

Energiewende in der Industrie

Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor

Abschlussbericht zum Arbeitspaket 1 an:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

von:

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
Andrej Guminski, Tobias Hübner, Elsa Rouyre, Dr. -Ing. Serafin von Roon

Navigant Energy Germany GmbH
Matthias Schimmel, Christian Achtelik, Jan-Martin Rhiemeier

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung IER
Dr. Ulrich Fahl, Isela Bailey

Vorhaben: BMWi: I C 4 80 14 38/42; Projekt-Nr. 42/17
Projektnummer: SISDE17915
04.06.2019

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für beiderlei Geschlecht.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
1.1 Einleitende Bemerkungen und Motivation	1
1.2 Ziele und Struktur des Berichts sowie weitere Arbeitspakete	2
2. Identifikation relevanter Energieszenarien in Deutschland.....	3
3. Analyse ausgewählter Energieszenarien in Deutschland	6
3.1 Modellbeschreibungen	6
3.1.1 Modelle zur Abbildung des Industriesektors.....	6
3.1.2 Modelle zur Berechnung ökonomischer Auswirkungen	9
3.2 Rahmendaten und Grundannahmen mit Einfluss auf den Industriesektor	9
3.2.1 Bruttowertschöpfungs-, Bevölkerungs- und Beschäftigungsentwicklung.....	10
3.2.2 Annahmen zu Produktionsmengen	13
3.2.3 Energieträger-, Strom- und CO ₂ -Preise	14
3.2.4 Carbon Leakage, Biomassepotenzial und CCS/CCU	18
3.3 Entwicklung der Kerngrößen und maßgebliche Einflussfaktoren	20
3.3.1 Treibhausgasemissionen.....	22
3.3.2 Endenergieverbrauch	25
3.3.3 Energie- und Materialeffizienz.....	27
3.3.4 Synthetische Brennstoffe.....	30
3.3.5 Power-to-Heat	30
3.3.6 Carbon Capture and Storage/Utilization.....	34
3.3.7 Biomasse	37
3.3.8 Eigenerzeugung	39
3.4 Branchenspezifische Maßnahmen.....	41
3.4.1 Zement- und Kalk	41
3.4.2 NE-Metalle	44
3.4.3 Glasindustrie.....	45
3.4.4 Papierindustrie.....	45
3.4.5 Metallerzeugung und –bearbeitung.....	46
3.4.6 Grundstoffchemie	47
3.5 Auswirkungen der Energieentwicklungsszenarien auf die Wettbewerbsfähigkeit (IER).....	49
4. Fazit und Ausblick.....	50
5. Literaturverzeichnis	52
6. Anhang	54
6.1 Studiensteckbriefe.....	54
6.2 Ökonomische Modellbeschreibungen	62
6.3 Produktionsmengen	65

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1:	Struktur des Berichts	2
Abbildung 3-1:	Entwicklung der Bruttowertschöpfung im verarbeitenden Gewerbe bis 2050 in Mrd. EUR ₂₀₁₇	10
Abbildung 3-2:	Entwicklung des Anteils der energieintensiven Industrien an der Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes in %	11
Abbildung 3-3:	Veränderung der Bevölkerungs- und Beschäftigungszahlen bis zum Jahr 2050 ggü. 2010.....	12
Abbildung 3-4:	Produktionsmengen Elektro- und Oxygenstahl in kt für das Jahr 2010 bis 2050	13
Abbildung 3-5:	Entwicklung der energiebedingten THG-Emissionen in Deutschland bis 2050 in Mio. t CO ₂ -Äq.....	22
Abbildung 3-6:	Entwicklung der energiebedingten THG-Emissionen in der deutschen Industrie bis 2050 in Mio. t CO ₂ -Äq.	23
Abbildung 3-7:	Entwicklung der prozessbedingten THG-Emissionen in der deutschen Industrie bis 2050 in Mio. t CO ₂ -Äq.	24
Abbildung 3-8:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Deutschland bis 2050 in PJ	25
Abbildung 3-9:	Endenergieverbrauch Industrie nach Energieträgern, 2050, PJ	26
Abbildung 3-10:	Entwicklung des Stromverbrauchs in der Industrie bis 2050 in PJ	32
Abbildung 3-11:	Verwendung von CCS in den Szenarien der analysierten Studien.....	34
Abbildung 3-12:	Verminderung der energie- und prozessbedingten Emissionen durch CCS im Jahr 2050.....	35
Abbildung 3-13:	Verminderung der energie- und prozessbedingten Emissionen durch CCS in der Industrie im Jahr 2050	36
Abbildung 3-14:	Biomassennutzung im Jahr 2015 und 2050	38
Abbildung 6-1:	Entwicklung der Produktion von Ammoniak und Chlor 2010 - 2050 in LFS und KSZ.....	72
Abbildung 6-2:	Entwicklung der Produktionsmengen in der Nahrungsmittelindustrie Studienvergleich	73
Abbildung 6-3:	Entwicklung der Produktionsmengen und Anteil der Produktionsrouten Studienvergleich	74

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1:	Übersicht über die für die Analyse in Arbeitspaket 1 ausgewählten Studien im Projekt „Energiewende in der Industrie“	3
Tabelle 3-1:	Überblick über die Industriemodelle der analysierten Studien	8
Tabelle 3-2:	Preisindex für die Lebenshaltung in Deutschland 2010 - 2017	14
Tabelle 3-3:	Studienvergleich bezüglich der internationalen Rohölpreise	15
Tabelle 3-4:	Studienvergleich bezüglich der Rohöl-Grenzübergangswerte	15
Tabelle 3-5:	Studienvergleich bezüglich des Verhältnisses zwischen dem internationalen Rohölpreis und dem Erdgas-Grenzübergangswert frei Deutschland	16
Tabelle 3-6:	Studienvergleich bezüglich der durchschnittlichen Industrie Strompreise	17
Tabelle 3-7:	Studienvergleich bezüglich des Verhältnisses der durchschnittlichen Industrie-Strompreise zu den Gaspreisen in der Industrie	17
Tabelle 3-8:	Studienvergleich bezüglich der CO ₂ -Zertifikatspreise	18
Tabelle 3-9:	Biomassepotenzial in den untersuchten Szenarien	19
Tabelle 3-10:	Zusammenfassung der Kernaussagen	20
Tabelle 3-11:	Grundlegende Annahmen zu Energie- und Materialeffizienz in der Industrie	28
Tabelle 3-12:	Einsatz synthetischer Brennstoffe in der Industrie im Jahr 2050	30
Tabelle 3-13:	Power-to-Heat in den Studien	31
Tabelle 3-14:	Inländisches Potenzial, Nutzung und Importe von Biomasse im Jahr 2050	37

1. EINLEITUNG

Nachfolgender Bericht ist im Rahmen des Projekts „Energiewende in der Industrie“ entstanden und beschließt das erste Arbeitspaket. Einleitend werden Hintergrund und Motivation sowie Ziele und Struktur des Berichts dargelegt. Zudem werden die weiteren Arbeitsschritte des Gesamtprojekts zusammengefasst.

1.1 Einleitende Bemerkungen und Motivation

Die Industrie bezieht knapp 40 % der gesamten Endenergie (EEV) in Deutschland und ist damit der Sektor mit dem zweithöchsten Verbrauch [1]. Im Rahmen der Energiewende trifft die Industrie für das Erreichen der Ziele zur Treibhausgas (THG)-Verminderung der Bundesrepublik Deutschland somit eine besondere Verantwortung [2]. Mit einem Anteil der Erneuerbaren Energien (EE) von 36 % am Strombedarf ist im Zuge der Energiewende bereits ein Zwischenziel erreicht. Die Wärmebereitstellung erfolgt aktuell jedoch noch zu mehr als 85 % durch fossile Energieträger [3] und macht in der Industrie mehr als 70 % des Endenergieverbrauchs aus [4]. Perspektivisch benötigt die Energiewende in der Industrie einen ganzheitlichen energetischen Ansatz, um Treibhausgase zu reduzieren. Sollen beispielsweise die Sektorenziele für 2030 in der Industrie erreicht werden, ist weiterhin ein erheblicher Kraftakt erforderlich. So müssen in der Industrie noch etwa 22 % an Treibhausgasen gegenüber 2014 reduziert werden [5]. Um dieses Ziel zu erfüllen, können eine Vielzahl an möglichen Transformationspfaden verfolgt werden. Durch die Elektrifizierung industrieller Wärmeanwendungen bei einer emissionsarmen Stromerzeugung können beispielsweise Treibhausgase in der Industrie vermindert werden. Eine maßgebliche Reduktion der Treibhausgase durch die Elektrifizierung in der Industrie ist aus Unternehmenssicht jedoch nur dann ein gangbarer Weg, wenn die Substitution anderer Energieträger durch Strom die günstigere Option darstellt. Im internationalen Vergleich nehmen deutsche Industriestrompreise aktuell jedoch einen Spitzenplatz ein. Durch den Ausbau Erneuerbarer Energien und die Transformation des Energiesystems im Rahmen der Energiewende könnten die Industriestrompreise noch zunehmen. Diese und weitere Auswirkungen der Energiewende auf die Industrie wurden bislang noch nicht detailliert untersucht. Dieser Aufgabe und den damit konnotierten Themengebieten widmet sich das Forschungsprojekt „Energiewende in der Industrie“.

1.2 Ziele und Struktur des Berichts sowie weitere Arbeitspakete

Ziel in Arbeitspaket 1 (AP1) ist es durch die Analyse von sieben möglichst relevanten Studien mit energie- und klimapolitische Szenarien, die Bandbreite der möglichen Entwicklungen für den Industriesektor herauszuarbeiten. Dabei wird insbesondere Wert auf die Analyse der den Entwicklungen zugrundeliegenden Annahmen gelegt. In diesem Zusammenhang werden Kernaussagen zu den historischen und zukünftigen Entwicklungen im Industriesektor abgeleitet. Die Ergebnisse werden in Form von Studiensteckbriefen zusammengefasst (vgl. Anhang 6.1). Die Struktur des Berichts ist in **Abbildung 1-1** dargestellt.

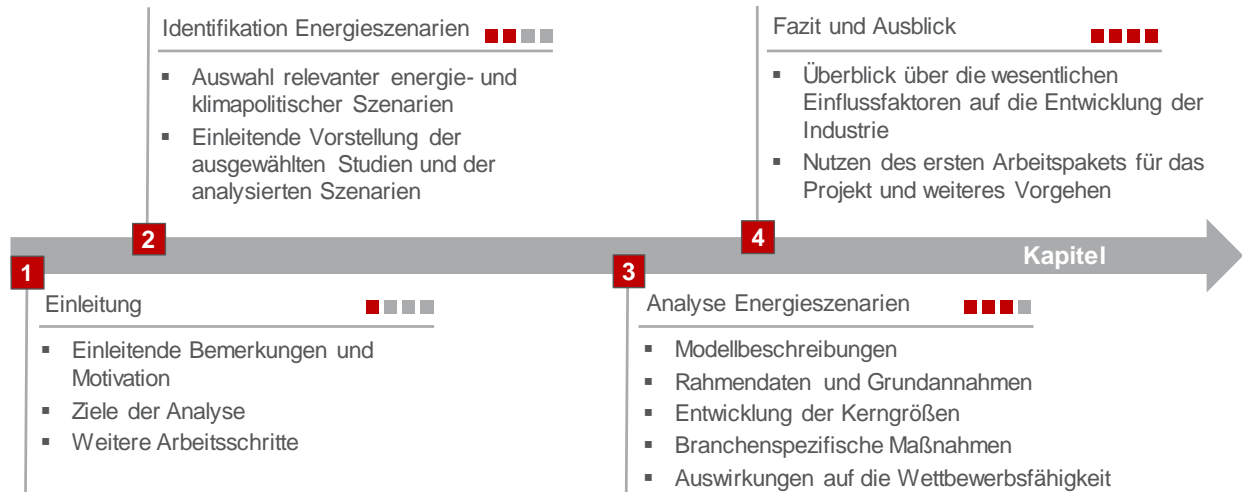


Abbildung 1-1: Struktur des Berichts

Die Ergebnisse aus AP1 fließen zum Teil in nachfolgende Arbeitspakete ein. Die Auswertung der Kerngrößen (z.B. THG-Emissionen und Endenergieverbrauch) gibt den Rahmen für die in AP 4 entwickelten Transformationspfade vor. Die Analyse von Energieeffizienz, Energieträgerwechsel und Eigenerzeugung sowie der Abgleich dieser THG-Vermeidungsmaßnahmen mit branchenspezifischen Studien kann als Grundlage für die Maßnahmenanalyse und Erstellung der Branchensteckbriefe in AP 2a herangezogen werden. Erkenntnisse zu Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit finden Eingang in AP 3, 4 und ggf. 5.

2. IDENTIFIKATION RELEVANTER ENERGIESZENARIOEN IN DEUTSCHLAND

In Arbeitspaket 1 wurden sieben Studien mit energie- und klimapolitischen Szenarien ausgewählt. Zur Auswahl der Studien wurden verschiedene Kriterien herangezogen. Für die Aufnahme in die Studienanalyse waren sowohl ein Zeithorizont bis 2050 als auch eine detaillierte Analyse des Industriesektors erforderlich. Im Zuge dessen wurden in Absprache mit dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) sieben Studien (s. **Tabelle 2-1**) für die Analyse bestimmt.¹ Eine detaillierte Zusammenfassung der Kernaspekte jeder Studie ist in Anhang 6.1 verfügbar (Studiensteckbriefe).

Tabelle 2-1: Übersicht über die für die Analyse in Arbeitspaket 1 ausgewählten Studien im Projekt „Energiewende in der Industrie“

Studientitel	Abkürzung im Text	Energie- und klimapolitische Szenarien ²	Studienjahr	Autor/ Institut	Ziterschlüssel
Entwicklung der Energiemärkte Energierferenzprognose	ERP	ERP-T	2014	EWI, Prognos, GWS	[6]
		ERP-Z80			
Klimaschutzszenario 2050	KSZ	KSZ-T	2015	ISI, Öko-Institut	[7]
		KSZ-Z80			
		KSZ-Z95			
EU Reference Scenario	EU-T	EU-T	2016	University of Athens	[8]
Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten	THGND	THG-Z95	2017	UBA	[9]
Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland	LFS	LFS-T	2017	ISI, Consentec, Ifeu	[10]
		LFS-Z80			
Klimapfade für Deutschland	KP	KP-T	2018	BCG, Prognos	[11]
		KP-Z80			
		KP-Z95			
Integrierte Energiewende	IEW	IEW-T	2018	Dena, EWI	[12] [13]
		IEW-Z80-EL			
		IEW-Z80-TM			
		IEW-Z95-EL			
		IEW-Z95-TM			

In der Studie „Entwicklung der Energiemärkte Energierferenzprognose“ (**ERP**) [6] wird die wahrscheinliche energiewirtschaftliche Entwicklung des Energiesystems in Deutschland bis zum Jahr 2030 in einem Referenzszenario untersucht. Diese wird um ein bis ins Jahr 2050 reichendes

¹ In einem vorgeschalteten Prozess wurde eine Vielzahl von Studien analysiert. Dabei sind eine Reihe von einflussreichen Studien wie z.B. „Sektorkopplung - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems“, eine Acatech Studie aus dem Jahr 2018, aufgrund vergleichsweise geringer veröffentlichter quantitativer Daten von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

² Um im Rahmen des Studienvergleichs eine übersichtliche und konsistente Szenariobeschreibung zu gewährleisten wurden die in den Studien verwendeten Abkürzungen für die Szenarien angepasst. Dabei wird für jedes Szenario eine Abkürzung verwendet. Das „T“ in der Abkürzung wird bei allen Szenarien verwendet die keine THG-Verminderungs-Zielsetzung verfolgen. Das „Z“ wird bei den Zielszenarien verwendet. Letztere werden zusätzlich um die Ziffer „80“ oder „95“ ergänzt um das im Szenario verfolgte Ziel zur THG-Verminderung ggü. 1990 anzugeben.

Trendszenario ergänzt³. Neben dem Trendszenario wird ein auf den nationalen energie- und Klimaschutzpolitischen Zielen basierendes Zielszenario erstellt, in dem ein Weg zur Treibhausgasreduktion von 80 % bis 2050 im Vergleich zum Referenzjahr 1990 aufgezeigt wird.

Im „Klimaschutzszenario 2050“ (**KSZ**) [7] werden mittels Modellrechnungen Szenarien mit verschiedenen klimapolitischen Ambitionsniveaus bis zum Jahr 2050 erstellt. Hierbei stehen die Emissionsminderung bei Fortschreibung der aktuellen Energie- und Klimapolitik und Strategien und Maßnahmen zur Erreichung der daraus folgenden Klimaziele im Fokus. Ferner wird die sich daraus ergebende Kosten/Nutzen-Relation für die deutsche Volkswirtschaft analysiert. Es werden drei Szenarien untersucht: Das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario, das Klimaschutzszenario 80 und das Klimaschutzszenario 95. Im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario werden alle Maßnahmen bis 2050 fortgeschrieben die bis Oktober 2012 ergriffen wurden.⁴ In den Zielszenarien wird eine 80 % bzw. 95 %-ige Reduktion der Treibhausgase erzielt.

In der Studie „EU Reference Scenario“ (**EU-T**) [8] wird die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der EU in einem Trendszenario betrachtet. In der zugrundeliegenden Systemmodellierung wird das Erreichen der Treibhausgasziele und der Ziele zum Ausbau Erneuerbarer Energien bis 2020 vorausgesetzt. Im Szenario werden alle Direktiven der Europäischen Union berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahres 2014 beschlossen wurden.⁵ Bei Auslaufen einer Direktive im Modellierungszeitraum wird angenommen, dass diese nicht erneuert wird. In dieser Studie werden keine Zielszenarien untersucht.

In den „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (**LFS**) [10] werden verschiedene Entwicklungen des deutschen Energiesystems untersucht. Die Studie ist in insgesamt 15 Module unterteilt. Von diesen 15 Modulen sind, zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Analyse, sieben öffentlich zugänglich [14]. In den verfügbaren Modulen werden Simulationen auf der Basis von Energiesystemmodellen für Deutschland durchgeführt, die auf unterschiedlichen Nebenbedingungen basieren. In Modul (0), (1) und (2) werden zunächst die Ausgangsparameter und Nebenbedingungen der Simulationsumgebung festgelegt. In Modul (3) werden ein Referenz- und ein Basisszenario untersucht. Das Referenzszenario beinhaltet die Entwicklung des Energiesystems ohne Vorgabe energiepolitischer Ziele. Dieses Szenario zeigt somit die Trendentwicklung des Energiesystems ohne energiepolitische Eingriffe.⁶ Im Basisszenario wird das Energiesystem im Hinblick auf die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung kostenminimal optimiert. Als Zielsetzung wird die Reduktion der Treibhausgase um 80 % bis 2050 gegenüber dem Referenzjahr 1990 angegeben. Das Basisszenario ist das zentrale Zielszenario der Langfristszenarien.⁷ Der Fokus dieser Analyse liegt auf dem Trend- und dem Zielszenario der Langfristszenarien. Ab Modul (4) werden die Nebenbedingungen der Simulationen variiert, um Sensitivitätsanalysen durchzuführen.

In der Studie „Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten“ (**THGND**) [9] wird das erste einer fünf Szenarien umfassenden Studienreihe behandelt. In den Szenarien der Studienreihe werden Treibhausgasneutralität und Ressourcenschutz gemeinsam und integriert betrachtet. Bisher ist lediglich das erste Szenario der Studienreihe verfügbar. In diesem Zielszenario wird ein ambitionierter und energetisch effizienter Transformationspfad hin zur Treibhausgasneutralität verfolgt.

