%	-55%	-80% bis -95%
KSZ – KS95	DE: -69%	DE: -95%		
ERP- Ziel	DE: -56%*	DE: -77%*		

* PRIMES: nur CO₂-Emissionen, d.h. ohne nicht-CO₂-Emissionen; ERP-Ziel: inkl. nicht-energiebedingte Emissionen aus KS80

Quelle: Europäische Kommission (2014); Fraunhofer ISI (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2014), Prognos EWI, GWS (2014); DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012)

5.2. Vergleich internationaler Trends mit zentralen nationalen Strategien

In der nachfolgenden Tabelle 5-4 werden einige zentrale Trends und Strategien aus internationalen Studien für EU-28 bzw. weltweit den entsprechenden Strategien für Deutschland aus nationalen Szenarien gegenübergestellt. Dieser Vergleich erfolgt abhängig von der Datenverfügbarkeit teils quantitativ und teils qualitativ.

Tabelle 5-4: Bedeutung verschiedener Vermeidungsstrategien in internationalen und deutschen Zielszenarien

Faktor	Nationale Studien (DE)	IEA – 450 (EU28)	IPCC (Global)
CCS / BECCS	nur in den Szenarien KSZ-KS90 und KSZ-KS95 relevant	80% der Stromproduktion aus Kohle weltweit mit CCS (3685 TWh)	Anteil des „Low Carbon Electricity Supply“ (bestehend aus erneuerbaren Energien, CCS und BECCS sowie Kernenergie) steigt bis auf 80% im Jahr 2050.
Anteil Erneuerbarer an PEV bzw. Stromerzeugung	40% (ERP-Ziel) bis 60% (KSZ-KS95) des PEV	36% des PEV	Keine fossile Stromerzeugung ohne CCS mehr im Jahr 2100.
- PV	14% (Leitstudie A) bis 17% (ERP-Ziel)	7% der Stromerzeugung	
- Wind	30% (ERP-Ziel) bis 62% (KSZ-KS95)	27% der Stromerzeugung	
- Biomasse	1,5% (KSZ-KS95) bis 12% (ERP-Ziel)	9% der Stromerzeugung	
Verkehr	Reduktion des EEV des Verkehrs um zwischen 30%	mit -2% p.a. mit Abstand wichtigster Sektor bei der	„key sector“ (neben Industrie und

	(Leitstudie 2011) und 64% (KSz2050) ggü. 2005	Reduktion des EEV (Gebäuden) (Reduktion um insgesamt 36% bis 2040 ggü. 2012)	
- Int. Flugverkehr	Mit hohen Wachstumsraten in den meisten Szenarien weiter steigende CO ₂ -Emissionen	nicht explizit diskutiert	nicht explizit diskutiert
- Elektromobilität	Mit einem Anteil des Strom am EEV des Verkehrs 2050 zwischen 15% (ERP-Ziel) und 47% (KSZ-KS80) stark unterschiedliche Rollen	mit einem Anteil von 14% am EEV des Verkehrs im Jahr 2040 nach Fossil- und Biokraftstoffen eher kleinere Rolle	
Preise (CAGR 2020–2040)			nicht explizit diskutiert
- Zertifikate	Stark unterschiedliche Bedeutung von Emissionsbepreisung mit 3%/a (Leitstudie C) – 9,8%/a (ERP-Ziel)	Wichtige Rolle mit Emissionsbepreisung in allen OECD-Ländern und relativ starke Verteuerung mit 10,2% p.a.	
- Energieträger	Öl: 0,8 – 2,3%/a Erdgas: 0,3 – 2,1%/a Kohle: 0,8 – 2,0%/a	Öl: -0,2%/a Erdgas: -0,7%/a Kohle: -0,7%/a	
Bevölkerungswachstum	-0,19 bis -0,26% p.a.	moderates Wachstum mit 0,1% p.a.	Neben wirtschaftlichem Wachstum Haupttreiber
Emissionen			
- pro Kopf (2040)	2,7 tCO ₂ (KSZ-KS95) bis 5,2 tCO ₂ (KSZ-KS80) pro Einwohner	2,7 tCO ₂ pro Einwohner	-
- kumuliert	14 - 22 Gt bis 2040 (1,4 – 2,2% des globalen Budgets)	65 Gt bis 2040 (6,5% des globalen Budgets)	Budget von 1000 Gt von 2014 bis 2100 ²³
Quelle: IEA (2014); IPCC (2014), Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2014), Prognos EWU, GWS (2014); DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012)			

Daraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- CCS/BECCS²⁴: Tendenziell wird die Bedeutung von CCS und BECCS bei der Stromerzeugung in internationalen Studien deutlich größer eingeschätzt als in nationalen Szenarien.

²³ zur Einhaltung des 2°C-Ziels mit einer Wahrscheinlichkeit von 50%.