Die Studie „Klimapfade für Deutschland“ (**KP**) [11] entwickelt vier energie- und klimapolitische Szenarien. Als Vergleichsszenario dient die Fortschreibung der derzeitigen Entwicklung im

³ Das Trendszenario ist eine Fortschreibung der Entwicklung des Referenzszenarios von 2030 bis 2050. Um eine einheitliche Terminologie für den Studienvergleich zu gewährleisten wird das Referenz- und Trendszenario nachfolgend als Trendszenario bezeichnet. Der Zweck des Szenarios ist es aufzuzeigen, welche Ergebnisse die Modelle ohne energiepolitische Eingriffe erzeugen. Dennoch ist zu beachten, dass das Szenario keine völlig konsistente Welt abbildet. Es handelt sich folglich nicht um ein Trendszenario im eigentlichen Sinne, wird aus Konsistenzgründen folgend jedoch derart bezeichnet.

⁴ Um eine einheitliche Terminologie für den Studienvergleich zu gewährleisten wird das Referenzszenario nachfolgend als Trendszenario bezeichnet.

⁵ Mit Ausnahme von drei Änderungen an existierenden Direktiven die 2015 verabschiedet wurden.

⁶ Um eine einheitliche Terminologie für den Studienvergleich zu gewährleisten wird das Referenzszenario nachfolgend als Trendszenario bezeichnet.

⁷ Da es sich beim Basisszenario um ein Zielszenario handelt, wird dieses folgend auch so bezeichnet.

Referenzszenario.⁸ Die anderen vier Szenarien setzen sich aus der Kombination von THG-Emissionszielsetzungen und der Variation politischer Rahmenbedingungen zusammen. Bei den THG-Emissionszielsetzungen wird die Reduktion der Treibhausgase um 80 % bzw. 95 % bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 1990 untersucht. Die politischen Rahmenbedingungen werden in die Möglichkeiten „Nationale Alleingänge“ (N) und „Globaler Klimaschutz“ (G) unterteilt. Quantitativ werden lediglich die Szenarien N80 und G95 sowie das Trendszenario untersucht. Folglich beschränkt sich die Analyse auf diese drei Szenarien.

In der „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende“ (IEW) [12], [13] werden fünf Szenarien analysiert. Ausgangspunkt bildet das Referenzszenario welches von einer „[...] progressiven Fortschreibung vergangener und aktueller Politik- und Technologieentwicklungen in den jeweiligen Sektoren [...]“ [12] ausgeht und kein THG-Verminderungsziel verfolgt. In den anderen vier Szenarien werden hingegen Pfade aufgezeigt mit denen THG-Emissionsreduktionen um 80 % bzw. 95 % bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 1990 erzielt werden. Dabei wird für beide Zielsetzungen jeweils ein Pfad mit Fokus auf der Umsetzung von Elektrifizierungsmaßnahmen und ein „Technologiemixpfad“ untersucht.

⁸ Um eine einheitliche Terminologie für den Studienvergleich zu gewährleisten wird das Referenzszenario nachfolgend als Trendszenario bezeichnet.

3. ANALYSE AUSGEWÄHLTER ENERGIESZENARIEN IN DEUTSCHLAND

Ziel des Abschnitts ist es aus dem Vergleich der ausgewählten Studien Rückschlüsse auf die möglichen Entwicklungspfade für den Industriesektor in Deutschland zu ziehen. Die Berechnung der Szenarien erfolgt durch zum Teil sehr unterschiedliche Modelle, denen heterogene Grundannahmen und Rahmendaten zugrunde liegen. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, werden in den Abschnitten 3.1 und 3.2 vorerst die eingesetzten Modelle und die wichtigsten Grundannahmen diskutiert. Anschließend werden in Abschnitt 3.3 die Entwicklungen der Kerngrößen gezeigt und die Gründe für diese Entwicklungen analysiert. In Abschnitt 3.4 werden, in Vorbereitung auf AP2a, die in den Energieszenarien genannten branchenspezifischen THG-Vermeidungsmaßnahmen mit branchenspezifischen Studien abgeglichen. Letztlich erfolgt eine Analyse ökonomischer Auswirkungen der Maßnahmenumsetzung auf den Industriesektor (Abschnitt 3.5).

3.1 Modellbeschreibungen

Die den Studien zugrundeliegenden Modelle haben maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung der Kerngrößen. Da der Industriesektor im Fokus steht, liegt das Hauptaugenmerk auf der Analyse der Simulationsmodelle zur Abbildung der Industrie. Zudem werden die in den Studien verwendeten Modelle zur Berechnung der ökonomischen Auswirkungen beschrieben. Einige der im Folgenden angeführten Modelle werden in mehreren Studien verwendet.

3.1.1 Modelle zur Abbildung des Industriesektors

Nachfolgend werden die Modelle beschrieben, die bei der Abbildung des Industriesektors Verwendung finden. Im Industriesektormodell der Studien ERP, KP, LFS und KSZ findet keine reine Optimierung statt, da neben Kostenaspekten weitere nicht ökonomische Impulse (Bsp. Akzeptanz) miteinbezogen werden.

In ERP und KP wird das Bottom-up Sektormodell von Prognos eingesetzt. Das industrielle Sektormodell berechnet auf der Basis von Aktivitätsgrößen⁹ den zukünftigen branchenspezifischen EEV nach Energieträger- und Anwendungsarten. Hierbei sind die Wertdichte (Wh/€) und der spezifische Energieverbrauch (Wh/kg) entscheidende Größen. Auf der Basis von Mengen- (Produktionsmenge) oder Wertindikatoren (Wertschöpfung) wird der zukünftige EEV berechnet. Um technische Veränderungen in den industriellen Produktionsprozessen abzubilden, werden zudem Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel definiert. Diese Maßnahmen werden in ökonomische Impulse übersetzt. Alle Maßnahmen werden innerhalb bestehender Potenzialgrenzen nach volkswirtschaftlichen Vermeidungskosten priorisiert. Hinter Änderungen im Energieeinsatz und den damit verbundenen technischen Veränderungen stehen somit monetäre Zahlungsströme. Neben diesen Zahlungsströmen werden praktische Restriktionen sowie gesellschaftliche und politische Akzeptanzbeschränkungen berücksichtigt [11]. Die Einsparpotenziale und Kosten der Aktivitätsgrößen und Maßnahmen werden fortgeschrieben [6].

In LFS und KSZ wird das Sektormodell FORECAST Industry eingesetzt. Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein Bottom-up Sektormodell das THG-Emissionen mit abbildet. Analog zu ERP und KP wird der Energieverbrauch der Prozesse und Querschnittstechnologien über Aktivitätsgrößen wie die Produktionsmenge (z.B. Zement, Stahl) ermittelt. Sehr heterogene Branchen wie z.B. Fahrzeug- und Maschinenbau werden aggregierter betrachtet. In diesen Branchen wird als Aktivitätsgröße für die Entwicklung des Endenergieverbrauchs u.a. die Bruttowertschöpfung herangezogen. Industrielle Produktion und spezifischer Verbrauch werden zur Erfassung des Energieverbrauchs über Prognosen ermittelt. Sowohl für Prozesse als auch Querschnittstechnologien werden Maßnahmen ermittelt und den einzelnen Prozessen/Technologien zugeordnet. Diese Maßnahmen enthalten beispielsweise Daten zum Einsparpotenzial, die mögliche Diffusion im Anlagenbestand und die Kosten. Eine größere Diffusion der

⁹ Bsp: Tonnage, Wertschöpfung.

Maßnahmen im Anlagenbestand senkt den spezifischen Energieverbrauch. Im Gegensatz zu ERP und KP werden Maßnahmen jedoch nicht hinsichtlich volkswirtschaftlichen Vermeidungskosten priorisiert, sondern anhand des sich ergebenden Barwerts der Investition präferiert. Folglich werden Maßnahmen aus betriebswirtschaftlicher (Akteursperspektive) umgesetzt. Die aus Akteurssicht erwartete Amortisationszeit für Effizienzmaßnahmen wird durch den internen Zinsfuß reflektiert.

In EU-T wird das Industriemodul von PRIMES eingesetzt. Dieses umfasst 30 industrielle Prozesse und stellt den Prozessfluss nach Aktivitätsgrößen dar. Das Modell kombiniert Kostenminimierung mit nichtlinearen Funktionen, die der Heterogenität der Branchen und der technologischen Veränderungen geschuldet sind. Weitere Angaben zur Funktionsweise des Industriemoduls werden in EU-T nicht ausgewiesen.

In THGND wird das umweltökonomische Rohstoff- und THG-Modell (URMOD) zur Abbildung der Stoffströme in der Industrie eingesetzt. Dieses Modell verknüpft sowohl die Rohstoffaufwände als auch die Treibhausgasemissionen mit den verursachenden wirtschaftlichen Produktions- und Konsumaktivitäten auf einer detaillierten Gütergruppenebene. Dadurch wird es möglich, die Güterströme in der Volkswirtschaft in Rohstoff- bzw. Treibhausgasäquivalente zu konvertieren. Hierbei wird analog zu KP und ERP eine volkswirtschaftliche Perspektive gewählt.

In IEW wird die Emissions- und Energieverbrauchsentwicklung des Industriesektors durch die exogene Bestimmung prozess- und branchenspezifischer Transformationspfade bestimmt. Es erfolgt eine Abschätzung der Energieverbrauchsentwicklung auf Basis der existierenden Maßnahmen zur THG-Verminderung in den jeweiligen Branchen. Zur Ableitung der Transformationspfade wurde ein Dialogprozess mit Stakeholdern durchgeführt. Das gesammelte Branchenwissen wurde im Anschluss in Energieverbrauchsentwicklungen übersetzt. Es wurde folglich keine Kostenminimierung durchgeführt. Für die Kalkulationen im Industriesektor wird auch keine bottom-up Kopplung der Energieverbräuche mit Einzelmaßnahmen durchgeführt. IEW nimmt eine volkswirtschaftliche Perspektive ein. Im Industriesektor werden Brennstoffkosten berücksichtigt und Kapitalkosten mit Verweis auf eine schlechte Datengrundlage von der Betrachtung ausgeschlossen.

Eine Übersicht zu wichtigen Kriterien der analysierten Industriemodellen ist in **Tabelle 3-1** verfügbar.

Tabelle 3-1: Überblick über die Industriemodelle der analysierten Studien

Parameter	ERP	KP	KSZ	LFS	EU-T	THGND	IEW
Modell	Industriesektormodell von Prognos		FORECAST Industry		Primes Industriemodul	URMOD	ewi Sektormodul Industrie
Perspektive	Volkswirtschaftlich		Betriebswirtschaftliche		k.A.	Volkswirtschaftlich	Keine bottom-up Modellierung
Wirtschaftszweige/Prozesse	Gew. v. Steinen, Erden u. Bergbau, Papier, Chemie, Gummi- u. Kunststoffwaren, Glas Keramik und Ziegel, Zement, Beton Steine u. Mineralien, Maschinenbau, Metallerzeugnisse, Metallerzeugung- und Bearbeitung, Elektrotechnik, Fahrzeugbau, Sonst. WZ		Stahl, NE-Metalle, Grundstoffchemie, Glas, Keramik, Papier, Verarb. v. Steinen u. Erden, Nahrungsmittel, Kunststoffverarbeitung (> 60 bottom-up modellierte Prozesse) [15]		k.A. Eisen und Stahl, NE-Metalle, Glas werden erwähnt	Stahl, Zement, Grundstoffchemie, NE-Metalle	Stahl, Aluminium, Kupfer, Zement, Kalk, Glas, Papier, Ammoniak, Chlor, Ethylen, Sonst. Industrie
Energieträger	8 in ERP ¹⁰	12 in KP ¹¹	8 in KSZ ¹²	10 in LFS ¹³	k.A.	9 ¹⁴	7 ¹⁵
Optimierung	Keine reine Kostenoptimierung		Keine reine Kostenoptimierung		Kosten-optimiert	Keine Optimierung	Keine Optimierung
Endogene Variablen	Energieverbrauch, Maßnahmenumsetzung		Energieverbrauch, Maßnahmenumsetzung		CO ₂ -Preise, Veränderung im Kapitalstock	CO ₂ -Preise	Keine endogenen Variablen
Exogene Variablen	Tonnenproduktion, CO ₂ -Preise, Energieträgerpreise		Tonnenproduktion, CO ₂ -Preise, Energieträgerpreise, Wertschöpfung, Emissionsfaktoren und Energieträger		k.A.	k.A.	Transformationspfade sind exogen vorgegeben
Kosten	Differenzkosten		Differenzkosten		k.A.	k.A.	Brennstoffkosten

¹⁰ ERP: Steinkohle, Braunkohle, Mineralölprodukte, Gase, Nichterneuerbare Abfälle, Strom, Fernwärme, Erneuerbare Energien

¹¹ KP: Sonstige Mineralölprodukte, Heizöl, Kraftstoff, Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Erdöl, Sonstige Gase, Nichterneuerbare Abfälle u. Abwärme, Sonstige erneuerbare Energien, Biomasse u. erneuerbare Abfälle, Fernwärme, Strom

¹² KSZ: Strom, Erdgas, Fern- und Nahwärme, Heizöl, Kohle, Sonstige Gase, Erneuerbare Energien, Abfall

¹³ LFS: Sonstige, biogene Brennstoffe, Solarthermie, Fernwärme, Sonstige Gase, Erdgas, Kohle, Heizöl, Strom - P2H, Strom – ohne P2H

¹⁴ THGND: Strom – Mechanische Energie, Strom PtH für Prozesswärme unter 100°C, Strom PtH für Prozesswärme über 100°C, Wasserstoff, Gase für Prozesswärme, Koks- und Steinkohle, Braunkohle, Ersatzbrennstoffe, Mineralöle

¹⁵ IEW: Wasserstoff (konventionell, biogen und synthetisch), Strom, Erneuerbare, Kohle, Öl (konventionell, biogen und synthetisch), Gas (konventionell, biogen und synthetisch)

3.1.2 Modelle zur Berechnung ökonomischer Auswirkungen

Die Modelle, die zur Berechnung der ökonomischen Auswirkungen in den Studien eingesetzt werden, lassen sich den Modellfamilien der Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle, der Systems Dynamics Modelle, der Input-Output-Modelle und der ökonometrischen Modelle zuordnen. Die Verwendung dieser Modelle geschieht zum einen für die Herleitung von Inputannahmen für die weiteren energiewirtschaftlichen Analysen und zum anderen für die Analyse der gesamtwirtschaftlichen Wirkungen im Szenarienvergleich. In keinem der Fälle wird der Kreis bei der Modellierung geschlossen, um Input und Output miteinander in Einklang zu bringen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Ebenso wird in den vorliegenden Studien die Einbettung Deutschlands in die europäischen und globalen Märkte vernachlässigt. Diese Lücken werden im Laufe der Bearbeitung des vorliegenden Vorhabens geschlossen werden. In diesem Abschnitt werden die Modelle zur Berechnung der ökonomischen Auswirkungen genannt und eingeordnet. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich in Anhang 6.2.

Gesamtwirtschaftliche Modellierung zur Herleitung von Inputannahmen

In EU-T werden mit Hilfe des globalen Allgemeinen Gleichgewichtsmodells GEM-E3 die dem Szenario zugrundeliegenden ökonomischen Rahmenannahmen hergeleitet.

Analyse der gesamtwirtschaftlichen Wirkungen auf nationaler Ebene

In drei der ausgewählten sieben Studien werden im Szenarienvergleich die Auswirkungen auf gesamtwirtschaftliche Größen auf nationaler Ebene untersucht. Dabei kommen mit ASTRA-D in KSZ ein Systems Dynamics Modell, mit PANTA RHEI in ERP ein ökonometrisches Modell und in KP Input-Output-Analysen zum Einsatz. Es erfolgt keine Rückkopplung der Ergebnisse auf die den Szenarien zugrundeliegenden Rahmenannahmen, z. B. die Produktionsmengen in der Industrie. Die Einbettung Deutschlands in die europäischen und globalen Märkte wird vernachlässigt.

Keine Analyse der gesamtwirtschaftlichen Wirkungen

In THGND, LFS, IEW und EU-T erfolgt keine Untersuchung der gesamtwirtschaftlichen Effekte im Szenarienvergleich.

3.2 Rahmendaten und Grundannahmen mit Einfluss auf den Industriesektor

In den untersuchten Energieszenarien werden eine Vielzahl von Rahmendaten und Grundannahmen festgelegt, die sowohl die Höhe des EEV und somit der THG-Emissionen, als auch die Umsetzung von Maßnahmen zur THG-Verminderung beeinflussen. Die Stärke des Einflusses dieser Annahmen auf das Ergebnis ist abhängig von der Struktur des Industriemodells, welches für die Berechnung verwendet wurde (s. Abschnitt 3.1.1). So beeinflussen zum Beispiel die Annahmen zur Entwicklung der Bruttowertschöpfung (BWS), Bevölkerung, Beschäftigung und der Produktionsmengen die Höhe des EEV in der Industrie. Die Anzahl der umgesetzten Maßnahmen zur THG-Verminderung hängt u.a. von den Annahmen zu den Energieträger-, Strom- und CO₂-Preisen ab. Weitere Annahmen, die maßgeblichen Einfluss auf den Transformationspfad der Industrie haben, sind die Höhe des inländischen Biomassepotenzials, die Stärke des Carbon Leakage Schutzes¹⁶ und der Umgang mit Carbon Capture and Storage/Utilization (CCS/U). Um eine Einordnung der Studienergebnisse zu ermöglichen werden nachfolgend die dort getroffenen Grundannahmen gegenübergestellt. Der Einfluss dieser Grundannahmen auf die Höhe des EEV und den Grad der Maßnahmenumsetzung kann aus den veröffentlichten Daten nicht exakt abgeleitet werden. Der Vergleich ermöglicht dennoch eine verbesserte Einordnung der Studienergebnisse. Gleichzeitig ist die Analyse der Grundannahmen für die weiteren Arbeitsschritte von Bedeutung, da bereits eine erste Datengrundlage für die Abbildung der Transformationspfade in AP4 geschaffen wird.

¹⁶ Carbon leakage beschreibt die Abwanderung der CO₂-intensiven Industrie aufgrund erhöhter finanzieller Belastung durch Klimamaßnahmen wie z.B. die Besteuerung/Bepreisung von CO₂. Carbon Leakage Schutz sind demnach Maßnahmen die das carbon leakage Risiko minimieren.

3.2.1 Bruttowertschöpfungs-, Bevölkerungs- und Beschäftigungsentwicklung

Die Entwicklung der Kennzahlen Bruttowertschöpfung, Bevölkerung und Beschäftigung wirkt sich direkt auf den (industriellen) EEV in den analysierten Studien aus. So dient in ERP und KP die BWS zum Beispiel in den nicht-energieintensiven Industrien als Aktivitätsgröße für die Entwicklung des EEV und somit der Emissionen. **Abbildung 3-1** zeigt die Annahmen zur Entwicklung der BWS im verarbeitenden Gewerbe bis 2050. Um die Vergleichbarkeit der Werte zu gewährleisten wurden die Angaben in den Studien über den Verbraucherpreisindex auf das einheitliche Basisjahr 2017 umgerechnet [16]. Die Grafik zeigt, dass die BWS des verarbeitenden Gewerbes im Jahr 2017 bei ca. 620 Mrd. EUR₂₀₁₇ lag. Die Studien EU-T, KSZ und LFS nehmen Werte für die BWS im Jahr 2050 an, die diesen Wert nur geringfügig übertreffen. Hauptgrund für das vergleichsweise geringe Wachstum der BWS in diesen Studien ist, dass die Folgen der Finanz- und Wirtschaftskrise aus dem Jahr 2009/2010 sowie der daraus resultierenden Euro Schuldenkrise überschätzt bzw. die Erholung der Industrie von dieser Krise unterschätzt wurden. IEW und KP sind die aktuellsten der untersuchten Studien und gehen von deutlich höheren und somit aus heutiger Sicht realistischeren Werten im Jahr 2050 aus. Dabei wird in KP ein Wert von ca. 875 Mrd. €₂₀₁₇ für 2050 ausgewiesen. In IEW führen die branchenspezifischen Schätzungen zur Entwicklung der BWS zu einem durchschnittlichen Wirtschaftswachstum von einem Prozent p.a. im Zeitraum zwischen 2015 und 2050. Obwohl die Energierferenzprognose (2014) die älteste der hier untersuchten Studien ist, weist diese einen Wert von 800 Mrd. €₂₀₁₇ aus, der zwischen dem Wert aus KP und den Werten der anderen Studien liegt.¹⁷ In ERP wurde zum Zeitpunkt der Studiererstellung die Annahme getroffen, dass sich Deutschland aufgrund seiner Exportstärke überdurchschnittlich schnell von der Schuldenkrise im Euroraum erholt. Diese Annahme hat sich aus heutiger Sicht als zutreffend erwiesen.