²⁴ Bioenergy with carbon dioxide capture and storage

- **Stromerzeugung:** In nationalen Szenarien werden deutlich höhere Anteile erneuerbarer Energien an der gesamten Stromerzeugung als auf internationaler Ebene angenommen.
- **Verkehr:** In allen Szenarien ist dies ein zentraler Sektor für die angenommene Reduktion des Endenergieverbrauchs. Elektromobilität spielt auf der Ebene der EU im Vergleich zu einem Teil der nationalen Szenarien eine eher untergeordnete Rolle.
- **Die Preisentwicklungen für Emissionszertifikate** werden in den nationalen Szenarien mit unterschiedlicher Bedeutung belegt. Auf europäischer und globaler Ebene spielt eine Erhöhung der CO₂-Preise eine wichtige Rolle, für die auch eine Ausweitung der Emissionsbepreisung auf alle OECD-Länder angenommen wird. Steigende Primärenergiepreise spielen nur auf nationaler Ebene eine Rolle, während in den internationalen Studien sogar sinkende Preise angenommen werden, die sich durch eine stark zurückgehende Nachfrage nach fossilen Energieträgern ergeben.
- **Bevölkerungsentwicklung:** Das Bevölkerungswachstum wird auf globaler Ebene neben dem Wirtschaftswachstum als Haupttreiber steigender THG-Emissionen identifiziert. Auf EU-Ebene wird noch mit einem moderaten Bevölkerungswachstum gerechnet, während für Deutschland in den nationalen Studien durchweg ein mehr oder weniger starker Rückgang angenommen wird.
- **Emissionen:** Die Pro-Kopf-Emissionen im Jahr 2040 werden von nationalen Szenarien stark unterschiedlich projiziert. Die untere Grenze dieser Projektionen deckt sich mit denen IEA-450 Szenarios auf europäischer Ebene. Das vom IPCC geschätzte Budget der kumulierten Emissionen von 1000 Gt weltweit bis 2100 wird bis zum Jahr 2040 nach Einschätzungen nationaler Szenarien bereits zu 1,4 – 2,2% und auf europäischer Ebene schon zu 6,5% ausgeschöpft sein.

6. Robuste Kernaussagen und Leitstrategien

6.1. Rahmendaten

Der Transformationsprozess des Energiesystems wird sich laut der betrachteten Szenarien vor dem Hintergrund einer weiterhin stetig wachsenden Wirtschaft und einer deutlich schrumpfenden und alternden Bevölkerung vollziehen. Von diesen Rahmenbedingungen abweichende Entwicklungen, z.B. gegenüber historischen Daten ein deutlich gebremstes Wirtschaftswachstum, sind zwar durchaus denkbar, wurden jedoch in keinem der betrachteten Szenarien untersucht.

Hinsichtlich der langfristigen Entwicklung der Brennstoffmärkte gehen die Annahmen in den verschiedenen Szenarien weit auseinander, was die großen Unsicherheiten in diesem Bereich widerspiegelt. Auch die Preisentwicklung im Europäischen Emissionshandelssystem wird sehr unterschiedlich bewertet.

6.2. Treibhausgasminderung

Die Frage, ob bis zum Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um 80% oder um 95% reduziert werden sollen, ist von entscheidender Bedeutung – und zwar nicht nur langfristig, sondern auch für die Definition angemessener Zwischenziele. Eine Minderung um 95% ist ungleich ambitionierter und stellt eine wesentlich größere Herausforderung dar. Die Maßnahmen, die in den Szenarien zusätzlich ergriffen werden, sind technisch anspruchsvoller, kostenintensiver und können nur über lange Zeiträume hinweg realisiert werden – so kann im Szenario LS2011-THG95 das Minderungsziel erst im Jahr 2060 erreicht werden.

Die Emissionstrajektorien in den untersuchten Szenarien verlaufen nicht linear, sondern die Minderungsrate nimmt über die Zeit ab – dies weist darauf hin, dass in der Regel diejenigen Minderungsoptionen zuerst umgesetzt werden, die am leichtesten umzusetzen sind, und die Vermeidung von Emissionen im Zeitverlauf schwieriger wird und langsamer vonstattengeht. Ambitionierte Zwischenziele sind daher von großer Bedeutung. Die aktuell geltenden Zwischenziele zur Minderung der Treibhausgasemissionen für die Jahre 2030 und 2040 sind gut geeignet, um im Jahr 2050 eine Minderung von 80-85% zu erreichen. Wenn das ambitioniertere Ziel einer 95% Minderung erreicht werden soll, muss bereits in den Jahren 2030 bis 2040 deutlich stärker reduziert werden als die Zwischenziele dies vorgeben. Ein ambitionierter Klimaschutzplan sollte daher anspruchsvollere Zwischenziele enthalten, die das Erreichen von langfristigen Reduktionen über das Ziel einer 80% Minderung hinaus möglich machen (vgl. Abschnitt 3.2).

Die Bedeutung der nicht energiebedingten Emissionen wird zunehmen. Die Minderung von Emissionen in diesem Bereich, besonders im Landwirtschaftssektor, ist äußerst schwierig. In den untersuchten Szenarien, die eine Minderung der Emissionen um 95% anstreben, werden energiebedingte Emissionen nahezu vollständig auf null reduziert. Der allergrößte Teil der verbleibenden Emissionsquellen liegt dann im nicht energetischen Bereich.