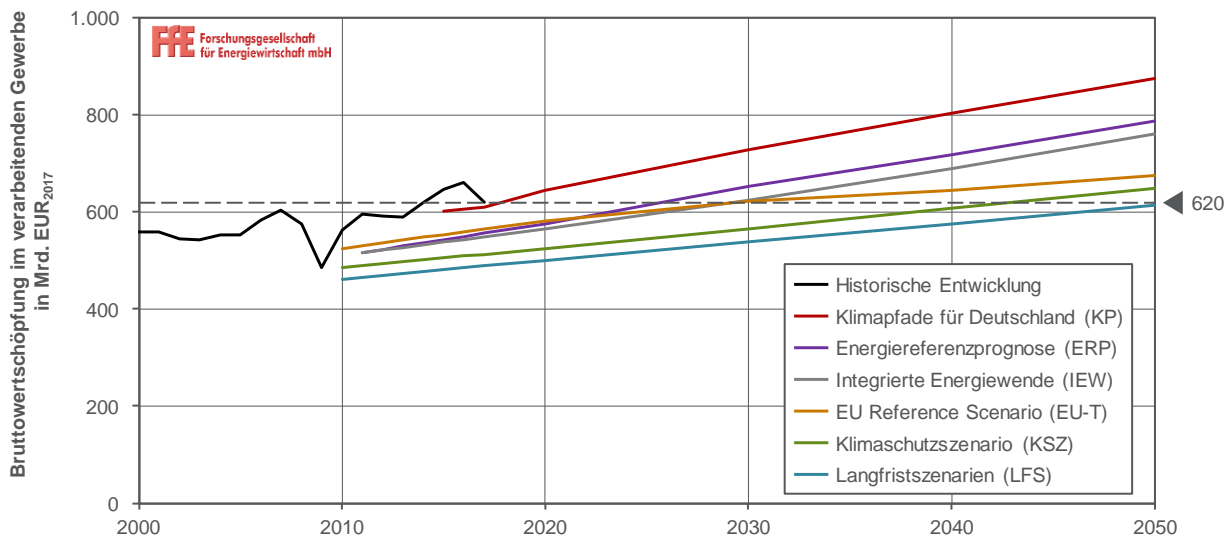


Abbildung 3-1: Entwicklung der Bruttowertschöpfung im verarbeitenden Gewerbe bis 2050 in Mrd. EUR₂₀₁₇¹⁸

¹⁷ Die BWS in [6] wird in Mrd. €₂₀₀₅ angegeben. Die Umrechnung des Basisjahres von 2005 auf 2017 ergibt eine Steigerung der BWS im Jahr 2050 von 667 Mrd. €₂₀₀₅ auf 800 Mrd. €₂₀₁₇.

¹⁸ Umrechnung aller Angaben in den Studien auf das Basisjahr 2017 über den Verbraucherpreisindex aus [16]. Die Umrechnung erhöht die Vergleichbarkeit der Werte für die BWS zwischen den Studien, es wird jedoch ein systematischer Fehler in Kauf genommen. In sämtlichen Studien wird die Entwicklung der BWS inflationsbereinigt („real“) angegeben. Durch die Umrechnung der Preisbasis mittels Verbraucherpreisindex erfolgt somit eine doppelte Bereinigung. Für eine korrekte Bilanzierung müssten die realen Angaben in den Studien in nominale Werte umgerechnet und anschließend mit einem einheitlichen Indikator bereinigt werden. Die benötigten Angaben für eine Umrechnung von realen zu nominalen Werten wurden in den Studien jedoch nicht angegeben.

Mit Ausnahme von ERP und KSZ sinkt der Anteil des verarbeitenden Gewerbes an der gesamten BWS in den untersuchten Studien bis 2050. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass ein Wandel hin zu einer dienstleistungsorientierten Wirtschaft erfolgt. In ERP wird davon ausgegangen, dass sich lediglich der Anteil der statistisch im Industriesektor erfassten Dienstleistungen erhöht. Folglich bleibt der Anteil der BWS des verarbeitenden Gewerbes nahezu konstant. In KSZ nimmt der Anteil marktbasierter Dienstleistungen an der gesamten BWS zu. Dieser Zuwachs geschieht jedoch nicht auf Kosten der Anteile des verarbeitenden Gewerbes.¹⁹

Abbildung 3-2 zeigt die Entwicklung des Anteils der energieintensiven Industrie an der Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes bis 2050. In KP, ERP, LFS und EU-T wird angenommen, dass dieser Anteil bis 2050 sinkt und der Anteil der Branchen mit höherer spezifischer Wertschöpfung (z.B. Maschinen- und Fahrzeugbau) steigt.²⁰ In IEW ist die Entwicklung des branchenspezifischen EEVs an die der BWS in der jeweiligen Branche gekoppelt. In KP, ERP und LFS ist insbesondere die Entwicklung der BWS in den nicht-energieintensiven Branchen eine relevante Größe, da die BWS in diesen Branchen an die Entwicklung des Endenergieverbrauchs gekoppelt ist.²¹

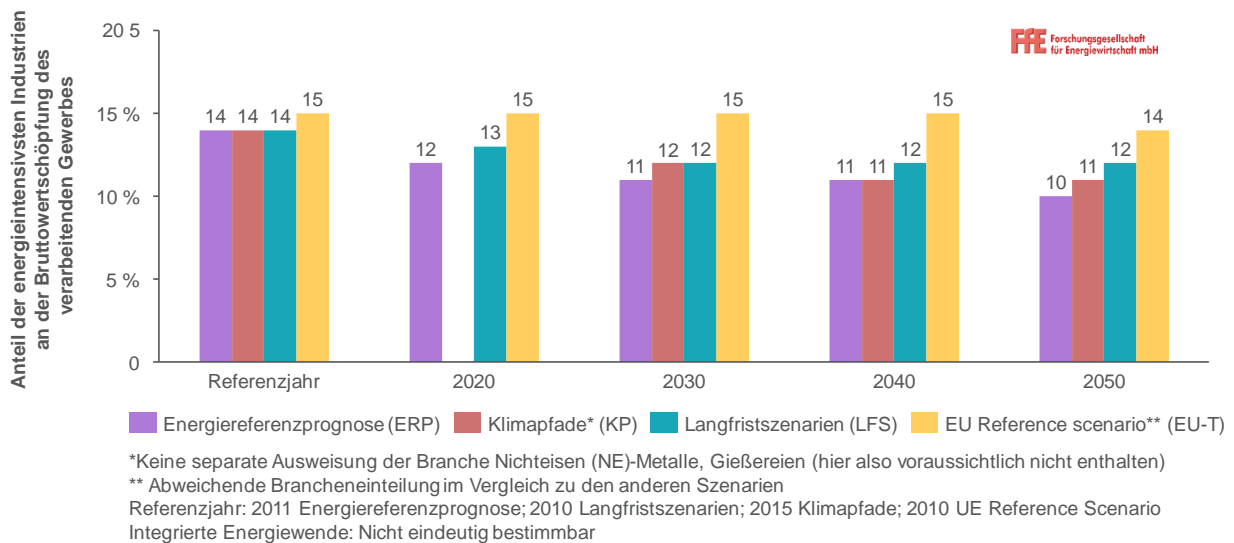


Abbildung 3-2: Entwicklung des Anteils der energieintensiven Industrien an der Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes in %²²

In LFS und KSZ ist der EEV der Industrie abhängig von Annahmen zur Bevölkerungs- und Beschäftigungsentwicklung. Dabei wird der Anteil des industriellen EEV am gesamten EEV u.a. durch die Annahmen zur Entwicklung der Bevölkerung beeinflusst, da diese in den Sektoren Verkehr und Haushalte als zentrale Aktivitätsgröße dienen. Das in diesen Studien verwendete Modell FORECAST-Industry koppelt die Entwicklung des Verbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in der Industrie an

¹⁹ Hier wird ein Rückgang des Anteils der BWS im Bausektor und bei den nicht-marktbasierten Dienstleistungen angenommen. Letztere sind gem. [46] Dienstleistungen die „(...) nur von staatlichen Einrichtungen oder privaten Organisationen ohne Erwerbszweck erbracht, und zwar überwiegend im Bildungs-, Gesundheits- und Sozialwesen (...)“ werden.

²⁰ Dieser Strukturwandel wird auch in KSZ angenommen, es erfolgt jedoch keine exakte Ausweisung der BWS je WZ, sodass diese Studie nicht in die Abbildung integriert werden konnte. In THGND wird die Entwicklung der BWS nicht thematisiert. In EU-T erfolgt keine gesonderte Ausweisung der Entwicklung der BWS je WZ für Deutschland und in IEW ist die Bestimmung des Anteils der energieintensiven Industrie an der BWS des verarbeitenden Gewerbes mit dem verfügbaren Datensatz nicht möglich.

²¹ In den energieintensiven Branchen wird in vielen Fällen die Entwicklung des EEV an die Entwicklung der Produktionszahlen gekoppelt und ist somit nicht direkt von den Annahmen zu Entwicklung der BWS betroffen. So kann z.B. trotz sinkender Produktionszahlen und folglich sinkendem EEV ein Wachstum der BWS erfolgen.

²² Grundlage für die Berechnung dieser Anteile sind die Daten zur Bruttowertschöpfung je Wirtschaftszweig. Folgende Wirtschaftszweige wurden als energieintensiv eingestuft: Metallherzeugung, Nicht-Eisen-Metalle, Glas und Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, Papier und Grundstoffchemie.

den EEV für Raumwärme und Warmwasser im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD).²³ Letzterer ist wiederum direkt abhängig von der Anzahl der Beschäftigten und der Arbeitsfläche je Beschäftigtem.

Abbildung 3-3 zeigt, dass in allen Studien von einem Rückgang der Bevölkerung und der Beschäftigten bis 2050 ausgegangen wird. In den analysierten Studien wird der Rückgang der Bevölkerung mit der Altersstruktur der Bevölkerung begründet. Der Bevölkerungsrückgang in KP und IEW fällt mit 5 % bzw. 6 % bis 2050 ggü. 2010, im Vergleich zu den anderen Szenarien geringer aus. Dies liegt vor allem daran, dass aufgrund der Aktualität der Studien (Erscheinungsjahr 2018), Bevölkerungsfortschreibungen des Statistischen Bundesamtes herangezogen werden konnten, die auf aktuelleren Daten zu Migrationsbewegungen basieren und somit die starke Zuwanderung im Jahr 2015 berücksichtigen.

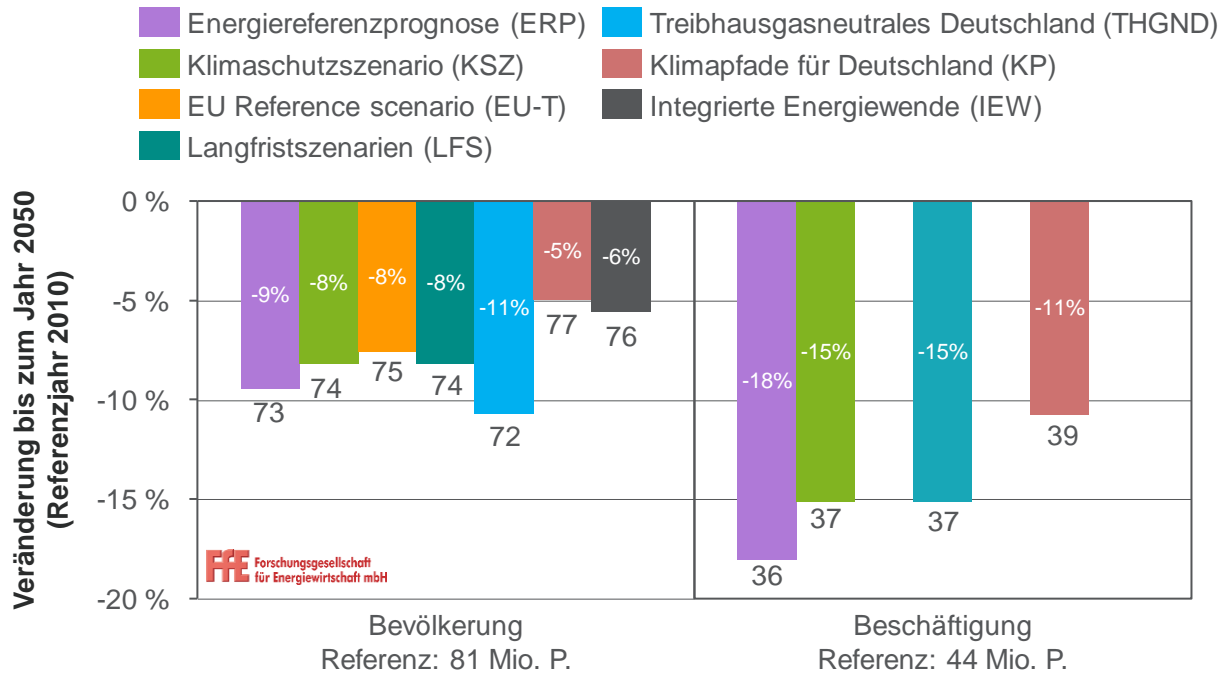


Abbildung 3-3: Veränderung der Bevölkerungs- und Beschäftigungszahlen bis zum Jahr 2050 ggü. 2010²⁴

Der Rückgang der Beschäftigten wird in den Szenarien mit der alternden Bevölkerung und der dadurch rückläufigen Anzahl an Personen in erwerbsfähigem Alter begründet. Hierbei stützt sich LFS auf die Analysen aus KSZ und kommt daher ebenfalls zu einem Rückgang der Bevölkerung um 15 % bis 2050 ggü. 2010.²⁵ Es zeigt sich, dass der Rückgang der Erwerbstätigen und somit der an diese Aktivitätsgröße gebundene Energieverbrauch in den aktuelleren Studien weniger stark abnimmt als in den älteren Studien. In LFS, KSZ und ERP würde nach einer Korrektur der Annahmen zur Entwicklung der Bevölkerung folglich eine stärkere Maßnahmenumsetzung benötigt, um eine THG-Vermindeung in gleicher Höhe zu erzielen.

²³ Hierzu wird aus der Entwicklung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs im GHD-Sektor ein Effizienzindex berechnet der mit dem frozen efficiency Bedarf für Raumwärme und Warmwasser in der Industrie multipliziert wird. In IEW erfolgt ebenfalls eine Kopplung zwischen der Entwicklung des industriellen Raumwärme- und Warmwasserbedarfs und der Entwicklung des Gebäudesektors. Es erfolgt jedoch keine Kopplung an eine Aktivitätsgröße, sondern eine szenariobasierte Entwicklung des Verbrauchs.

²⁴ Keine Angaben zur Entwicklung der Beschäftigung in EU-T, THGND und IEW.

²⁵ Auch die Bevölkerungszahlen und -annahmen sind in diesen beiden Studien identisch.

3.2.2 Annahmen zu Produktionsmengen

Annahmen zu den Produktionsmengen werden in einigen Studien für ausgewählte Branchen als Aktivitätsgröße herangezogen und die Entwicklung des EEV in diesen Branchen an die Produktionsmengen gekoppelt. In Anhang 6.3 wurden sämtliche in den Studien enthaltene Produktionsdaten tabellarisch zusammengefasst. Anhand der Produktionszahlen können z.B. Effekte wie der Wechsel von primärer zu sekundärer Verfahrensrouten oder die Auswirkung einer Zunahme der Materialeffizienz in der Zementindustrie abgebildet werden.

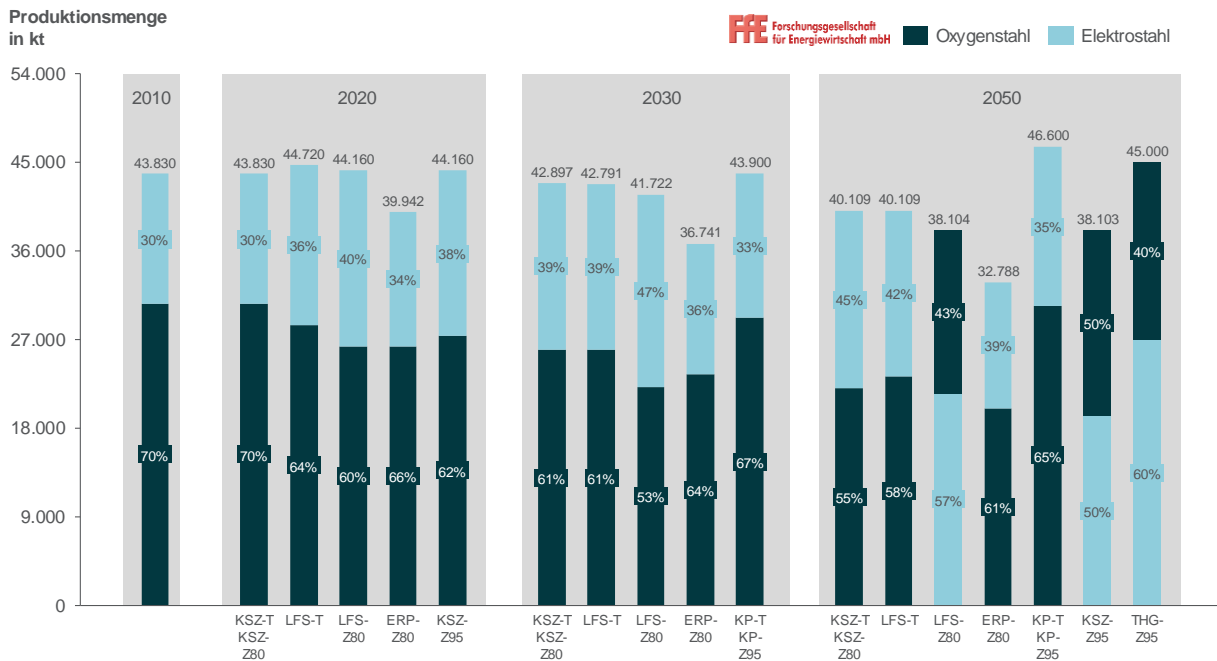


Abbildung 3-4: Produktionsmengen Elektro- und Oxygenstahl in kt für das Jahr 2010 bis 2050

Abbildung 3-4 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Produktionsmengen von Elektro- und Oxygenstahl in den Szenarien. In allen untersuchten Szenarien wächst der Anteil der Elektro Stahlproduktion an der gesamten Stahlproduktion im Vergleich zu 2010 an. Aufgrund des in den Studien in Zukunft deutlich geringeren Emissionsfaktors für Strom stellt der Verfahrensroutenwechsel eine THG-Verminderungsmaßnahme dar und führt folglich zu einer Reduktion der energie- und prozessbedingten Emissionen in der Metallerzeugung. Unterschiede hinsichtlich der Annahmen zur Entwicklung der Stahlnachfrage im Allgemeinen sowie der Schrottverfügbarkeit im Jahr 2050 führen dazu, dass der Anteil des Elektrostahts zwischen den Studien schwankt. So wird in KP angenommen, dass der Elektrostahtanteil auf maximal ~35 % (16,2 Mio. t) an der gesamten Stahlproduktion ansteigen kann. Auch das anvisierte THG-Verminderungsziel beeinflusst den Grad des Verfahrensroutenwechsels in den untersuchten Studien. In LFS und KSZ wird in den Szenarien mit höherem Klimaschutzambitionsniveau folglich ein höherer Elektrostahtanteil unterstellt, als in den weniger ambitionierten Szenarien. So zeigt Abbildung 3-4 auch, dass in LFS-Z80, KSZ-Z95 und THG-Z95 der Anteil des Elektrostahts im Jahr 2050 auf über 50 % ansteigt. Obwohl in IEW keine Produktionsmengen in die Modellierung einfließen, werden auch hier Annahmen zum Verfahrensroutenwechsel getroffen. Dabei wird bereits in IEW-T von einer Erhöhung des Elektrostahtanteils an der gesamten Stahlproduktion auf 40 % im Jahr 2050 ausgegangen. In den vier Zielszenarien steigt dieser Anteil auf 48 % im Jahr 2050.

Der Anteil des Sekundäraluminiums an der gesamten Aluminiumproduktion nimmt in allen Studien zu (in denen Produktionszahlen ausgewiesen werden). Es wird angenommen, dass aufgrund hoher Recyclingquoten die Schrottverfügbarkeit in Zukunft steigt und somit ein höherer Anteil des Aluminiumbedarfs über die weniger energieintensive Sekundäraluminiumproduktion gedeckt werden kann. In IEW wird von einem gleichbleibenden Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärroute bis 2050 ausgegangen, dieses wird jedoch nicht durch Produktionsmengen ausgedrückt.

Die Produktionszahlen spiegeln zudem den industriellen Strukturwandel, der bereits durch die Entwicklung der Bruttowertschöpfung (s. Abschnitt 3.2.1) gezeigt wird. Die Produktionszahlen in der energieintensiven Grundstoffindustrie sind mit Ausnahme der Grundstoffchemie und Aluminiumindustrie tendenziell rückläufig (s. z.B. Metallherzeugung, Verarbeitung von Steinen und Erden). Eine Ausnahme stellen KP und THGND dar, die bei der Stahlproduktion einen leichten Produktionsanstieg gegenüber der heutigen Produktionsmenge unterstellen. Auch in diesen beiden Studien wird jedoch ein Rückgang der Klinker- und Zementproduktion angenommen. Weitere Detailanalysen zu den Produktionszahlen können Anhang 6.3 entnommen werden.

3.2.3 Energieträger-, Strom- und CO₂-Preise

In den ausgewählten Studien werden sowohl Entwicklungen der (internationalen) Brennstoffpreise (auf unterschiedlichen Ebenen) als auch der Strompreise (auf unterschiedlichen Ebenen) getroffen. Zum Teil werden die Strompreise auch als Ergebnis der Szenarioanalysen ermittelt. Die Brennstoff- und Strompreise dienen auch dazu, wirtschaftliche Einsparpotenziale in der Industrie sowie Substitutionsmöglichkeiten zwischen Technologien bzw. zwischen Energieträgern zu ermitteln. Sie sind folglich ein zentraler Stellhebel für die Maßnahmenumsetzung in den untersuchten Szenarien.

Energieträgerpreise

Die Angaben in den Studien zu den Energieträgerpreisen sind in realen Preisen ausgeführt. Die Preisbasis in den Studien²⁶ variiert zwischen realen Werten in

- \$₂₀₁₀ bzw. €₂₀₁₀ in KSZ und LFS,
- \$₂₀₁₁ bzw. €₂₀₁₁ in ERP,
- \$₂₀₁₃ bzw. €₂₀₁₃ EU-T,
- \$₂₀₁₅ bzw. €₂₀₁₅ KP und
- \$₂₀₁₇ bzw. €₂₀₁₇ IEW.

Um die Angaben vergleichen zu können, werden die Angaben der Studien über den Preisindex für die Lebenshaltung (Verbraucherpreisindex) gemäß Statistischem Bundesamt auf die Preisbasis \$₂₀₁₆ bzw. €₂₀₁₆ vereinheitlicht (**Tabelle 3-2**).

Tabelle 3-2: Preisindex für die Lebenshaltung in Deutschland 2010 - 2017

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Preisindex für die Lebenshaltung in Deutschland	100	102,1	104,1	105,7	106,6	106,9	107,4	109,2

²⁶ In der Studie THGND wird keine ökonomische Bewertung vorgenommen, deshalb wird sie hier nicht betrachtet.

Die Ölpreisangaben in den Studien beziehen sich auf den

- Internationalen Rohölpreis in KSZ, ERP, KP, IEW und EU-T bzw. den
- Rohöl-Grenzübergangswert frei Deutschland in KSZ, ERP und LFS

Für die Erdgaspreise werden Grenzübergangswerte frei Deutschland ausgewiesen.

Die gewählte Vorgehensweise zur Vereinheitlichung der Studien hinsichtlich der internationalen Rohölpreise (s. **Tabelle 3-3**) führt zu Bandbreiten von 50,7 bis 121,1 \$₂₀₁₆/bbl in 2020 und 64,1 bis 137,5 \$₂₀₁₆/bbl in 2030 gegenüber 49,7 \$₂₀₁₆/bbl in 2015. Am langen Ende (2050) beträgt die Bandbreite 50,2 bis 209,4 \$₂₀₁₆/bbl. In den Studien wird, wie auch im World Energy Outlook 2016, eine starke Abhängigkeit der Rohölpreisentwicklung von den globalen Klimaschutzziele gesehen.

Tabelle 3-3: Studienvergleich bezüglich der internationalen Rohölpreise²⁷

	Internationale Rohölpreise in € ₂₀₁₆ /bbl						
	Historische Werte				Projektionen		
	2005	2011	2015	Status Quo 2017	2020	2030	2050
KSZ Alle Szenarien	58,8			51,7	110,6	137,5	209,4
ERP Alle Szenarien		113,0			123,1	130,4	134,6
KP-T, KP-Z80			49,7		79,4	111,5	115,5
KP-Z95			49,7		70,3	80,4	50,2
EU-T	58,8	113,0			88,4	111,7	132,1
IEW Alle Szenarien					50,7	64,1	54,2

Die gewählte Vorgehensweise zur Vereinheitlichung der Studien hinsichtlich der Rohöl-Grenzübergangswerte (s. **Tabelle 3-4**) führt zu Bandbreiten von 14,0 bis 17,5 €₂₀₁₆/GJ in 2020 und 17,2 bis 19,6 €₂₀₁₆/GJ in 2030 gegenüber 8,5 €₂₀₁₆/GJ in 2015. Am langen Ende (2050) beträgt die Bandbreite 20,1 bis 26,3 €₂₀₁₆/GJ. Obwohl in KSZ hinsichtlich der internationalen Rohölpreise deutlich höhere Werte angenommen werden, ist auf Ebene der Rohöl-Grenzübergangswerte der Unterschied weniger bedeutend, ohne dass dies näher ausgeführt wird.

Tabelle 3-4: Studienvergleich bezüglich der Rohöl-Grenzübergangswerte²⁸

	Rohöl-Grenzübergangswert in € ₂₀₁₆ /GJ						
	Historische Werte				Projektionen		
	2005	2011	2015	Status Quo 2017	2020	2030	2050
KSZ Alle Szenarien	8,7			8,3	14,0	17,3	26,3
ERP Alle Szenarien		14,9			17,5	19,6	22,4
LFS Alle Szenarien			8,5		16,2	17,2	20,1

Die gewählte Vorgehensweise zur Vereinheitlichung der Studien führt zu einem Verhältnis zwischen dem internationalen Rohölpreis und dem Erdgas-Grenzübergangswert frei Deutschland von nahe 2 (s.

²⁷ In der Studie THGND wird keine ökonomische Bewertung vorgenommen, deshalb wird sie hier nicht betrachtet.

²⁸ In der Studie THGND wird keine ökonomische Bewertung vorgenommen, deshalb wird sie hier nicht betrachtet. Die Studien KP und EU-T weisen keine Rohöl-Grenzübergangswerte für Deutschland aus.

Tabelle 3-5). Dies bedeutet eine Fortschreibung der Verhältnisse aus der Vergangenheit bei höheren Rohölpreisen. Lediglich in IEW und im Szenario „Globaler Klimaschutz“ aus KP wird langfristig eine Abkehr davon gesehen.

Tabelle 3-5: Studienvergleich bezüglich des Verhältnisses zwischen dem internationalen Rohölpreis und dem Erdgas-Grenzübergangswert frei Deutschland²⁹

	Verhältnis zwischen Rohölpreis (€ ₂₀₁₆ /MWh) und Gas-Grenzübergangswert (€ ₂₀₁₆ /MWh)					
	Historische Werte			Projektionen		
	2005	2011	2015	2020	2030	2050
KSZ Alle Szenarien	1,7			2,0	2,1	2,2
ERP Alle Szenarien		2,3		1,9	2,0	1,9
KP-T, KP-Z80			1,4	2,0	2,2	2,0
KP-Z95			1,4	2,0	1,8	1,1
EU-T	1,7	2,3		1,7	1,9	1,9
LFS ³⁰ Alle Szenarien			1,6	1,5	1,5	1,7
IEW				1,7	1,7	1,1

Strompreise

Die Angaben zu den Strompreisen in den Studien sind in realen Preisen ausgeführt. Die Preisbasis in den Studien³¹ variiert zwischen realen Werten in

- ct₂₀₁₀/kWh in KSZ und LFS,
- ct₂₀₁₁/kWh in ERP,
- ct₂₀₁₃/kWh in EU-T,
- ct₂₀₁₅/kWh in KP und
- ct₂₀₁₇/kWh in IEW.³²

Um die Angaben vergleichen zu können, werden die Angaben der Studien über den Preisindex für die Lebenshaltung gemäß Statistischem Bundesamt (Tabelle 3-2) auf die Preisbasis ct₂₀₁₆/kWh vereinheitlicht.

Die Preisangaben in den Studien beziehen sich auf

- die Kosten des Stromsystems in KP³³,
- Strompreise am Energy-only-Markt KSZ³⁴,
- den Börsenstrompreis in IEW,

²⁹ In der Studie THGND wird keine ökonomische Bewertung vorgenommen, deshalb wird sie hier nicht betrachtet.

³⁰ Werte basieren auf EU-T und wurden aus Abbildung 3 in Berichtsmodul 1 der Studie abgelesen.

³¹ In der Studie THGND wird keine ökonomische Bewertung vorgenommen, deshalb wird sie hier nicht betrachtet.

³² Annahme, dass hier die gleiche Preisbasis wie bei fossilen Energieträgerpreisen herangezogen wurde.

³³ Die Studie KP wird aufgrund der fehlenden Vergleichbarkeit im Folgenden aus dem Vergleich ausgeklammert.

³⁴ KSZ wird aufgrund der fehlenden Vergleichbarkeit im Folgenden aus dem Vergleich ausgeklammert.

- durchschnittliche Strompreise insgesamt in EU-T oder
- durchschnittliche Industriestrompreise in ERP und LFS

Um die Angaben zumindest teilweise vergleichen zu können, werden typische durchschnittliche Zu- und Abschläge zwischen den einzelnen Strompreisen ermittelt und mit abgezogen. Die Differenz zwischen dem durchschnittlichen Industriestrompreis und dem durchschnittlichen Strompreis betrug in den letzten Jahren nach Angaben des Statistischen Bundesamtes 4,5 ct₂₀₁₆/kWh. Diese Differenz wird von den ausgewiesenen durchschnittlichen Strompreisen insgesamt aus EU-T abgezogen, um auch für diese Studie durchschnittliche Industriestrompreise ausweisen zu können. In IEW wird die Annahme getroffen, dass die Endverbraucherpreise trotz Veränderungen im Börsenstrompreis bis 2050 nahezu konstant auf dem heutigen Niveau verbleiben. Der genaue Wert der für die Industriestrompreise herangezogen wird ist jedoch nicht dokumentiert.

Die gewählte Vorgehensweise zur Vereinheitlichung der Studien hinsichtlich der Strompreise in Deutschland für die Industrie (s. **Tabelle 3-6**) führt zu Bandbreiten von 12,8 bis 16,3 ct₂₀₁₆/kWh in 2020 und 12,6 bis 16,0 ct₂₀₁₆/kWh in 2030 gegenüber 11,0 ct₂₀₁₆/kWh in 2015. Am langen Ende (2050) beträgt die Bandbreite 11,1 bis 14,3 ct₂₀₁₆/kWh. Es ist dabei zu beachten, dass nicht in allen betrachteten Szenarien wesentliche nationale energie- und klima-politische Ziele erreicht werden.

Tabelle 3-6: Studienvergleich bezüglich der durchschnittlichen Industrie Strompreise³⁵

	Durchschnittliche Industrie-Strompreise in ct ₂₀₁₆ /kWh				
	Historische Werte		Projektionen		
	2010	2015	2020	2030	2050
ERP-T	10,43		15,23	15,01	13,96
ERP-Z80	10,43		16,28	15,96	14,28
LFS-T	10,43	11,04	13,00	12,57	11,06
LFS-Z80	10,43	11,04	14,71	15,36	13,32
EU-T	10,43		12,77	13,08	14,09
IEW	Konstant auf dem heutigen Niveau				

Für eine stärkere Elektrifizierung des Industriesektors ist das Verhältnis der Strompreise für die Industrie zu den Gaspreisen in der Industrie ein wichtiger Indikator. In den beiden Studien, für die ausreichende Informationen vorliegen³⁶, zeigt sich, dass sich das Verhältnis zu Gunsten des Stroms verändert (s. **Tabelle 3-7**). Insbesondere in ERP wird durch die unterstellte Einführung eines CO₂-Aufschlags auf die fossilen Brennstoffpreise der Stromeinsatz attraktiver.

Tabelle 3-7: Studienvergleich bezüglich des Verhältnisses der durchschnittlichen Industrie-Strompreise zu den Gaspreisen in der Industrie³⁷

Verhältnis der durchschnittlichen Industrie-Strompreise (ct ₂₀₁₆ /kWh) zu den Gaspreisen in der Industrie (ct ₂₀₁₆ /kWh)
--

³⁵ In THGND wird keine ökonomische Bewertung vorgenommen, deshalb wird sie hier nicht betrachtet. KSZ, IEW und KP weisen keine vergleichbaren Angaben aus. In IEW werden keine quantitativen Angaben zu Strompreisen ausgewiesen.

³⁶ In der Studie THGND wird keine ökonomische Bewertung vorgenommen, deshalb wird sie hier nicht betrachtet. KSZ, KP und EU-T weisen keine Gaspreise für die Industrie aus und werden deshalb aus dem Vergleich ausgeklammert.

³⁷ In THGND wird keine ökonomische Bewertung vorgenommen, deshalb wird sie hier nicht betrachtet. Die Studien KSZ, KP, EU-T und IEW weisen keine Gaspreise für die Industrie aus und werden deshalb aus dem Vergleich ausgeklammert.

	Historische Werte		Projektionen		
	2010	2011	2020	2030	2050
ERP-T		3,27	3,37	2,55	1,82
LFS-T	3,46		2,69	2,54	2,24
LFS-Z80	3,46		3,04	3,11	2,70

CO₂-Preise

Die ausgewählten Studien³⁸ nehmen sich dem Thema Klimaschutz intensiv an. In Szenarien wird versucht, die derzeit implementierten bzw. die absehbaren Politiken aufzunehmen und in Abschätzungen für die Entwicklung der Preise im europäischen Emissionshandelssystem (EU ETS) und darüber hinaus umzusetzen. Werden die sich auf unterschiedliche Preisbasen beziehenden ausgewiesenen CO₂-Zertifikatspreise über den Preisindex für die Lebenshaltung vergleichbar gemacht, so ergeben sich für die Trendszenarien Bandbreiten der CO₂-Zertifikatspreise im Jahr 2050 zwischen 32 und 91 €₂₀₁₆/tCO₂ (s. **Tabelle 3-8**). Diese CO₂-Preishöhe reicht jedoch in allen Szenarien nicht aus, um die energie- und klimapolitischen Ziele in Deutschland erreichen zu können. Zur Zielerreichung bedarf es nach Einschätzung der Studien höherer CO₂-Preise, auch über den sektoralen Rahmen des heutigen EU ETS hinaus. Für das Ziel einer Minderung der THG-Emissionen in Deutschland bis 2050 um 80 % ggü. 1990 werden CO₂-Preise zwischen 59 und 140 €₂₀₁₆/tCO₂ für notwendig erachtet, für das Ziel einer Minderung um 95 % bis 2050 ggü. 1990 sind sogar bis zu 215 €₂₀₁₆/tCO₂ angesetzt.³⁹

Tabelle 3-8: Studienvergleich bezüglich der CO₂-Zertifikatspreise⁴⁰

	CO ₂ -Zertifikatspreise* in € ₂₀₁₆ /t				
	Historische Werte		Projektionen		
	2010	2015	2020	2030	2050
ERP-T	16,1		10,5	42,1	79,9
ERP-Z80	16,1		28,4	55,8	101,0
KSZ-T	16,1		15,0	32,2	53,7
KSZ-Z80	16,1		24,7	53,7	139,6
KSZ-Z95	16,1		32,2	93,4	214,8
KP-T, KP-Z80		8,0	11,1	26,1	45,2
KP-Z95		8,0	18,1	55,3	124,6
LFS-T	16,1	8,0	10,7	16,1	32,2
LFS-Z80	16,1	8,0	10,7	37,6	107,4
EU-T	16,1		15,2	35,6	91,4
IEW			7,9	30,5	59

3.2.4 Carbon Leakage, Biomassepotenzial und CCS/CCU

In diesem Abschnitt werden die Annahmen der Studien hinsichtlich des Carbon Leakage Schutzes, des Biomassepotenzials und CCS bzw. CCU zusammengefasst. Eine ausführliche Diskussion zum Einsatz von Biomasse und CCS in der Industrie kann Abschnitt 3.3 entnommen werden.

Carbon Leakage Schutz

Angaben zum Carbon Leakage Schutz sind in IEW, KP, LFS, EU-T und ERP verfügbar. In LFS wird zur Vermeidung von Carbon Leakage international ein ähnliches klimapolitisches Ambitionsniveau in den Szenarien wie in Deutschland angenommen. In ERP wird die Abwanderung der CO₂-intensiven Industrie durch die Kopplung des EU ETS mit internationalen Klimaschutzanstrengungen verhindert. IEW geht davon aus, dass ausreichend Schutzmaßnahmen eingesetzt werden, um Carbon Leakage zu verhindern. In KP wird ein Carbon Leakage Schutz nur für das Referenzszenario und das auf nationalen

³⁸ In THGND wird keine ökonomische Bewertung vorgenommen, deshalb wird sie hier nicht betrachtet.

³⁹ Dies liegt u.a. an der amortisationszeit-gebundenen Maßnahmenumsetzung im FORECAST-Modell. Durch hohe CO₂-Preise werden fossile Referenztechnologien schlechter gestellt und somit die Amortisationszeit von Klima-Maßnahmen reduziert. Da in KSZ-Z95 eine 95 %-ige THG-Reduktion angestrebt wird, bedarf es auch im Industriesektor einer sehr starken Maßnahmenumsetzung. Diese wird modellseitig auch durch einen hohen CO₂-Preis erzielt.