6.3. Primär- und Endenergieverbrauch

Eine Emissionsminderung um 80% bedeutet einen vollständigen oder nahezu vollständigen Ausstieg aus der Nutzung von Braun- und Steinkohle. Als fossile Energieträger verbleiben nur Mineralöl (als Kraftstoff im Verkehrssektor und zur stofflichen Nutzung in Industrieprozessen) sowie Erdgas. Eine Emissionsminderung um 95% bedeutet eine nahezu vollständige (oder, wie im Szenario „THGND“ beschrieben, eine vollständige) Dekarbonisierung des Energiesektors und damit den nahezu vollständigen Verzicht auf die Nutzung fossiler Energieträger. Diese Entwicklung wird kompensiert durch einen erheblichen Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien.

Die Energiesparpotenziale sind in allen Verbrauchssektoren erheblich. In allen untersuchten Szenarien können sowohl Primär- als auch Endenergiebedarf in allen Verbrauchssektoren stark gesenkt werden. Dieser Effekt trägt wesentlich zum Erreichen der Klimaschutzziele bei.

6.4. Stromerzeugung

In keinem der Szenarien – mit Ausnahme des wenig ambitionierten Szenarios „ERP-Ziel“ – wird das Ziel einer Minderung des Strombedarfs um 25% bis zum Jahr 2050 eingehalten. Zwar gibt es im Bereich der „klassischen“ Stromverbraucher zahlreiche Einsparpotenziale, aber die wachsende Bedeutung „neuer“ Stromverbraucher (Wärmepumpen, Elektromobilität, Erzeugung strombasierter Energieträger) führt dazu, dass tendenziell umso mehr Strom produziert wird, je ambitionierter das Klimaschutzziel ist. Zwar wird die Bedeutung der „neuen“ Stromverbraucher in den verschiedenen Szenarien unterschiedlich eingeschätzt, aber in der Gesamtschau scheint das Einhalten eines Minderungszieles für den gesamten Stromverbrauch problematisch zu sein. Stattdessen könnte bezüglich der Verbrauchsziele eine Differenzierung zwischen „klassischen“ und „neuen“ Stromverbrauchern in Erwägung gezogen werden.

Windenergie wird den größten Produktionsbeitrag in einem erneuerbaren Stromsystem leisten, gefolgt von Photovoltaik.

In allen untersuchten Szenarien wird Deutschland im Jahr 2050 mehr Strom importieren als exportieren. Die Menge des importierten Stroms variiert allerdings je nach Szenario erheblich.

6.5. Biomasse, CCS, strombasierte Energieträger

In allen untersuchten Szenarien (mit Ausnahme des Szenarios „ERP-Ziel“) wird auf die Nutzung importierter Biomasse verzichtet, und an die Nutzung heimischer Biomasse werden eine Reihe von Nachhaltigkeitsanforderungen gestellt. Insbesondere in den Szenarien neueren Datums („Klimaschutzszenario 2050, 2. Runde“ und „Treibhausgasneutrales Deutschland“) führen verschärfte Nachhaltigkeitskriterien oder ein vollständiger Verzicht auf die Nutzung von Anbaubiomasse (THGND) dazu, dass Biomasse auf Grund von Potenzialbeschränkungen nicht wesentlich über den heutigen Stand hinaus energetisch genutzt werden kann.

Die Abscheidung und Speicherung von CO₂ (CCS) wird nur in der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ als Option genutzt. Dort ist der Einsatz von CCS auf die Vermeidung von prozessbedingten Emissionen im Industriesektor (Szenarien „KSZ-KS90“ und „KSZ-KS95“) sowie Biogas- und Bioethanolanlagen (Szenario „KSZ-KS90“) beschränkt. Darüber hinaus wird in allen Szenarien auf den großtechnischen Einsatz von CCS verzichtet. Als Gründe werden mangelnde Akzeptanz, hohe Kosten und Unsicherheit bezüglich langfristiger ökologischer Effekte genannt.

Wenn bis zum Jahr 2050 nur eine Emissionsminderung um 80% erreicht werden soll, ist der Einsatz strombasierter Energieträger (Wasserstoff, Methan oder flüssige Kohlenwasserstoffe) nicht unbedingt erforderlich. Bei einer Emissionsminderung um 95% kann auf diese Option jedoch, vor allem im Verkehrssektor, nicht vollständig verzichtet werden. Der Umfang, in dem strombasierte Energieträger zum Einsatz kommen, variiert erheblich. Wenn strombasierte Energieträger eine wichtige Rolle spielen sollen (wie in den Szenarien „LS 2011-THG95“ oder „THGND“), steigt der Strombedarf so stark an, dass entweder Strom oder strombasierte Energieträger direkt importiert werden

6.6. Vereinbarkeit mit internationalen Klimaschutzstrategien

Nach Schätzungen des IPCC gilt es die kumulierten weltweiten CO₂-Emissionen bis 2100 auf etwa 1000 Gt zu limitieren, um das 2°C-Ziel mit 50%iger Wahrscheinlichkeit einhalten zu können. Dieses Budget ist auf internationaler Ebene im New-Policies-Szenario der IEA bereits im Jahr 2040 aufgebraucht. In nationalen Szenarien werden bis 2040 bereits zu 1,4 – 2,2% und im 450-Szenario auf europäischer Ebene zu 6,5% ausgeschöpft sein.