⁴⁰ In THGND wird keine ökonomische Bewertung vorgenommen, deshalb wird sie hier nicht betrachtet.

Alleingängen basierende 80 % THG-Reduktionsszenario (KP-Z80) vorausgesetzt. In KP-T und KP-Z80 verhindert der Carbon-Leakage-Schutz die Belastung der Industrie mit direkten und indirekten CO₂-bedingten Mehrkosten aus dem EU ETS über dem heutigen Niveau. Dies spiegelt die Annahme wieder, dass ein Carbon Leakage Schutz lediglich bei nationalen Alleingängen ohne Klimaschutzkooperation, nicht aber bei einem weitestgehend klimapolitischen Konsens erforderlich ist.

In THGND wird eine mögliche Abwanderung der Industrie in das Ausland nicht direkt diskutiert. Da es sich hier um eine technische Machbarkeitsstudie handelt, die untersucht wie das heutige System verändert werden muss, um eine 95%-ige Treibhausgasreduktion ggü. 1990 zu erzielen, wird ein Verbleiben der Industrie unterstellt. Da in KSZ die Abwanderung industrieller Produktionsstätten nicht direkt diskutiert wird, ist anzunehmen, dass die Ziele auch in den ambitionierten 80 %- und 95 %-Szenarien nicht durch eine Verlagerung der Industrieemissionen in das Ausland erreicht werden.

Biomassepotenzial

Die Höhe des angenommenen Biomassepotenzials hat direkten Einfluss auf die Zusammensetzung der Maßnahmen zur THG-Verminderung im Industriesektor, da mit höherem Potenzial auch die Nutzung der Biomasse steigt. Dieser Zusammenhang ist bedingt durch die relativ geringen Kosten der THG-Verminderung infolge des Biomasseeinsatzes im Vergleich zu anderen Verminderungsoptionen. Diese kommen u.a. dadurch zustande, dass Biomasse in der Logik der Treibhausgasinventare CO₂-neutral bilanziert wird und häufig ohne größere Anpassungen der existierenden Infrastruktur eingesetzt werden kann.

Die limitierte Verfügbarkeit der Biomasse in Deutschland ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen. So sind für die Herstellung von Biomasse begrenzte Anbauflächen in Deutschland vorhanden. Anbaubiomasse weist eine unverhältnismäßig hohe Flächenintensität im Vergleich zu anderen Erneuerbaren Energiequellen auf. Ein verstärkter Anbau von Biomasse kann ferner negative Konsequenzen auf Wasser, Boden und Biodiversität haben. Die Verwendung von Biomasse zur energetischen Nutzung ist wegen der sozioökonomisch problematischen Verknüpfung mit den Nahrungsmittelpreisen am Weltmarkt umstritten. **Tabelle 3-9** fasst die Biomassepotenziale in den Szenarien zusammen. Die Nutzung der Biomasse wird in Abschnitt 3.3.7 analysiert.

Tabelle 3-9: Biomassepotenzial in den untersuchten Szenarien

Studien und Szenarien		Inländisches Biomassepotenzial (BP) in PJ/a
ERP	ERP-T	BP** ≥ 1506
	ERP-Z80	1700
KSZ	KSZ-T	1211
	KSZ-Z80	1223
	KSZ-Z95	1131
LFS	LFS-T	1103
	LFS-Z80	1103
KP	KP-T	< 1300
	KP-Z80	1.254 > BP < 1300
	KP-Z95	1.248 > BP < 1300
IEW	Alle Szenarien	943

Die inländischen Biomassepotenziale werden in den Studien IEW, KP, LFS, KSZ und ERP als exogene Eingangsgröße für die Modellierung vorgegeben. Zur Erhebung werden in LFS und KSZ Studienanalysen und plausibilisierte Annahmen zur Flächennutzung herangezogen. In KP werden die Erkenntnisse aus KSZ übernommen. In IEW basiert die Größe auf eigenen Berechnungen, die auf Basis von Expertenbefragungen umgesetzt wurden.

Das inländische Biomassepotenzial in ERP für das Jahr 2050 lässt sich aus dem Zielszenario der Studie ableiten. Hierbei werden 1915 PJ Biomasse genutzt. 215 PJ müssen importiert werden. Hieraus kann ein inländisches Biomassepotenzial von 1700 PJ für das Zielszenario abgeleitet werden. Für das Trendszenario wird kein inländisches Biomassepotenzial angegeben. Da jedoch 1506 PJ Biomasse im Trendszenario ohne Importe genutzt werden, ist von einem ähnlich hohen Potenzial auszugehen. Wie sich dieses vergleichsweise hohe inländische Biomassepotenzial ergibt, verbleibt unklar.⁴¹

In LFS wird zur Erfassung des Biomassepotenzials zunächst das Flächenpotenzial und der Energieertrag des Flächenpotenzials literarisch erfasst bzw. plausibel abgeschätzt. Hieraus wird das energetische Potenzial der Anbaubiomasse berechnet. Zudem werden die energetische Nutzung von Rest- und Abfallstoffe berücksichtigt. Aus diesen beiden Posten ergibt sich das inländische Biomassepotenzial.

In KSZ werden zunächst inländisch nachhaltig nutzbare Biomassepotenziale für das Jahr 2050 erfasst. Für jedes Szenario werden unterschiedliche Annahmen getroffen. Das niedrigere Biomassepotenzial in KSZ-Z95 ist einem starken Rückgang der energetischen Nutzbarkeit nachwachsender Rohstoffe (NaWaRo) geschuldet⁴². Zudem werden in den Szenarien KSZ-T und KSZ-Z80 starke Ertragssteigerung durch fortschrittlichere Verfahren und Veränderung der Anbausorten unterstellt, die in KSZ-Z95 aufgrund der Reduzierung des Stickstoffeintrags in Böden geringer ausfällt. In KSZ ergeben sich wie auch in KP und LFS deutlich niedrigere inländische Biomassepotenziale im Vergleich zu ERP.

CCS

Die Annahmen zur Verfügbarkeit von CCS als Option zur Treibhausgasverminderung in der Industrie beeinflussen den Maßnahmenmix der Szenarien, die eine 95 %-ige THG-Verminderung bis 2050 ggü. 1990 anstreben. Steht CCS als Option zur Verfügung, tritt diese in Konkurrenz zu anderen Verminderungsmaßnahmen. CCS wird lediglich in sieben der 17 untersuchten Szenarien als Option in Betracht gezogen (IEW-Z95-EL, IEW-Z95-TM, KSZ-Z95, LFS-T, LFS-Z80, KP-Z95 und EU-T). Weitere Details zum Einsatz von CCS können Abschnitt 3.3.6 entnommen werden.

3.3 Entwicklung der Kerngrößen und maßgebliche Einflussfaktoren

In diesem Abschnitt wird die in den Studien ausgewiesene Entwicklung der Kerngrößen analysiert. Zunächst werden die THG-Emissionen (Abschnitt 3.3.1) und der EEV (Abschnitt 3.3.2) untersucht. Hierbei werden insbesondere die Entwicklung der Kerngrößen bis 2050 und die Unterschiede zwischen den Trend- und Zielszenarien thematisiert. In den Abschnitten 3.3.3 bis 3.3.8 werden die zentralen Maßnahmen diskutiert, die in den Studien zu einer Verminderung der THG-Emissionen führen. Jeder Abschnitt wird mit einer Kernaussage eingeleitet, die sich aus der Studienanalyse für das jeweilige Themengebiet ergibt. Diese Kernaussagen werden anschließend qualitativ und quantitativ begründet und erläutert. Die nachfolgende Tabelle zeigt die identifizierten Kernaussagen.

Tabelle 3-10: Zusammenfassung der Kernaussagen

Kerngröße Maßnahme	Abschnitt	Kernaussage
Treibhausgasemissionen	3.3.1	In den Zielszenarien, die eine THG-Verminderung um 95 % ggü. 1990 erzielen, werden die Industrieemissionen nahezu vollständig reduziert. In den Trend- und 80 %-Zielszenarien, beträgt die THG-Verminderung im Industriesektor ggü. 1990 zwischen 45 % und 82 %. In keiner der analysierten Studien werden prozessbedingte Emissionen vollständig vermindert.
Endenergieverbrauch	3.3.2	Die Reduktion des Endenergieverbrauchs, insbesondere des Stromverbrauchs, ist nicht in allen Zielszenarien als Ziel gesetzt. Die Reduktion des EEV ist zum Teil nur Mittel zum Zweck, um den durch die Umsetzung von Power-to-X (PtX) Maßnahmen steigenden Strombedarf (und damit den EE-Ausbau) und den Import synthetischer Brennstoffe zu begrenzen. In den meisten Zielszenarien ist der

⁴¹ Es ist davon auszugehen, dass die Potenzialschätzung auf dem zum damaligen Zeitpunkt aktuellen Erkenntnisstand beruht. Nach 2014 wurden diverse Biomassepotenzialstudien durchgeführt die dazu führten, dass die Potenzialabschätzungen in den aktuelleren Studien nach unten korrigiert wurden. Siehe z.B. den Biomasseexkurs aus KSZ.

⁴² Der Rückgang ist auf eine Ausweitung des Öko-Landbaus und der verstärkten Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen im Landnutzungsbereich zurückzuführen.

		Rückgang des Endenergieverbrauchs dennoch ausgeprägter als in den Trendszenarien.
Energie- und Materialeffizienz	3.3.3	Alle untersuchten Szenarien setzen auf inkrementelle Verbesserungen der Energie- und Materialeffizienz bis 2050. Technologiesprünge werden in den Szenarien nicht angenommen. Energieeffizienzmaßnahmen allein sind unzureichend für eine Reduktion der THG-Emissionen um 95 %, aber Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Energiewende in der Industrie.
Synthetische Brennstoffe	3.3.4	Der Einsatz synthetischer Brennstoffe in der Industrie erfolgt in drei der analysierten Studien (IEW, KP, THGND). Wird kein CCS zugelassen und dennoch eine fast vollständige Defossilisierung angestrebt, steigt der Einsatz synthetischer Brennstoffe in der Industrie drastisch.
Power-to-Heat	3.3.5	In den ambitionierteren Klimaschutzszenarien ist Power-to-Heat sowohl als Flexibilitäts- als auch als Bereitstellungsoption erneuerbarer Wärme erforderlich. Durch neue Verbraucher wie Power-to-Heat steigt der Anteil des Stromverbrauchs am industriellen Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2050 auf bis zu 69 % (IEW). Im Jahr 2014 betrug dieser Anteil 32 %.
Carbon Capture and Storage	3.3.6	In vier der fünf analysierten 95 %-Szenarien wird die signifikante Reduktion der prozessbedingten Emissionen nur durch den Einsatz von CCS erzielt. CCS stellt insbesondere für die Industrie eine bedeutende Option zur Senkung der Emissionen dar.
Biomasse	3.3.7	Biomasse ist nicht unbegrenzt verfügbar. Daher steigt aufgrund der bereits heute hohen Nutzung die zukünftige Verwendung von Biomasse in den meisten Szenarien nicht wesentlich an. Aufgrund des sektorübergreifend bilanziell hohen THG-Verminderungspotenzials von Biomasse, bestehen intersektorale Nutzungskonkurrenzen. In den Szenarien findet meist eine Verschiebung der Biomassenutzung vom Energie-/Umwandlungssektor in den Industriesektor statt.
Eigenerzeugung	3.3.8	Die Eigenerzeugung durch Industriekraftwerke wird in den Studien nicht ausgewiesen.

3.3.1 Treibhausgasemissionen

In den Zielszenarien, die eine THG-Vermindeung um 95 % ggü. 1990 erzielen, werden die Industrieemissionen nahezu vollständig reduziert. In den Trend- und 80 %-Zielszenarien, beträgt die THG-Vermindeung im Industriesektor ggü. 1990 zwischen 45 % und 82 %. In keiner der analysierten Studien werden prozessbedingte Emissionen vollständig vermindert.

Abbildung 3-5 zeigt die Entwicklung der energiebedingten CO₂-Emissionen in den untersuchten Szenarien für die gesamte deutsche Volkswirtschaft. Im Jahr 2030 ergibt sich ein Delta von ca. 300 Mio. t_{CO2}-Äq zwischen dem Trendszenario mit der geringsten (EU-T) und dem Zielszenario mit der höchsten (KSZ-Z95) THG-Reduktion in diesem Stützjahr. In EU-T wird davon ausgegangen, dass Deutschland bis 2030 eine im europäischen Vergleich überdurchschnittlich hohe THG-Vermindeung von 38 % ggü. 1990 erzielt. Eine stärkere Vermindeung der THG-Emissionen wird in diesem Szenario nicht erzielt, da lediglich EU-Direktiven berücksichtigt werden, die bis Dezember 2014 verabschiedet wurden. Laufen die in den Direktiven verabschiedeten Fördermaßnahmen aus, so wird keine Erneuerung angenommen (z.B. RES directive). In KSZ-Z95 hingegen wird angenommen, dass die nationale deutsche 2030 Zielvorgabe von 55 % THG-Vermindeung ggü. 1990 erreicht wird. Der Vergleich zeigt zum einen den deutlichen Unterschied zwischen Trend- und Zielszenarien. Zum anderen wird deutlich, dass die Vergleichbarkeit der Szenarien aufgrund sehr heterogener Annahmen und Zielstellungen nur eingeschränkt möglich ist. Es wird jedoch sichtbar, dass für eine nahezu vollständige Dekarbonisierung die bereits beschlossenen Maßnahmen bei weitem nicht ausreichen. Demnach ist ein noch stärkerer jährlicher Rückgang der Emissionen erforderlich, als dies in der Vergangenheit der Fall war.

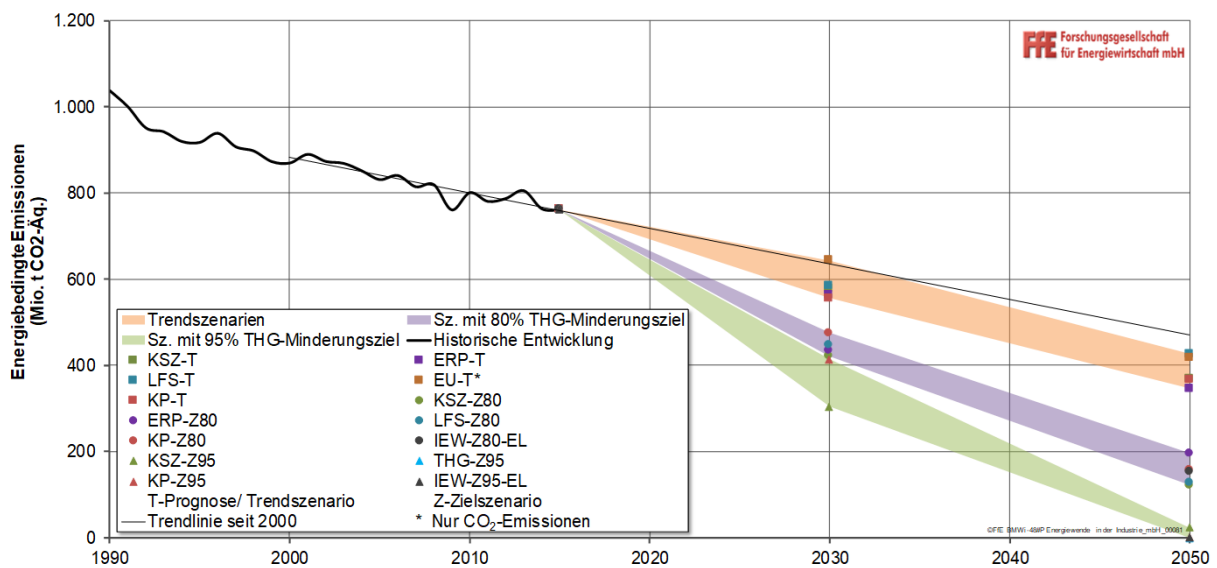


Abbildung 3-5: Entwicklung der energiebedingten THG-Emissionen in Deutschland bis 2050 in Mio. t CO₂-Äq.

Im Jahr 2050 liegt die ausgewiesene THG-Vermindeung in KP-T unter der in ERP-T. Der Vergleich zwischen dem ältesten (ERP-T; 2014) und dem aktuellsten (KP-T; 2018) der hier analysierten Trendszenarien deutet darauf hin, dass die Entwicklung der THG-Emissionen in den vergangenen Jahren eine Neubewertung der im Trend erreichbaren THG-Vermindeung erforderlich gemacht hat.⁴³ Beim Vergleich der Szenarien muss jedoch die Intention der Autoren bei der Erstellung berücksichtigt werden. In beiden Szenarien wird die aus Sicht der Autoren wahrscheinliche Entwicklung der Energiemärkte dargestellt. Bei genauerer Betrachtung ergeben sich jedoch feine Unterschiede in der Grundausrichtung. In ERP-T wird davon ausgegangen, dass die „(...) energie- und

⁴³ Ein Vergleich mit dem Trendszenario aus IEW ist in diesem Fall nicht möglich, da die energiebedingten Emissionen nicht separat ausgewiesen werden.

klimaschutzpolitischen Anstrengungen weiter verschärft werden und die Politik auf Anzeichen der Zielverfehlung reagiert.“ In KP-T wird ebenfalls angenommen, dass „(...) zusätzliche Anstrengungen im Vergleich zur heutigen Situation (...)“ getätigt werden. Es wird jedoch, von einer „(...) konservativen Entwicklung der Gesetzgebung (...)“ ausgegangen. Hinzu kommt, dass ERP-T nur bis zum Jahr 2030 die wahrscheinlichste Entwicklung angibt und diese Entwicklung dann bis 2050 fortschreibt. Inwiefern die Unterschiede bei der THG-Verminderung aufgrund neu gewonnener Erkenntnisse zwischen Erstellung von KP-T und ERP-T oder aufgrund unterschiedlicher Intentionen zurückzuführen sind, kann nicht exakt beziffert werden.

In Bezug zu den hier analysierten Zielszenarien ist vor allem die auffällig geringe Lücke zwischen den beiden „Entwicklungstrichtern“ für die 80 % und 95 %-THG Verminderungsziele im Jahr 2030 aufschlussreich. Diese wird vor allem durch Szenarien KSZ-Z80 und KP-Z95 hervorgerufen. Obwohl KP-Z95 eine ambitioniertere Zielstellung als KSZ-Z80 für das Jahr 2050 verfolgt, wird aufgrund der fehlenden Zielbindung im Jahr 2030 eine nahezu identische THG-Verminderung (60,0 % vs. 59,3 % ggü. 1990) erreicht.

Auffällig ist zudem, dass ERP-Z80 zwar die nationalen Ziele im Jahr 2030 verfehlt, jedoch eine um 10 % stärkere THG-Verminderung im Vergleich zu KP-Z80 erreicht. Aus den in den Studien angegebenen Daten ist ein Rückschluss auf die genauen Gründe für diesen Unterschied zwar nicht möglich. Auch an dieser Stelle ist eine Neubewertung der bis 2030 erzielbaren THG-Verminderung aus heutiger Sicht jedoch die naheliegende Begründung.

Ein ähnliches Bild gibt **Abbildung 3-6** wieder, in der die Entwicklung der energiebedingten THG-Emissionen in der deutschen Industrie bis 2050 gezeigt wird. Dabei ist im Vergleich zu Abbildung 3-5 vor allem die geringere Breite der Entwicklungstrichter im Jahr 2030 und die Häufung der Studien zwischen 80 und 100 Mio. tCO₂-Äq erkennbar. Beide Aspekte sind Indizien dafür, dass die meisten Szenarien nur einen geringen Spielraum bei THG-Verminderungen im Industriesektor bis 2030 sehen.

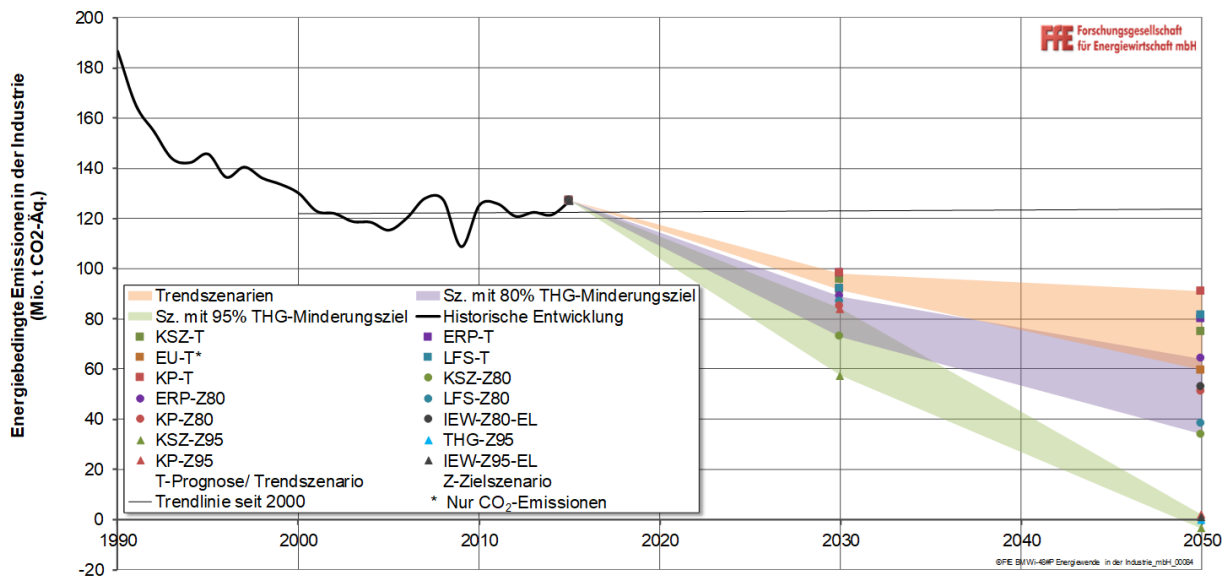


Abbildung 3-6: Entwicklung der energiebedingten THG-Emissionen in der deutschen Industrie bis 2050 in Mio. t CO₂-Äq.

Der umgekehrte Fall gilt für die Trend- und 80 %-Zielszenarien im Jahr 2050. Die von der Industrie erzielte THG-Verminderung unterscheidet sich deutlich zwischen den Szenarien. So werden z.B. in IEW-Z80-EL und KP-Z80 höhere THG-Verminderungen erzielt als in ERP-Z80. Eine genaue Identifikation der Gründe ist auch an dieser Stelle nicht möglich. Letztlich deutet die Breite der Trichter darauf hin, dass der Beitrag den der Sektor Industrie leisten kann und leisten muss in den Trend- und 80 %-Zielszenarien sehr unterschiedlich bewertet wird.

Für die 95 %-Zielszenarien gilt, dass auch im Industriesektor die energiebedingten THG-Emissionen fast vollständig vermieden werden müssen (s. grüner Trichter in Abbildung 3-6). In KSZ-Z95 werden aufgrund einer Kombination aus Biomassenutzung und CCS negative energiebedingte Emissionen erzielt.

Abbildung 3-7 visualisiert den Verlauf der prozessbedingten Emissionen im Industriesektor bis 2050. Die Unsicherheit hinsichtlich der Entwicklung der prozessbedingten Emissionen wird durch die zahlreichen Überschneidungen der Entwicklungstrichter deutlich.

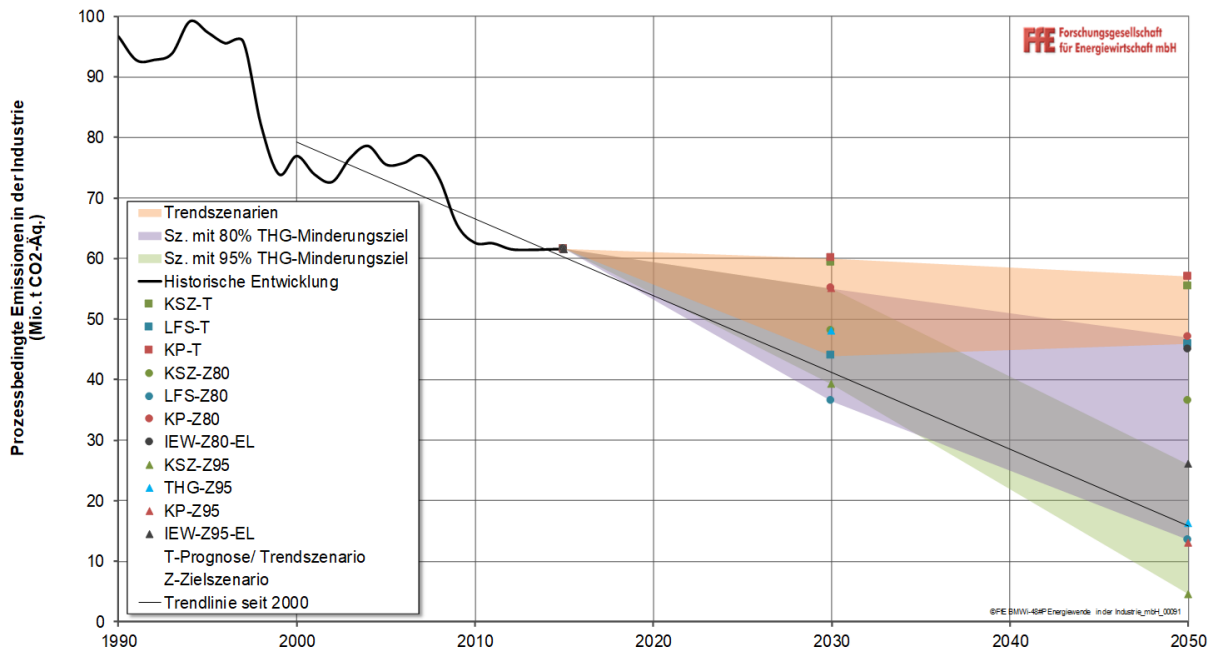


Abbildung 3-7: Entwicklung der prozessbedingten THG-Emissionen in der deutschen Industrie bis 2050 in Mio. t CO₂-Äq.⁴⁴

So gehen bspw. die Zielszenarien KP-Z95, KP-Z80, THG-Z95 und KSZ-Z80, aber auch die Trendszenarien KSZ-T, EU-T und KP-T von einer geringeren Reduktion der prozessbedingten Emissionen im Jahr 2030 aus als LFS-T. Dies wirkt auf den ersten Blick erstaunlich, da die starke Reduktion prozessbedingter Emissionen in LFS-T nicht explizit thematisiert wird. Aufgrund eines leichten Anstiegs der Emissionen von LFS-T bis zum Jahr 2050 ggü. 2030 nähern sich die Prozessemission von LFS-T bis 2050 den Werten der beiden anderen Trendszenarien KSZ-T und KP-T.

Abbildung 3-7 zeigt weiterhin, dass in keinem der hier untersuchten Szenarien eine vollständige Reduktion der prozessbedingten Emissionen erfolgt. Die 95 %-Zielszenarien erfordern jedoch eine deutliche Reduktion der prozessbedingten Emissionen. In Bezug auf die Maßnahmenumsetzung, die zu einer Reduktion der prozessbedingten THG-Emissionen führt, ist insbesondere der Unterschied zwischen den 80 %- und 95 % Zielszenarien aufschlussreich. In sämtlichen untersuchten Szenarien wird diese zusätzlich erforderliche THG-Verminderung v.a. durch die verstärkte Nutzung synthetischer Brennstoff (THG-Z95) und/oder CCS ermöglicht (KSZ-Z95, IEW-Z95-EL&TM und KP-Z95). Dabei wird in IEW-Z95-EL eine geringere Verminderung prozessbedingter Emissionen im Vergleich zu den anderen untersuchten 95 %-Zielszenarien und LFS-Z80 erzielt, obwohl CCS zum Einsatz kommt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in IEW CCS als letzte mögliche Verminderungsoption eingesetzt wird, um die zur Zielerreichung verbleibende Lücke von 16 Mio. t CO₂ zu schließen und darüber hinaus keine zusätzliche Emissionsverminderung erfolgt.

⁴⁴ In ERP-T und ERP-Z80 werden keine prozessbedingten Emissionen berücksichtigt. Diese sind hier folglich nicht enthalten.

3.3.2 Endenergieverbrauch

Die Reduktion des Endenergieverbrauchs, insbesondere des Stromverbrauchs, ist nicht in allen Zielszenarien als Ziel gesetzt. Die Reduktion des EEV ist zum Teil nur Mittel zum Zweck, um den durch die Umsetzung von Power-to-X (PtX) Maßnahmen steigenden Strombedarf (und damit den EE-Ausbau) und den Import synthetischer Brennstoffe zu begrenzen. In den meisten Zielszenarien ist der Rückgang des Endenergieverbrauchs dennoch ausgeprägter als in den Trendszenarien.

Abbildung 3-8 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Deutschland bis 2050. In den analysierten Studien sinkt der EEV kontinuierlich bis 2050. Der Reduktion des EEV wird jedoch nicht in allen Zielszenarien die gleiche Bedeutung zugeschrieben. In KSZ-Z80 und KSZ-Z95 wird zur Verminderung der THG-Emissionen vor allem auf die Umsetzung von Energie- und Materialeffizienzmaßnahmen und somit auf die Reduktion des Endenergieverbrauchs gesetzt. In diesen Szenarien wird für 2030 und 2050 ein geringerer EEV ausgewiesen als in den übrigen untersuchten Szenarien. So werden z.B. in KP-Z95, IEW-Z95-EL&TM zwar inkrementelle Energieeffizienzmaßnahmen umgesetzt, zur Verminderung der THG-Emissionen werden jedoch Maßnahmen implementiert die nicht zwangsläufig zu einer Reduktion des EEV führen (Substitution fossiler Endenergieträger durch synthetische Brennstoffe, Biomasse und/oder Strom sowie der Einsatz von CCS).

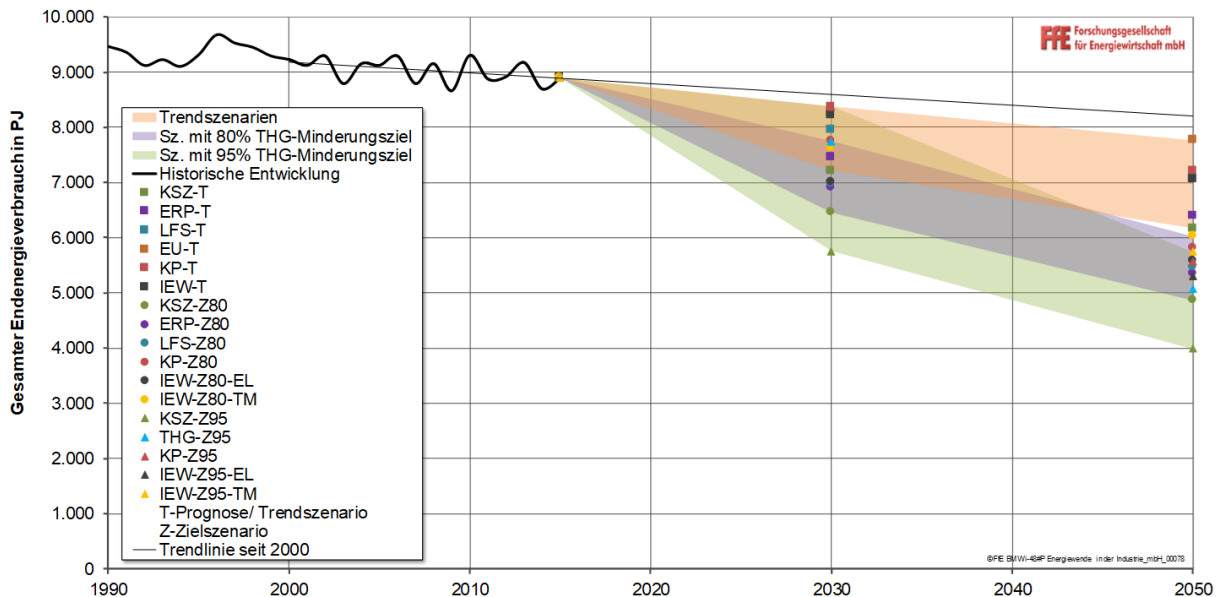


Abbildung 3-8: Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Deutschland bis 2050 in PJ

Abbildung 3-9 zeigt, dass mit Ausnahme von IEW-Z95-EL in allen untersuchten Studien bis 2050 zwischen den Ziel- und Trendszenarien eine Reduktion des industriellen EEV stattfindet. Die Bedeutung der Reduktion des industriellen EEV (insbesondere des Stromverbrauchs) zur Verminderung der THG-Emissionen hat in den Szenarien IEW-Z80-EL&TM, LFS-Z80 und KP-Z80 gegenüber ERP-Z80 und KSZ-Z80 sowie IEW-Z95-EL&TM und KP-Z95 ggü. KSZ-Z95 abgenommen. Ausschlaggebend für den Unterschied sind die verstärkte Nutzung von Biomasse und Power-to-Heat (PtH) in KP-Z80 und LFS-Z80 im Vergleich zu ERP-Z80 und KSZ-Z80. Für IEW-Z80-EL im Vergleich zu ERP-Z80 und KSZ-Z80 führt der Einsatz von PtH und die Nutzung von elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff in der Ammoniak- und Ethylenherstellung und dem damit verbundenen Anstieg des Stromverbrauchs sogar zu einem Anstieg des Endenergieverbrauchs bis 2050. In IEW-Z80-TM wird auf die Emissionsreduktion durch Energieträgerwechsel weg von Kohle und Öl und hin zu Erdgas gesetzt.

In KP-Z95 nimmt der EEV im Vergleich zu KP-Z80 zu, obwohl in KP-Z95 eine stärkere THG-Verminderung erzielt wird. Diese Zunahme resultiert aus einer Steigerung des Stromverbrauchs und des Biomasseeinsatzes um 88 PJ bzw. 82 PJ. Der höhere Stromverbrauch ist primär auf den Einsatz der CCS Technologie zurückzuführen (s. Abschnitt 3.3.6). Die Biomasse substituiert fossile Endenergieträger im Bereich der Nieder- und Mitteltemperatur-Prozesswärme. In KP-Z95 wird folglich

ein höherer EEV erzielt als in KSZ-Z95. Die Reduktion der THG-Emissionen um 95 % ggü. 1990 wird in diesem Fall auch ohne eine signifikante Reduktion des EEV erreicht.

Auch in IEW-Z95-EL und IEW-Z95-TM werden die Ziele zur Emissionsreduktion erreicht, obwohl im Vergleich zum EEV im Jahr 2015 keine signifikante Verringerung des industriellen EEV und in IEW-Z95-EL sogar eine Erhöhung zu erkennen ist. Dabei steht vor allem die Substitution fossiler Energieträger durch Strom, Wasserstoff und weitere synthetische Energieträger sowie Biomasse im Vordergrund. In beiden Szenarien unterlaufen verschiedene industrielle Produktionsprozesse (z.B. Stahl, Ammoniak und Ethylen) signifikante strukturelle Änderungen, die in Kombination mit Veränderung auf der Bereitstellungsseite zu einer Emissionsverminderung, nicht jedoch zu einer Reduktion des EEV führen. In den Szenarien wird zudem ein zeitweiser Anstieg des Stromverbrauchs aufgrund der Nutzung von CCS zur Verminderung prozessbedingter Emissionen in Kauf genommen.

Endenergieverbrauch 2050
in PJ

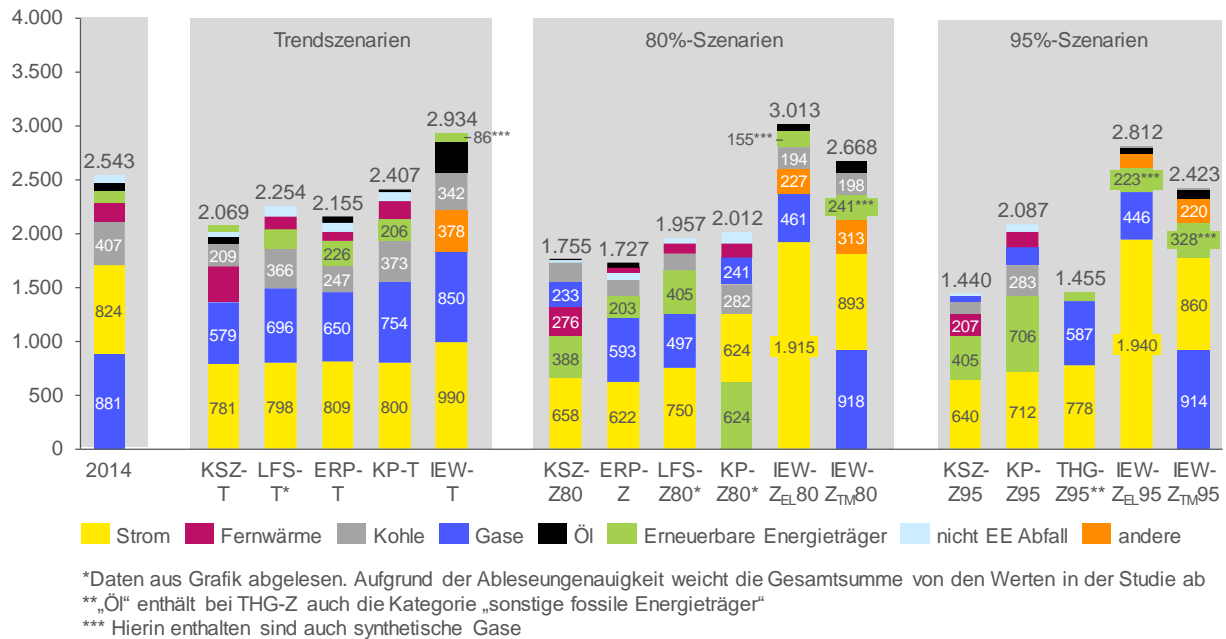


Abbildung 3-9: Endenergieverbrauch Industrie nach Energieträgern, 2050, PJ

In THG-Z95 wird die Verminderung der THG-Emissionen in der Industrie primär durch den Einsatz synthetischer Brennstoffe, eine verstärkte Elektrifizierung industrieller Prozesse sowie Energie- und Materialeffizienzmaßnahmen erzielt. CCS und der verstärkte Einsatz von Biomasse werden als Lösungsoptionen in THG-Z95 nicht in Betracht gezogen. Es erfolgt somit eine Reduktion des EEV auf das Niveau von KSZ-Z95. Im Vergleich zu KSZ-Z95 sind in THG-Z95 im Jahr 2050 jedoch keine fossilen Energieträger im EEV-Mix enthalten, da der Einsatz von CCS untersagt ist und die energiebedingten Emissionen zur Erreichung des 95 %-Ziels in diesem Szenario auf null sinken müssen. In Abbildung 3-9 wird der Verbrauch synthetischer Kraftstoffe in THG-Z95 unter „Gase“ bilanziert (587 PJ, Jahr 2050)

3.3.3 Energie- und Materialeffizienz

Alle untersuchten Szenarien setzen auf inkrementelle Verbesserungen der Energie- und Materialeffizienz bis 2050. Technologiesprünge werden in den Szenarien nicht angenommen. Energieeffizienzmaßnahmen allein sind unzureichend für eine Reduktion der THG-Emissionen um 95 %, aber Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Energiewende in der Industrie.