Im 450-Szenario der IEA sind die Entwicklungen bezüglich des Energiebedarfs und der damit verbundenen Trajektorie der THG-Emissionen konsistent mit einer Stabilisierung der Konzentration auf 450 ppm und der Einhaltung des internationalen Ziels den Temperatur-Anstieg auf 2°C gegenüber vorindustriellem Niveau zu begrenzen. Um auf diesem Pfad zu liegen, wird im 450-Szenario eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 50% (etwa 2 Gt) gegenüber 1990 im Jahr 2030 auf Ebene der EU28 angenommen. Diese Reduktion wird sowohl durch das nationale Ziel für 2030 (-55% bzw. 688 MtCO₂äq) als auch die projizierten Emissionsminderungen der nationalen Szenarien soweit erfüllt.

Die Strategien des IPCC und des 450-Szenarios der IEA weichen dabei jedoch in einigen Punkten wesentlich von denen ab, die auf nationaler Ebene verfolgt werden. So soll der Weg zu einem „Low Carbon Electricity Supply“ von 80% im Jahr 2050 (IPCC 2014) durch erneuerbare Energien, CCS und BECCS sowie Kernenergie geebnet werden, wobei 2040 im 450-Szenario 80% der Stromproduktion aus Kohle weltweit mit CCS ausgestattet sein sollen und in der Strategie des IPCC im Jahr 2100 überhaupt keine fossile Stromerzeugung ohne CCS mehr betrieben wird. Weiterhin wächst im 450-Szenario die Strommenge aus Kernenergie von 2012 bis 2040 auf EU-

Ebene mit durchschnittlich 0,2% pro Jahr auf einen Anteil von 26% an der Stromerzeugung. In nationalen Szenarien liegt der Fokus jedoch neben dem kompletten Ausstieg aus der Kernenergie vor allem auf dem Ausbau der erneuerbaren Energien und nur zu einem sehr geringen Teil auf CCS oder BECCS.

7. Fazit

Die in dieser Analyse untersuchten Szenarien machen deutlich, dass die nahezu vollständige Vermeidung der Emission von Treibhausgasen bis zum Jahr 2050 eine große Herausforderung für Deutschland darstellt und mit einem umfassenden Strukturwandel einhergeht. Die Studien zeigen aber auch, dass die langfristigen energie- und klimapolitischen Ziele der Bundesregierung erreicht werden können. Dies erfordert wesentliche Effizienzverbesserung in allen Sektoren, die nahezu vollständige Dekarbonisierung des Energiesystems und einen starken Rückgang der nicht energiebedingten Emissionen. Aufgabe der Politik wird sein, geeignete Rahmenbedingungen für diese Entwicklungen zu schaffen.

Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen (2011), Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2010, AG Energiebilanzen: Berlin.
- AG Energiebilanzen (2012), Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2011, AG Energiebilanzen: Berlin.
- AG Energiebilanzen (2013), Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2012, AG Energiebilanzen: Berlin.
- AG Energiebilanzen (2014), Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2013, AG Energiebilanzen: Berlin.
- AG Energiebilanzen (2014a), Auswertungstabellen (Stand: 15.09.2014) zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2013, AG Energiebilanzen: Berlin.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2011) Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, BMU: Berlin.
- DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012), Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, im Auftrag des BMU.
- Europäische Kommission (2015), Recommended parameters for reporting GHG projects in 2015, Europäische Kommission: Brüssel.
- Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien, Erneuerbare Energien Gesetz – EEG 2014.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Technische Universität Athen, EU Energy, Transport and GHG Emissions: Trends to 2050: Reference Scenario 2013, (PRIMES2013). im Auftrag der Europäischen Kommission.
- Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2014), Klimaschutzszenario 2050 – 1. Modellierungsrunde, im Auftrag des BMUB.
- Öko-Institut und Fraunhofer ISI (in Bearbeitung), Klimaschutzszenario 2050 – 2. Modellierungsrunde, im Auftrag des BMUB (Der 2. Endbericht findet sich derzeit in der Abstimmung mit dem Auftraggeber und wird voraussichtlich im Sommer 2015 veröffentlicht.)
- (Fraunhofer ISI et al. 2014), Potential-Studie Fraunhofer ISI für die Europäische Union und ihre Mitgliedstaaten bis 2035. Im Auftrag von DG ENER
- Prognos, EWI, GWS (2014), Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, im Auftrag des BMWi.
- Prognos, Öko-Institut (2009), Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Hg. v. WWF: Basel, Berlin.
- Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (2011), Herausforderungen des demographischen Wandels. Expertise im Auftrag der Bundesregierung. Hg. v. Statistisches Bundesamt Wiesbaden.
- Umweltbundesamt (2013) – Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, Umweltbundesamt: Dessau.
- Umweltbundesamt (2013a), Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2013. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2011. Umweltbundesamt: Dessau.
- Umweltbundesamt (2015), Emissionen von direkten und indirekten Treibhausgasen und von Schwefeldioxid, Umweltbundesamt: Dessau.
- International Energy Agency (2014), World Energy Outlook, IEA: Paris.

8. Datenanhang

8.1. Rahmendaten und Annahmen

Tabelle 8-1: Rahmendaten: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten (CAGR) bis 2050

	BIP	BIP/Kopf	Bevölkerung	Beschäftigung	Wohnfläche	Wohnfläche/ Kopf
	%					
LS 2011	0,92	1,18	-0,25	-0,43	0,08	0,34
THGND	0,70	0,95	-0,31		0,04	0,34
KSZ 1. Runde	0,78	0,99	-0,21	-0,04	0,27	0,49
KSZ 2. Runde	0,83	1,15	-0,31	-0,22	0,33	0,64
ERP	1,03	1,27	-0,24	-0,22	0,18	0,42

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-2: Entwicklung des BIP bis 2060

	2010 *)	2020	2030	2040	2050	2060
	Mrd. € ₂₀₁₀					
LS 2011	2.552	2.844	3.071	3.347	3.685	3.932
THGND					3.299	
KSZ 1. Runde	2.477	2.772	3.003	3.220	3.449	
KSZ 2. Runde	2.496	2.752	3.009	3.209	3.402	
ERP	2.651	2.906	3.277	3.614	3.951	

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-3: Bevölkerungsentwicklung bis 2060

	2010 *)	2020	2030	2040	2050	2060
	Mio. Personen					
LS 2011	81,6	80,5	79,9	79,1	73,8	72
THGND					72,2	
KSZ 1. Runde	81,0	80,6	79,0	76,0	71,8	
KSZ 2. Runde	81,0	79,0	78,0	76,0	74,0	
ERP	80,2	79,4	78,2	76,1	73,0	80,2

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-4: Entwicklung der Wohnfläche bis 2060

	2010 *)	2020	2030	2040	2050	2060
	Mio. m ²					
LS 2011	3.480	3.640	3.700	3.680	3.650	3.550
THGND					3.530	
KSZ 1. Runde	3.338	3.541	3.685	3.827	3.806	
KSZ 2. Runde	3.316	3.491	3.614	3.733	3.701	
ERP	3.720	3.872	3.931	3.983	4.033	

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-5: Entwicklung der Wohnfläche pro Kopf bis 2060

	2010 *)	2020	2030	2040	2050	2060
	m ² /Person					
LS 2011	42,6	45,2	46,5	48,4	48,8	49,1
THGND					48,9	
KSZ 1. Runde	41,0	44,0	47,0	50,0	53,0	
KSZ 2. Runde	41,1	44,3	46,5	49	50,0	
ERP	46,4	48,8	50,9	53	54,6	

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-6: Entwicklung der Beschäftigung bis 2060

	2010	2020	2030	2040	2050	2060
	Mio. Personen					
LS 2011	39	39	36	34	33	32
KSZ 1. Runde	35	32	32	35	35	
KSZ 2. Runde	41	40	39	38	37	
ERP	41	40	38	37	36	

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-7: Preisentwicklung für Rohöl

	2010 *)	2020	2030	2040	2050
	€ ₂₀₁₀ /GJ				
LS 2011 – Preispfad A	10,6	14,3	17,4	20,9	24,3
LS 2011 – Preispfad B	10,6	12,8	14,7	16,6	18,2
LS 2011 – Preispfad C	10,6	11,7	12,8	14,1	15,1
KSZ 1. Runde		17,6	20,3	22,1	23,8
KSZ 2. Runde		14,4	18,8	23,4	28,6
ERP	13,9	16,3	18,2	19,5	20,8
EC Guidance		13,7	14,4		

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); EK (2015); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-8: Preisentwicklung für Erdgas

	2010 *)	2020	2030	2040	2050
	€ ₂₀₁₀ /GJ				
LS 2011 – Preispfad A	5,9	8,2	10,6	12,8	15,1
LS 2011 – Preispfad B	5,9	7,1	8,4	9,7	10,7
LS 2011 – Preispfad C	5,9	6,2	6,7	7,4	8,2
KSZ 1. Runde		10,1	11,4	12,3	13,2
KSZ 2. Runde		8,3	9,8	11,8	14,4
ERP	6,3	8,2	8,4	9	9
EC Guidance		9,5	10,0		

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); EK (2015); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-9: Preisentwicklung für Steinkohle

	2010 *)	2020	2030	2040	2050
	$\text{€}_{2010}/\text{GJ}$				
LS 2011 – Preispfad A	2,9	5,0	6,4	7,8	9,0
LS 2011 – Preispfad B	2,9	4,0	5,0	5,8	6,5
LS 2011 – Preispfad C	2,9	3,4	3,8	4,3	4,8
KSZ 1. Runde		3,6	3,8	4,0	4,3
KSZ 2. Runde		3,0	3,4	3,9	4,7
ERP	3,6	3,6	3,9	4,3	4,6
EC Guidance		3,4	3,6		

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); EK (2015); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-10: Preisentwicklung für Emissionszertifikate

	2010 *)	2020	2030	2040	2050
	$\text{€}_{2010}/\text{CO}_2$ Äquivalent				
LS 2011 – Preispfad A	14,5	27,3	45,5	60,7	75,8
LS 2011 – Preispfad B	14,5	23,3	34,4	45,5	57,6
LS 2011 – Preispfad C	14,5	20,2	26,3	36,4	45,5
KSZ – AMS	15,0	14,0	30,0	40,0	50,0
KSZ – KS80	15,0	23,0	50,0	90,0	130,0
KSZ – KS90/95	15,0	30,0	87,0	143,0	200,0
ERP – Ref	10,8	9,8	39,2	63,7	74,4
ERP – Ziel	12,7	9,8	39,2	63,7	74,4
EC Guidance		10,0	35,0		