Die Analyse in Abschnitt 3.3.2 zeigt, dass die Reduktion des EEV durch Umsetzung von Energie- und Materialeffizienzmaßnahmen in den Szenarien unterschiedlich stark ausgeprägt ist. In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Annahmen zur Entwicklung der Energie- und Materialeffizienz zusammengefasst. Branchenspezifische Maßnahmen werden in Abschnitt 3.4 untersucht.

Von den analysierten Szenarien weisen lediglich IEW und KSZ den Beitrag der Energie- und Materialeffizienzmaßnahmen zur Reduktion des industriellen EEV für alle Szenarien vollständig aus. In KP wird der Beitrag der Maßnahmen zur Treibhausgasreduktion dargestellt. In LFS wird die Maßnahmendurchdringung für ausgewählte Maßnahmen ausgewiesen. In THGND, ERP und EU-T wird dieser Beitrag nicht separat aufgeführt. Auch eine Ableitung des Beitrags dieser Maßnahmen zur Reduktion des EEV ist nicht ohne weiteres möglich, da die Höhe des EEV von einer Vielzahl an Annahmen beeinflusst wird. Hierzu zählen die Entwicklung der Produktionszahlen und der Bruttowertschöpfung, die Anzahl der Beschäftigten, die Bevölkerungsentwicklung sowie die Bilanzierungsmethoden für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und Verbrauchsveränderung aufgrund der Umsetzung von weiteren THG-Verminderungsmaßnahmen wie z.B. CCS, PtX und dem Biomasseeinsatz. Die nachfolgende Tabelle zeigt, welche Annahmen in den Szenarien in Bezug zu Energie- und Materialeffizienz getroffen werden (branchenspezifische Maßnahmen ausgenommen).

Tabelle 3-11: Grundlegende Annahmen zu Energie- und Materialeffizienz in der Industrie

Studien und Szenarien		Grundlegende Annahmen zu Energie- und Materialeffizienz
ERP	ERP-T	<ul style="list-style-type: none"> • Bessere Recyclingketten • Substitution von Metall- durch Kunststoffserzeugnisse • Wechsel zu strombetriebenen Prozessen • Optimierung von Verbrennungsprozessen durch Brennwertnutzung, flammenlose Oxidation • Energieeffiziente Querschnittstechnologien
	ERP-Z80	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkte Umsetzung der Maßnahmen aus ERP-T • Einsatz innovativer Technologien für die bereits heute Prototypen existieren • Verstärkte Systemintegration (v.a. Optimierung der Prozessabläufe) • Optimierte Werkstoffe und Prozesstechnologien
KSZ	KSZ-T	<ul style="list-style-type: none"> • Ca. 200 prozessspezifische Effizienzmaßnahmen werden als Basis verwendet, aber nicht näher spezifiziert • Technisches Einsparpotenzial für Dampferzeuger wird zu 40 % genutzt. • Technisches Potenzial zur Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen wird zu 5 % genutzt. Wärmebereitstellung erfolgt bis zu einer Temperatur von 80 °C. Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe liegt bei 3,3. • Amortisationszeitgebundene Maßnahmenumsetzung: 30 % der Einsparoptionen mit einer Amortisationszeit von einem Jahr werden bis 2050 umgesetzt
	KSZ-Z80	<ul style="list-style-type: none"> • Energieeffizienzmaßnahmen s. KSZ-T • Technisches Einsparpotenzial für Dampferzeuger wird zu 60 % genutzt. • Maßnahmenumsetzung v.a. im Bereich der Querschnittstechnologien. Es existieren weitere Potenziale im Bereich der Niedertemperatur-Prozesswärme • Technisches Potenzial zur Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen wird zu 15 % genutzt. Wärmebereitstellung erfolgt bis zu einer Temperatur von 100 °C. Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe liegt bei 3,4. • Amortisationszeitgebundene Maßnahmenumsetzung: 77 % der Einsparoptionen mit einer Amortisationszeit von einem Jahr werden bis 2050 umgesetzt • Steigerung der Materialeffizienz
	KSZ-Z95	<ul style="list-style-type: none"> • Energieeffizienzmaßnahmen s. KSZ-T • Technisches Einsparpotenzial für Dampferzeuger wird zu 100 % genutzt. • Weitreichende Realisierung der Effizienzpotenziale bei Querschnittstechnologien und in der Niedertemperatur-Prozesswärme • Technisches Potenzial zur Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen wird zu 40 % genutzt. Wärmebereitstellung erfolgt bis zu einer Temperatur von 140 °C. Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe liegt bei 4. • Amortisationszeitgebundene Maßnahmenumsetzung: 88 % der Einsparoptionen mit einer Amortisationszeit von einem Jahr werden bis 2050 umgesetzt • Erhöhte Steigerung der Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft
LFS	LFS-T	<ul style="list-style-type: none"> • Amortisationszeitgebundene Maßnahmenumsetzung: ca. 30 % der Einsparoptionen mit einer Amortisationszeit von einem Jahr werden bis 2050 umgesetzt • Effizienzpotenzial bei QST kaum ausgeschöpft
	LFS-Z80	<ul style="list-style-type: none"> • Amortisationszeitgebundene Maßnahmenumsetzung: ca. 75 % der Einsparoptionen mit einer Amortisationszeit von einem Jahr werden bis 2050 umgesetzt • Fast vollständige Ausschöpfung der Effizienzpotenziale bei Querschnittstechnologien • Gesteigerte Materialeffizienz
KP	KP-T	<ul style="list-style-type: none"> • Gesteigerte Energieeffizienz durch erhöhte Durchdringung heute bekannter Effizienztechnologien • 30-50 % Durchdringung bei elektrischen Verbrauchern

	KP-Z80 & KP-Z95	<ul style="list-style-type: none"> • Gesteigerte Energieeffizienz durch erhöhte Durchdringung heute bekannter Effizienztechnologien • 90 % Durchdringung bei elektrischen Verbrauchern, Wärmeerzeugern und Prozesstechnologien • Einsatz effizientester Querschnittstechnologien • konsequente Vernetzung von Energieeffizienz mit Digitalisierung (z. B. Industrie 4.0) und damit verbundene Prozessoptimierung • Effizienzverbesserung von Öfen, verbesserte Wärmerückgewinnung • Einsatz effizientester Hallenbeheizungssysteme und Gebäudeautomation für Büro- und Fabrikgebäude • Effizienzverbesserungen bei Prozessen
Studien und Szenarien		Grundlegende Annahmen zu Energie- und Materialeffizienz
THGND	THG-Z95	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz
EU-T	EU-T	<ul style="list-style-type: none"> • Energieeffizienzverbesserungen erfolgen durch die Diffusion neuer Produktionsanlagen • Es werden keine deutschlandspezifischen Annahmen getroffen
IEW	IEW-T	<ul style="list-style-type: none"> • Jährliche Verbesserung der Energieeffizienz i.H.v. 0,85 % im Zeitraum zwischen 2015 bis 2050 • Insbesondere Effizienzfortschritte bei Querschnittstechnologien zur Bereitstellung von Prozesswärme und -kälte • Energieeffizienzgewinne führen im Referenzfall zu einer Reduktion des Endenergieverbrauchs um 23 % • Überdurchschnittlich hohe Effizienzverbesserungen in der sonstigen Industrie: 44 % Reduktion des Endenergieverbrauchs in diesem Wirtschaftszweig
	IEW-Z80-EL&TM	<ul style="list-style-type: none"> • Jährliche Verbesserung der Energieeffizienz i.H.v. 0,97 % im Zeitraum zwischen 2015 bis 2050 • Insbesondere Effizienzfortschritte bei Querschnittstechnologien zur Bereitstellung von Prozesswärme und -kälte • Erhöhter Modernisierungs- und Innovationsdruck führt zu stärkerer Potenzialausnutzung im Vergleich zum Referenzfall • Energieeffizienzgewinne führen im Elektrifizierungsszenario zu einer Reduktion des Endenergieverbrauchs um 26 % • Energieeffizienzgewinne führen im Technologiemiixszenario zu einer Reduktion des Endenergieverbrauchs um 23 % • Überdurchschnittlich hohe Effizienzverbesserungen in der sonstigen Industrie: 49 % Reduktion des Endenergieverbrauchs in diesem Wirtschaftszweig
	IEW-Z95-EL&TM	<ul style="list-style-type: none"> • Jährliche Verbesserung der Energieeffizienz i.H.v. 1,12 % im Zeitraum zwischen 2015 bis 2050 • Insbesondere Effizienzfortschritte bei Querschnittstechnologien zur Bereitstellung von Prozesswärme und -kälte • Erhöhter Modernisierungs- und Innovationsdruck führt zu stärkerer Potenzialausnutzung im Vergleich zum Referenzfall • Energieeffizienzgewinne führen im Elektrifizierungsszenario zu einer Reduktion des Endenergieverbrauchs um 30 % • Energieeffizienzgewinne führen im Technologiemiixszenario zu einer Reduktion des Endenergieverbrauchs um 33 % • Überdurchschnittlich hohe Effizienzverbesserungen in der sonstigen Industrie: 54 % Reduktion des Endenergieverbrauchs in diesem Wirtschaftszweig

3.3.4 Synthetische Brennstoffe

Der Einsatz synthetischer Brennstoffe in der Industrie erfolgt in drei der analysierten Studien (IEW, KP, THGND). Wird kein CCS zugelassen und dennoch eine fast vollständige Defossilisierung angestrebt, steigt der Einsatz synthetischer Brennstoffe in der Industrie drastisch.

Tabelle 3-12: Einsatz synthetischer Brennstoffe in der Industrie im Jahr 2050

	KSZ Alle Sz.	ERP Alle Sz.	LFS Alle Sz.	THG-Z	KP-T & KP-Z80	KP-Z95	EU-T	IEW-T	IEW- Z _{EL} 80*	IEW- Z _{TM} 80*	IEW- Z _{EL} 95	IEW- Z _{TM} 95
Nutzung Synthetischer Brennstoffe in der Industrie (PJ)	-	-	-	587	-	86	-	0	Mind. 50	Mind. 133	554	1.177

* Nur Wasserstoffverbrauch – weitere Nutzung synthetischer Brennstoffe wird nicht angegeben

Tabelle 3-12 zeigt, dass der Einsatz synthetischer Brennstoffe in der Industrie in den Szenarien THG-Z, KP-Z95, IEW-Z80-EL&TM und IEW-Z95-EL&TM stattfindet. In KP-Z80 ist die Nutzung synthetischer Brennstoffe modellseitig zugelassen, es erfolgt jedoch aus Kostengründen kein Einsatz, da zur Erreichung des 80 %-Ziels günstigere THG-Verminderungsoptionen zur Verfügung stehen.⁴⁵ In KP-Z95 kommen synthetische Brennstoffe aus Kostengründen erst nach 2030 zum Einsatz. Ein Großteil der in diesem Szenario verwendeten synthetischen Brennstoffe (ca. 1200 PJ) wird importiert.

In THG-Z95 werden synthetische Brennstoffe sowohl zur Substitution fossiler Energieträger, als auch zur Deckung des nicht energetischen Bedarfs in industriellen Prozessen eingesetzt. Synthetische Brennstoffe werden dort verwendet, wo aus „[...] prozesstechnischen Gründen Strom nicht direkt als Energieträger genutzt werden kann [...]“. Der Einsatz erfolgt in der Stahl-, Nicht Eisen (NE)-Metall-, Chemie-, Zement-, und Kalkindustrie sowie in weiteren nicht näher spezifizierten Branchen. Synthetische Brennstoffe werden in THG-Z95 bereits 2030 eingesetzt (z.B. in der Grundstoffchemie). Es wird angenommen, dass ca. 70 % der erneuerbaren Brennstoffe im Jahr 2050 importiert werden. Dies entspricht ungefähr dem Anteil fossiler Energieträger, der im Jahr 2015 in Deutschland importiert wurde [9].

In IEW-Z80 und IEW-Z95 werden synthetische Brennstoffe in allen Endenergiesektoren sowie erzeugungsseitig im Energie- & Umwandlungssektor eingesetzt [17]. Hauptaugenmerk ist das Erreichen der klimapolitischen Ziele, die Erhöhung der kurz- und langfristigen Flexibilität durch den Einsatz synthetischer Brennstoffe nimmt jedoch ebenfalls eine maßgebliche Rolle ein [18]. Bereits in den 80-prozentigen Zielszenarien der Studie ist ein massiver Einsatz synthetischer Brennstoffe zu verzeichnen. Dies ist jedoch lediglich auf die Annahme der Autoren zurückzuführen, dass in „Industrie und Verkehr zunehmend Wasserstoff zum Einsatz kommt“ [13]. Es wird angemerkt, dass eine Zielerreichung „grundsätzlich aber auch mit anderen Pfaden möglich“ ist [13]. Werden die absoluten Mengen synthetischer Brennstoffe der analysierten Studien herangezogen, wird deutlich, dass synthetische Energieträger in [13] die mit Abstand gewichtigste Rolle im Studienvergleich einnehmen [17].

3.3.5 Power-to-Heat

In den ambitionierteren Klimaschutzszenarien ist Power-to-Heat sowohl als Flexibilitäts- als auch als Bereitstellungsoption erneuerbarer Wärme erforderlich. Durch neue Verbraucher wie Power-to-Heat steigt der Anteil des Stromverbrauchs am industriellen Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2050 auf bis zu 69 % (IEW). Im Jahr 2014 betrug dieser Anteil 32 %.

⁴⁵ In KP-Z80 ist der Import synthetischer Brennstoffe nicht zugelassen, da es sich hier um ein Szenario mit „nationalem Alleingang“ handelt.

In Fernwärmenetzen und den Nachfragesektoren kann eine Substitution fossiler Wärmeerzeuger durch PtH-Anlagen bei weitestgehend erneuerbarem Strommix zur Reduktion von Treibhausgasen beitragen [10], [9]. Der Einsatz von PtH wird in KSZ, LFS, THGND, IEW und KP thematisiert. In EU-T und ERP werden hierzu keine Angaben gemacht. In Tabelle 3-13 sind die verfügbaren Daten aus den Studien zusammengetragen.

Tabelle 3-13: Power-to-Heat in den Studien

Studien und Szenarien		Anteil Strom am Endenergieverbrauch in %	Anteil Strom am Endenergieverbrauch in der Industrie in %	Startjahr	Power-to-Heat Fernwärme in TWh	Wärmepumpen Industrie in TWh
Referenzjahr 2014		21	32	-	-	-
ERP	ERP-T	27	38	k.A.*	k.A.	k.A.
	ERP-Z80	29	36	k.A.	k.A.	k.A.
KSZ	KSZ-T	34	37	n.z.**	n.z.	n.z.
	KSZ-Z80	41	38	k.A.	23	4
	KSZ-Z95	50	44	k.A.	16	11
EU-T	EU-T	27	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
THGND	THG-Z95	42	54	2030	Sehr hoch	11
LFS	LFS-T	28	35	2040	2	2
	LFS-Z8095	35	38		11	21
KP	KP-T	26	33	k.A.	Gering (geringer Überschussstrom)	
	KP-Z80	34	31	k.A.	Gering (Kosten)	
	KP-Z95	35	34	k.A.	Hoch (Klimaschutzambitionsniveau)	
IEW	IEW-T	27	34	k.A.		
	IEW-Z80-EL	60	64	Vor 2030	k.A.	64 (2030)
	IEW-Z80-TM	34	33	k.A.	k.A.	
	IEW-Z95-EL	63	69	Vor 2030	k.A.	64 (2030)
	IEW-Z95-TM	35	36	k.A.	k.A.	

*k.A.: Keine Angabe, **n.z.: nicht zugelassen

Der verstärkte Einsatz strombasierter Technologien sowie der Rückgang des fossilen Endenergieverbrauchs infolge verstärkter Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen führt in allen untersuchten Zielszenarien zu einem steigenden Anteil des Stroms am Endenergieverbrauch. Dabei gibt es zwei Gründe für einen hohen Anteil von Strom am Endenergieverbrauch: zum einen werden zusätzliche elektrische Verbraucher dem System hinzugefügt (KP-Z95, IEW-Z80&95-EL), zum anderen erfolgt eine stärkere Durchdringung von Effizienzmaßnahmen (KP, LFS und KSZ). So steigt der Anteil von Strom am EEV von 21 % im Jahr 2014 in KSZ-Z95 bis 2050 auf 50 % an, obwohl Elektrifizierungsmaßnahmen in diesem Szenario eine untergeordnete Rolle spielen. Demgegenüber stehen IEW-Z80&95-EL in denen der Anstieg des Stromverbrauchs auch aufgrund von PtH-Maßnahmen zu einer Erhöhung des Anteils von Strom am EEV führt.

Der Anteil des Stromverbrauchs im Industriesektor steigt in allen Szenarien gegenüber dem heutigen Niveau an und erreicht in IEW-Z95-EL die Höchstmarke von ca. 69 % am industriellen EEV im Jahr 2050 (s. Tabelle 3-13). **Abbildung 3-10** zeigt, dass mit Ausnahme der IEW, in allen untersuchten

Zielszenarien der Stromverbrauch bis 2030 absolut sinkt. Grund hierfür ist, dass nur in den Zielszenarien aus IEW mit einer flächendeckenden Umsetzung von PtH Maßnahmen bereits vor 2030 begonnen wird.

Im Jahr 2050 steigt der Stromverbrauch in IEW-Z80&95-EL auf 1915 PJ bzw. 1940 PJ. Dies entspricht einem prozentualen Anstieg von ca. 230 % im Vergleich zum heutigen Stromverbrauch. Bei der Interpretation dieser Werte ist insbesondere im Vergleich zu den anderen Szenarien wichtig, dass der Strombedarf für den in der Industrie verwendeten Wasserstoff auch dort bilanziert wird. So wird z.B. in THG-Z95 ebenfalls Wasserstoff im Industriesektor verwendet, der daraus resultierende Stromverbrauch wird jedoch im Umwandlungssektor bilanziert. Somit wird in THG-Z ein Stromverbrauch i.H.v. 778 PJ im Jahr 2050 in der Industrie verzeichnet, der industrielle Wasserstoffverbrauch führt darüber hinaus zu zusätzlichen 468 PJ Stromverbrauch. In LFS-Z80 steigt der Verbrauch bis 2050 auf 750 PJ. Grund hierfür ist der Einsatz von PtH als Maßnahme zur THG-Vermeidung in der industriellen Prozesswärme. In LFS-T liegt der Stromverbrauch aufgrund der geringeren Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen trotz schwächerer Elektrifizierung höher als in LFS-Z80. Auch in KSZ-Z80 und KSZ-Z95 wird PtH in der industriellen Prozesswärme eingesetzt, der zusätzliche Stromverbrauch wird jedoch durch die verstärkte Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen bei konventionellen Stromverbrauchern kompensiert. Folglich sinkt der Stromverbrauch in diesen Szenarien bis 2050.⁴⁶

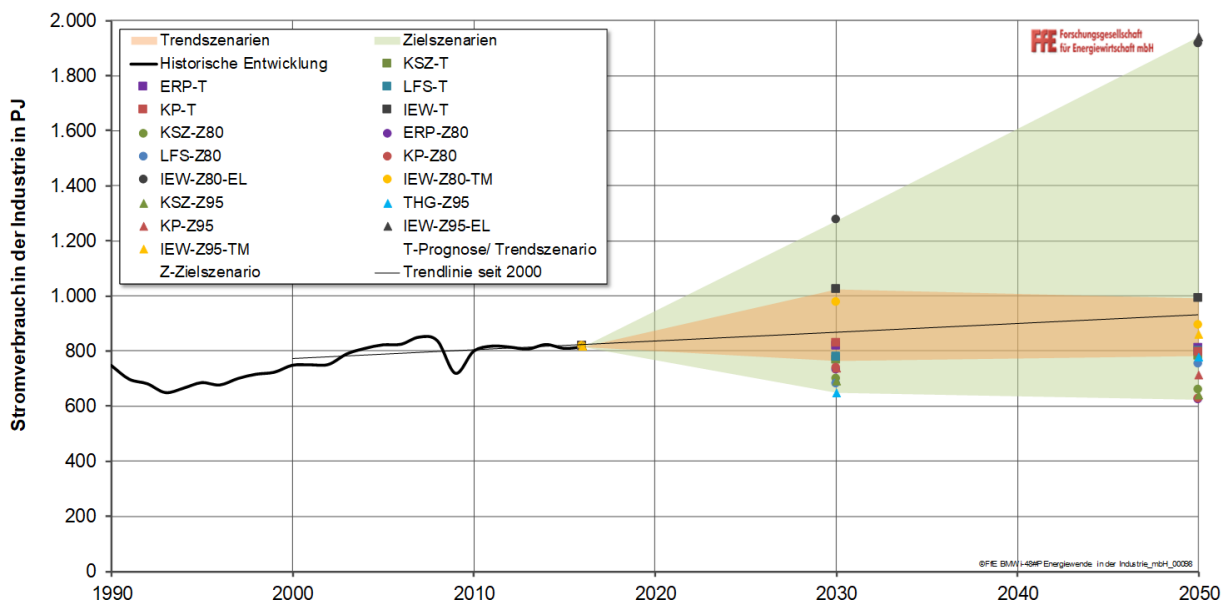


Abbildung 3-10: Entwicklung des Stromverbrauchs in der Industrie bis 2050 in PJ⁴⁷

Für PtH-Anwendungen werden in der Industrie Elektrodenheizkessel und Wärmepumpen eingesetzt (s. KP und LFS). Hierbei werden energiebedingte Emissionen infolge der Prozesswärmebereitstellung aus fossilen Energieträgern im Industriesektor in einem Wärmeband von unter 100 °C bis über 1500 °C in Zukunft durch Power-to-Heat bereitgestellt (THGND). In THGND wird dabei von einer starken Durchdringung von PtH-Techniken in der Industrie ausgegangen. In KSZ-Z95 und LFS-Z80 führt der

⁴⁶ In KP-Z80 kommt es im Vergleich zu KP-Z95 zu einer Zunahme des industriellen Stromverbrauchs aufgrund des Einsatzes von CCS zur Reduktion industrieller Prozessemissionen.