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); EK (2015); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

8.2. Entwicklung der Treibhausgasminde²⁵

Tabelle 8-11: Zeitlicher Verlauf der gesamten THG-Emissionen

	2010	2020	2030	2040	2050	2060
	Mio. t CO ₂ -Äquivalent					
LS2011 – A	977	682	507	376	265	
LS2011 – THG95	977	679	496	335	201	118
THGND					60	
KSZ – AMS	986	877	776	678	568	
KSZ – KS80	986	774	576	393	249	
KSZ – KS90	986	706	466	273	130	
KSZ – KS95	988	692	408	208	59	
ERP – Ref *)	959	839	768	654	546	
ERP – Ziel *)	959	753	596	443	328	

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

*) ERP-Ref: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-AMS. ERP-Ziel: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-KS80. LS2011-A und LS2011-THG95: Inklusive intern. Luft- und Seeverkehr gem. KSZ-KS80.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

²⁵ In den Szenarien der Studie ERP werden nicht-energiebedingte Emissionen nicht berücksichtigt.

Tabelle 8-12: Sektorale Aufteilung der verbleibenden THG-Emissionen in 2030

	1990	ERP – Ref*)	ERP – Ziel*)	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95
Mio. t CO ₂ -Äquivalent							
Energiewirtschaft	428	274	194	272	171	120	102
Industrie	177	98	89	96	71	80	57
GHD	89	21	17	29	25	21	16
Haushalte	132	55	41	61	53	38	35
Verkehr	165	116	93	114	96	81	89
Industrieprozesse	94			59	48	39	39
Landwirtschaft	88			69	61	56	53
LULUCF	-36			14	-1	-22	-30
Abfallwirtschaft	43			7	5	5	5
Sonstige	35			8	8	8	5
Intern. Luft und Seeverkehr	20			47	41	39	36
Nicht energiebedingte Emissionen *)		204	162				
Energiebedingte Emissionen	990	564	434	573	415	341	299
Summe	1.214	768	595	776	577	466	408

*) ERP-Ref: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-AMS. ERP-Ziel: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-KS80.

Quelle: UBA (2013a); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-13: Sektorale Aufteilung der verbleibenden THG-Emissionen in 2050

	1990	ERP – Ref *)	ERP – Ziel *)	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	THGND
Mio. t CO ₂ -Äquivalent								
Energiewirtschaft	428	134	74	170	33	5	19	0
Industrie	177	80	64	75	31	27	-4	0
GHD	89	12	7	10	5	4	1	0
Haushalte	132	32	13	23	16	15	5	0
Verkehr	165	87	38	90	32	24	3	0
Industrieprozesse	94			55	36	4	5	14
Landwirtschaft & LULUCF	88			68	51	38	36	43
	-36			15	1	-15	-23	
Abfallwirtschaft	43			5	4	4	4	3
Sonstige	35			4	4	4	2	0
Intern. Luft- und Seeverkehr	20			52	36	21	12	
Nicht energiebedingte Emissionen *)		200	132					
Energiebedingte Emissionen	990	345	196	368	117	75	24	0
Summe	1.214	545	328	567	249	130	59	60

*) ERP-Ref: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-AMS. ERP-Ziel: Inklusive nicht energiebedingter Emissionen, LULUCF und intern. Luft- und Seeverkehr gemäß KSZ-KS80.

Quelle: UBA (2013a); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

8.3. Entwicklung des Primärenergiebedarfs

Tabelle 8-14: Entwicklung des gesamten Primärenergiebedarfs 2010 bis 2060

	2010 *)	2020	2030	2040	2050	2060
	PJ/a					
LS2011 – A	14.044	11.383	9.287	8.176	7.267	
LS2011 – THG95	14.044	11.404	9.319	8.091	7.271	7.025
KSZ – AMS	13.298	12.149	10.523	9.521	8.802	
KSZ – KS80	13.298	11.228	8.840	7.408	6.534	
KSZ – KS90	13.103	10.240	8.002	6.668	6.038	
KSZ – KS95	13.298	10.418	7.792	6.689	5.936	
ERP – Ref	13.601	11.834	10.468	9.342	8.385	
ERP – Ziel	13.601	11.340	9.444	7.998	6.891	

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-15: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in 2010 und 2030

	2010	ERP – Ref	ERP – Ziel	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	LS 2011 – A	LS 2011 – THG95
	PJ/a								
Kernenergie	1.533	0	0	0	0	0	0	0	0
Braunkohle	1.516	1.261	1013	999	705	447	77	323	415
Steinkohle	1.773	1.326	711	1.603	852	636	686	612	663
Mineralöl	3.746	3.225	2.750	2.642	2.116	1.840	1.897	2.704	2.277
Erdgas	3.128	2.158	1.926	2.408	2.145	2.039	1.840	2.679	2.791
Müll und sonstige nicht erneuerbare	231	166	153	280	220	231	216		
Biomasse	1.182	1.482	1.692	1.262	1.242	1.601	1.331		
Wasserkraft	75	67	67	85	85	85	85		
Windkraft	136	516	558	721	719	621	740		
Photovoltaik	42	242	251	324	407	300	456		
Sonstige Erneuerbare	0	210	494	355	350	203	388	2.969	3.174
Nettoimporte Strom	-64	-191	-25	-155	0	0	77	0	0
sonstige	0	6	5	0	0	0	0		
Summe	13.298	10.468	9.595	10.523	8.840	8.002	7.792	9.287	9.320

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-16: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011 – THG95)

	2010	ERP – Ref	ERP – Ziel	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	LS 2011 – A	LS 2011 – THG95
	PJ/a								
Kernenergie	1.533	0	0	0	0	0	0	0	0
Braunkohle	1.516	917	166	582	36	19	9	0	0
Steinkohle	1.773	752	345	1.083	407	240	153	166	26
Mineralöl	3.746	2.296	1.360	1.973	636	562	151	1.740	824
Erdgas	3.128	2.026	1.311	1.355	821	600	286	1.520	345
Müll und sonstige nicht erneuerbare	231	152	130	285	153	231	140		
Biomasse	1.182	1.506	1.915	890	1.237	1.873	1.107		
Wasserkraft	75	94	67	90	90	91	90		
Windkraft	136	751	769	1.017	1.239	1.170	2.058		
Photovoltaik	42	263	271	361	732	701	790		
Sonstige Erneuerbare	0	299	494	1.000	947	551	980	3.840	5.829
Nettoimporte Strom	-64	-28	57	165,4	238	0	29	0	0
sonstige	0	7	6	0	0	0	143		
Summe	13.298	9.035	6.891	8.801	6.534	6.038	5.936	7.266	7.024

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-17: Entwicklung der Energieintensität der Wirtschaftsleistung (Primärenergieverbrauch pro BIP) bis 2060

	2010 *)	2020	2030	2040	2050	2060
	MJ/€ ₂₀₁₀					
LS2011 – A	5,50	4,00	3,02	2,44	1,97	
LS2011 – THG95	5,50	4,01	3,03	2,42	1,97	1,79
KSZ – AMS	5,33	4,41	3,50	2,97	2,59	
KSZ – KS80	5,33	4,08	2,94	2,31	1,92	
KSZ – KS90	5,29	3,69	2,66	2,07	1,75	
KSZ – KS95	5,33	3,79	2,59	2,08	1,74	
ERP – Ref	5,13	4,07	3,19	2,58	2,12	
ERP – Ziel	5,13	3,90	2,88	2,21	1,74	

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

8.4. Entwicklung des Endenergiebedarfs

Tabelle 8-18: Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs bis 2060

	2010 *)	2020	2030	2040	2050	2060
	PJ/a					
LS2011 – A	9.060	7.991	6.820	5.992	5.236	
LS2011 – THG95	9.060	7.947	6.708	5.857	5.173	4.734
THGND					4.764	
KSZ – AMS	9.317	8.561	7.845	7.277	6.872	
KSZ – KS80	9.317	8.141	7.019	6.072	5.427	
KSZ – KS90	9.481	8.156	7.133	6.329	5.398	
KSZ – KS95	9.317	7.785	6.245	5.031	4.359	
ERP – Ref	8.881	8.178	7.455	6.855	6.394	
ERP – Ziel	8.881	7.949	6.917	6.049	5.345	

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-19: Endenergiebedarf nach Sektoren in 2010 und 2030

	2010	ERP – Ref	ERP – Ziel	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	LS 2011 – A	LS 2011 – THG95
	PJ/a								
Private Haushalte	2.645	1.891	1.822	2.028	1.842	1.577	1.590	1.959	1.951
GHD	1.423	981	920	1.183	1.046	854	876	920	928
Industrie	2.535	2.364	2.158	2.200	2.022	2.638	1.840	1.968	1.983
Verkehr	2.266	2.219	2.017	1.801	1.553	1.512	1.447	1.973	1.846
Summe	8.868	7.455	6.917	7.212	6.463	6.581	5.754	6.820	4.764

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-20: Endenergiebedarf nach Sektoren in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011 – THG95)

	2010	ERP – Ref	ERP – Ziel	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	LS 2011 – A	LS 2011 – THG95	THGND
	PJ/a									
Private Haushalte	2.645	1.471	1.319	1.565	1.325	1.147	1.121	1.364	1.258	537
GHD	1.423	865	752	1.007	771	541	618	655	620	617
Industrie	2.535	2.155	1.727	2.068	1.756	2.140	1.441	1.696	1.639	1.363
Verkehr	2.266	1.904	1.547	1.529	1.016	1.023	809	1.521	1.217	2.248
Summe	8.868	6.395	5.345	6.168	4.867	4.851	3.988	5.236	4.734	4.764

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); UBA (2013); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-21: Endenergiebedarf in 2010 und 2030 nach Energieträgern

	2010	ERP – Ref	ERP – Ziel	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	LS 2011 – A	LS 2011 – THG95
	PJ/a								
Braunkohle	74	45	32	31	13	15	10	0	0
Steinkohle	354	317	235	263	276	273	249	175	175
Mineralölprodukte	3.091	2.272	1.801	2.018	1.581	1.230	1.406	1.703	1.293
Gase (fossil)	2.153	1.633	1.487	1.686	1.432	1.448	825	1.445	1.415
Müll und sonstige	29	92	79	43	32	56	33	0	0
Biomasse & Biogas	484	774	966	495	609	636	723	621	621
Solarenergie und Umweltwärme	0	194	326	239	240	90	275	356	406
Stromgenerierte Energieträger	0	0	0	0	0	0	0	360	360
Strom	1.899	1.764	1.653	1.898	1.739	1.534	1.637	1.619	1.897
Fern- und Nahwärme	785	364	336	539	541	870	596	542	542

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-22: Endenergiebedarf in 2010 und 2050 nach Energieträgern (2060 für LS 2011 – THG95)

	2010	ERP – Ref	ERP – Ziel	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	LS 2011 – A	LS 2011 – THG95
	PJ/a								
Braunkohle	74	14	1	8	1	2	1	0	0
Steinkohle	354	240	151	204	174	186	124	50	0
Mineralölprodukte	3.091	1.569	672	1.391	300	335	48	793	11
Gase (fossil)	2.153	1.343	971	984	782	546	124	784	125
Müll und sonstige	29	81	59	52	18	57	16	0	0
Biomasse & Biogas	484	828	1262	507	822	774	800	630	630
Solarenergie und Umweltwärme	0	299	486	423	370	110	385	661	763
Stromgenerierte Energieträger	0	22	20	0	0	167	140	568	1.038
Strom	1.899	1.751	1.528	2.124	2.004	1.581	2.000	1.415	2.128
Fern- und Nahwärme	785	245	194	476	396	732	352	335	39

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES,IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

8.5. Entwicklung der Stromnachfrage und Stromerzeugung

Tabelle 8-23: Entwicklung des Strombedarfs bis 2060

	2010 *)	2020	2030	2040	2050	2060
	TWh/a					
LS2011 – A	622	564	548	562	567	
LS2011 – THG95	622	583	625	684	797	971
KSZ – AMS	593	555	566	601	630	
KSZ – KS80	593	527	514	558	609	
KSZ – KS90	591	494	479	510	612	
KSZ – KS95	593	503	492	661	779	
ERP – Ref	609	618	612	565	561	
ERP – Ziel	609	576	516	466	459	

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-24: Stromerzeugung nach Energieträgern in 2010 und 2030

	2010	ERP – Ref	ERP – Ziel	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	LS 2011 – A	LS 2011 – THG95
	TWh/a								
Kernenergie	94	0	0	0	0	0	0	0	0
Braunkohle	148	140	113	97	72	46	5	35	45
Steinkohle	107	109	32	116	44	20	30	47	53
Erdgas/Öl/übrige Gase	102	80	63	82	86	69	109	115	133
Wasser	28	19	19	23	23	23	23	23	23
Wind	51	143	155	200	199	172	205	190	217
Biomasse	38	52	63	27	18	42	21	53	53
Solar	26	67	70	54	65	68	66	55	61
Sonstige Erneuerbare	0	0	0	4	4	4	4	7	7
Sonstige	0	1	1	0	0	11	0	0	0
Import	0	-53	-7	-40	1	23	25	19	29
Summe nicht erneuerbare	451	329	208	295	202	124	144	197	231

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

Tabelle 8-25: Stromerzeugung nach Energieträgern in 2010 und 2050 (2060 für LS 2011 – THG95)

	2010	ERP – Ref	ERP – Ziel	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	LS 2011 – A	LS 2011 – THG95
	TWh/a								
Kernenergie	94	0	0	0	0	0	0	0	0
Braunkohle	148	31	20	62	2	2	0	0	0
Steinkohle	107	52	6	80	13	0	0	12	3
Erdgas/Öl/übrige Gase	102	122	61	38	21	13	19	66	0
Wasser	28	19	19	25	25	25	25	25	26
Wind	51	209	214	282	343	324	570	260	477
Biomasse	38	48	60	10	2	32	2	55	55
Solar	26	73	75	59	115	114	123	64	83
Sonstige Erneuerbare	0	0	0	12	12	12	12	19	56
Sonstige	0	7	5	8	7	16	13	0	0
Import	0	-7	16	50	69	74	9	62	269
Summe nicht erneuerbare	451	205	87	179	36	16	19	78	3

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); Prognos, EWI, GWS (2014); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);

8.6. Biomasse, CCS und strombasierte Energieträger

Tabelle 8-26: Stromverbrauch für die Erzeugung von Wasserstoff, Methan und flüssigen Energieträgern bis 2060.

	2010 *)	2020	2030	2040	2050	2060
			TWh/a			
LS2011 – A	0	0	23	65	110	
LS2011 – THG95	0	0	23	70	180	380
KSZ – AMS	0	0	0	0	0	
KSZ – KS80	0	0	0	0	0	
KSZ – KS90	0	0	0	5	66	
KSZ – KS95	0	0	0	94	125	

*) Für die Studie ERP ist das Basisjahr 2011.

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (2012); UBA (2013); Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015);