⁴⁷ Unterscheidung zwischen 80 %- und 95 %-Zielszenarien aus Gründen der Übersichtlichkeit vernachlässigt.

Einsatz von Wärmepumpen zur Deckung des Bedarfes an Niedertemperatur-Prozesswärme (<140 °C)
zu einem zusätzlichen Stromverbrauch von 11 TWh bzw. 21 TWh.

3.3.6 Carbon Capture and Storage/Utilization

In vier der fünf analysierten 95 %-Szenarien wird die signifikante Reduktion der prozessbedingten Emissionen nur durch den Einsatz von CCS erzielt. CCS stellt insbesondere für die Industrie eine bedeutende Option zur Senkung der Emissionen dar.

Der Einsatz von CCS weist in Deutschland erhebliche gesellschaftliche und politische Akzeptanzprobleme auf [6], [7], [10], [8], [11]. So sind beispielsweise wichtige Fragen zum Transport [7], [10] und zur Speicherung [7] bisher ungeklärt, auch da sich CCS in einem frühen Entwicklungsstadium befindet. Zur großtechnischen Realisierung von CO₂-Abscheidungs- und Speichereinrichtungen ist folglich noch massiver Forschungsbedarf erforderlich [6], [7]. Klar ist, dass CCS erhebliche Umweltrisiken birgt [9]. Beispielsweise sind die langzeitlichen Umweltwirkungen durch die unterirdische Speicherung von CO₂ bisher nicht geklärt [6]. Bei der unterirdischen Speicherung können Reaktionen mit der Umgebung auftreten, die die Überführung von Schwermetallen ins Grundwasser zur Folge haben [7], [6]. Entsteht ein erhöhter Speicherdruck, können zudem Risse entstehen. Ein Entweichen des gespeicherten CO₂ wäre die Folge [7], [6]. Neben den technischen Herausforderungen fallen hohe Kosten für die CO₂-Abscheidung an [7], [8], [10]. Besonders die hohen erforderlichen Investitionen stellen ein wirtschaftliches Hemmnis dar. Überdies gilt es zu beachten, dass der Einsatz von CCS regulatorisch derzeit nicht zulässig ist. Die Änderungen des regulatorischen Rahmens werden in allen Szenarien (die CCS verwenden) angemahnt [11], [10], [7]. Bisher ist die Höchstspeichermenge für Deutschland auf vier Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr begrenzt [7]. Diese Herausforderungen und Hemmnisse lassen eine Marktdurchdringung von CCS selbst in der langen Frist als in hohem Maße unsicher erscheinen [10], [7], [6].

Die Technologie birgt jedoch auch große Potenziale: CCS stellt eine zentrale CO₂-Verminderungsoption für emissionsintensive Prozesse dar [11], [6]. Zur Reduktion von Prozessemissionen stellt CCS oftmals die mit Abstand kostengünstigste Option dar [11]. Gespeichertes CO₂ kann anschließend zur Herstellung synthetischer Energieträger (CCU) [6], [7] [11] und in chemischen Produktionsprozessen weiterverwendet werden. Die Speicherkapazitäten wirken dabei in Deutschland vorerst nicht begrenzend [11]. Als Speicherorte für abgeschiedenes CO₂ kommen beispielsweise ausgeförderte Gasfelder, saline Aquifere und Kohleflöze in Frage [7], [10]. In Summe weisen alle drei Speicheroptionen eine Speicherkapazität von bis zu 47 Gt CO₂ auf [7].

Einführend ist in Abbildung 3-11 dargestellt, in welchen Szenarien der Studien CCS eingesetzt und zugelassen wird. Es wird deutlich, dass CCS verstärkt in den Szenarien mit höherem Klimaschutzambitionsniveau Verwendung findet. Eine Ausnahme stellt EU-T dar: CCS wird trotz des fehlenden THG-Reduktionsziels auf der Basis mehrerer EU-Direktiven⁴⁸ genutzt.

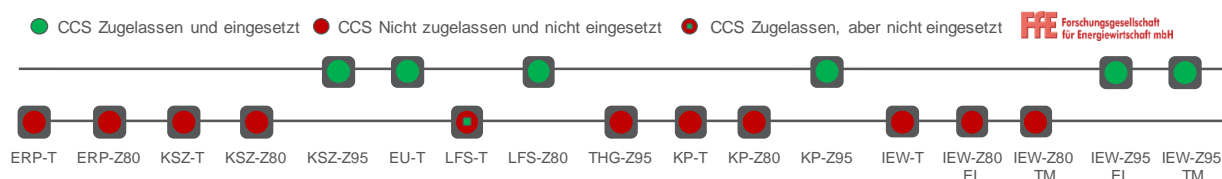


Abbildung 3-11: Verwendung von CCS in den Szenarien der analysierten Studien

Zudem wird in THGND trotz des hohen THG-Reduktionsziels kein CCS eingesetzt. Die CO₂-Abscheidung und Speicherung stellt nach THGND eine risikobehaftete Technologie dar, die „nicht Bestandteil eines nachhaltigen Energiesystems“ ist. In KSZ, LFS, IEW und KP wird CCS ab einem bestimmten Klimaschutzambitionsniveau für die weitgehende Dekarbonisierung ohne deutlich radikalere Innovationen in Industrieprozessen jedoch insbesondere zur Abscheidung von Prozessemissionen benötigt (KSZ, LFS, IEW und KP). In KP und IEW wird CCS bei einer Reduktion der THG-Emissionen um 95% gegenüber 1990 sogar als unverzichtbar bezeichnet. Diese Aussage zielt auf den unter

⁴⁸ EEPR (European Energy Programme for Recovery) and NER 300 (New entrants reserve) CCS and innovative renewables funding programme, Regulation (EC) No 663/2009, ETS Directive 2009/29/EC Article 10a(8), further developed through Commission Decision 2010/670/EU and implementing decisions, e.g. C(2014) 4493 and C(2015) 6882.

Kostengesichtspunkten günstigen Einsatz von CCS bei einigen Prozessen im Vergleich zu anderen Maßnahmen in der Industrie ab (s. LFS und KP). Die Wirtschaftlichkeit von CCS hängt dabei maßgeblich von der Höhe der CO₂-Preise ab [10], [8], [7]. Bei hohen CO₂ Preisen lohnt sich der Einsatz von CCS. In den Szenarien mit niedrigerem Klimaschutzambitionsniveau ist der Einsatz von CCS

1. aufgrund der niedrigen CO₂-Preise keine wirtschaftliche Option (LFS-T),
2. aus Akzeptanzgründen trotz niedrigerer CO₂-Vermeidungskosten im Vergleich zu anderen Technologien ausgeschlossen (KP-Z80) und
3. wegen der fehlenden regulatorischen Rahmenbedingungen nicht möglich (KSZ-Z80)
4. aus Akzeptanzgründen und Bedenken hinsichtlich der Umweltverträglichkeit annahmegemäß ausgeschlossen (IEW-Z80-EL&TM).

In den Szenarien wird CCS jedoch nicht zeitnah eingesetzt: Hierfür wären beispielsweise die Vorlaufzeiten für Genehmigungen von Speichern (LFS, KSZ) und der Bau der Infrastruktur (KP) zu lang, sowie die CO₂-Preise zu niedrig (EU-T). Der Start des CCS-Einsatzes wird in den Studien deshalb erst zwischen 2030 (LFS und KSZ) und 2040 (KP, IEW und EU-T) gesehen.

CCS wird in LFS, IEW und KSZ lediglich im Industrie-, in KP jedoch auch im Umwandlungssektor eingesetzt.⁴⁹ Die THG-Reduktion durch CCS ist in **Abbildung 3-12** dargestellt.

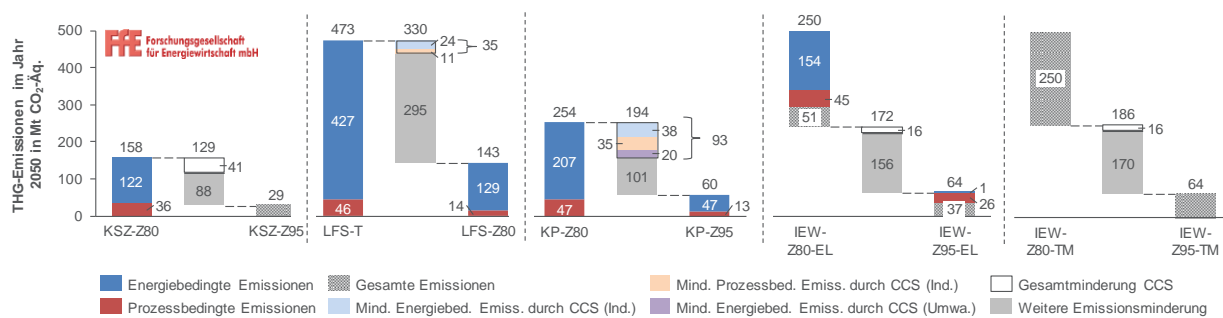


Abbildung 3-12: Verminderung der energie- und prozessbedingten Emissionen durch CCS im Jahr 2050⁵⁰

In LFS wird CCS im Umwandlungssektor nicht eingesetzt, da in diesem Sektor alternative Maßnahmen mit hoher Marktreife existieren (Erneuerbare Energien). Zudem sind Speicherpotenziale für CO₂ langfristig begrenzt und sollten den Branchen vorbehalten werden, die alternative Emissionsreduktionen nur deutlich teurer gewährleisten können. Für prozessbedingten Emissionen sind gem. KSZ in der energieintensiven Industrie meist nur sehr viel teurere CO₂-Vermeidungsoptionen verfügbar (Bsp. Direktreduktion Stahl). Deshalb wird CCS in LFS und in KSZ auch nur bei großen CO₂-Punktquellen wie der Stahl-, Klinker-, Kalkstein-, Ammoniak-, Ethylen- und Methanolproduktion eingesetzt.

Die hohe Bedeutung von CCS in der Industrie wird in **Abbildung 3-13** deutlich. In den Studien KP und KSZ ist CCS in der Industrie für weit mehr als die Hälfte der THG-Emissionsdifferenz zwischen den 80 % und 95 %-Zielszenarien verantwortlich. In LFS beträgt der Anteil immerhin noch knapp 47 %. Lediglich in IEW wird CCS in der Industrie nur für die Emissionsminderung genutzt die durch keine andere aus heutiger Sicht einsetzbare Verminderungsmaßnahme erzielt werden kann.

⁴⁹ In EU-T werden hierzu keine Angaben gemacht.

⁵⁰ In EU-T werden hierzu keine Angaben gemacht.

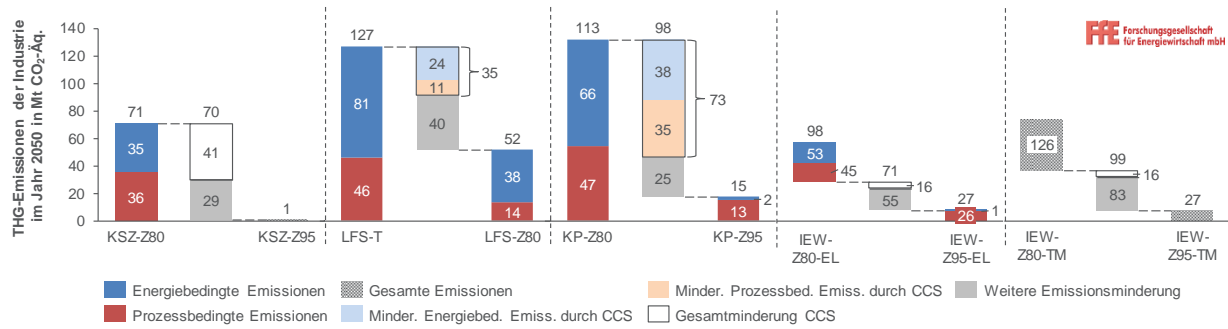


Abbildung 3-13: Verminderung der energie- und prozessbedingten Emissionen durch CCS in der Industrie im Jahr 2050

Da eine vollständige Abscheidung von CO₂ in Industrieprozessen meist nicht möglich ist, können die prozessbedingten Emissionen nicht komplett reduziert werden. Hierbei ist die Abscheidungsrate prozessabhängig und wird in den Studien im Mittel mit 60 % (LFS) bis 95 % (KP und KSZ) angegeben.

3.3.7 Biomasse

Biomasse ist nicht unbegrenzt verfügbar. Daher steigt aufgrund der bereits heute hohen Nutzung die zukünftige Verwendung von Biomasse in den meisten Szenarien nicht wesentlich an. Aufgrund des sektorübergreifend bilanziell hohen THG-Vermeidungspotenzials von Biomasse, bestehen intersektorale Nutzungskonkurrenzen. In den Szenarien findet meist eine Verschiebung der Biomassenutzung vom Energie-/Umwandlungssektor in den Industriesektor statt.

Daten zur Biomasse sind in vier der sieben analysierten Studien verfügbar (KP, LFS, KSZ und ERP).⁵¹ Tabelle 3-14 fasst die Annahmen bezüglich des inländischen Potenzials, der Nutzung und des Importes von Biomasse in den Studien zusammen.⁵²

Tabelle 3-14: Inländisches Potenzial, Nutzung und Importe von Biomasse im Jahr 2050

Studien und Szenarien		Inländisches Biomassepotenzial (BP) in PJ	Biomassenutzung in PJ	Biomasseimporte in PJ*
ERP	ERP-T	BP**≥1506	1.506	-
	ERP-Z80	1700	1.915	215
KSZ	KSZ-T	1211	890	-
	KSZ-Z80	1223	1.237	14
	KSZ-Z95	1131	1.107	-
LFS	LFS-T	1103	839	-
	LFS-Z80	1103	1.336	233 ⁵³
KP	KP-T	<1300	-	n.z.
	KP-Z80	1.254>BP<1300	1.254	n.z.
	KP-Z95	1.248>BP<1300	1.248	n.z.
IEW	Alle Szenarien	943	1.116	173

*Biomasseimporte sind in ERP, KSZ und LFS zugelassen, werden jedoch nicht in jedem Szenario benötigt. In KP sind Biomasseimporte aus Akzeptanzgründen nicht zugelassen. **BP: Biomassepotenzial

Biomassenutzung, Biomasseimport und intersektorale Biomasseverteilung

Die sektorale Biomassenutzung in den energie- und klimapolitischen Szenarien der Studien ist in **Abbildung 3-14** dargestellt⁵⁴. Es wird deutlich, dass die Biomassenutzung aufgrund des höheren Klimaschutzambitionsniveaus in den Zielszenarien der Studien LFS, KSZ und in ERP höher ist. Geht die Biomassenutzung über das inländische Biomassepotenzial hinaus, wird Biomasse importiert (vgl. Tabelle 3-14). Der Import von Biomasse ist in den Studien LFS, KSZ, IEW und ERP zugelassen. Aus Akzeptanz- sowie umwelt- und ethischen Gründen ist der Biomasseimport in KP und in THGND hingegen ausgeschlossen.

In LFS werden Biomasseimporte sowohl im Trend-, als auch im Zielszenario auf maximal 30 % des heimischen Biomassepotenzials begrenzt. Diese Importbegrenzung wird jedoch nicht ausgeschöpft⁵⁵. Im

⁵¹ In THGND sind qualitative Aussagen zur Entwicklung der Biomasse enthalten. In EU-T sind weder quantitative noch qualitative Angaben zur Biomassenutzung verfügbar.

⁵² Die Biomassepotenziale, Biomassenutzung, und Biomasseimporte beziehen sich auf den Primärenergieverbrauch. Umwandlungsverluste sind folglich nicht mitbegriffen.

⁵³ Umwandlungsverluste werden bei der importierten Biomasse nicht berücksichtigt. Beispielsweise wird der Energiewert des importierten Biogases nicht mehr auf die eingesetzte Biomasse zurückgerechnet. Der importierte Primärenergiebedarf liegt folglich leicht höher als hier angegeben.

⁵⁴ In THGND wird lediglich qualitativ angemerkt, dass die energetische Biomassenutzung u.a. wegen der Nutzungskonkurrenzen um Anbauflächen langfristig zurückgeht. Hierbei werden vergärbare Biomassen aus Reststoffströmen für die energetische Nutzung verwendet, Anbaubiomasse findet keine Verwendung mehr.

⁵⁵ Dies ist im Zielszenario einerseits der beschränkten „Genauigkeit“ bei der iterativen Kopplung der Modelle geschuldet; andererseits ergibt sich durch den starken Einsatz von Biokraftstoffen, unter anderem im Flug- und Schiffsverkehr, ein höherer Biomasseprimärenergiebedarf. Würden diese Verluste im Ausland mitberücksichtigt, würde in 2050 das maximale Potenzial nahezu vollständig ausgenutzt [10].

Trendszenario wird keine, im Zielszenario der Studie 233 PJ Biomasse importiert. Für KSZ ist der Import von Biomasse lediglich im KSZ-Z80 notwendig (Import: 14 PJ). Sowohl im KSZ-T als auch im KSZ-Z95 wird weniger Biomasse genutzt, als nachhaltig im Inland im Jahr 2050 produziert wird. In ERP werden im Zielszenario etwa 215 PJ im Jahr 2050 importiert. Im Trendszenario findet kein Import statt. Es wird nicht klar, ob der fehlende Import im Trendszenario exogen vorgegeben wird oder marktgetrieben ist. In IEW wird in allen Szenarien im Jahr 2050 das gesamte verfügbare Biomassepotenzial (inkl. Importe) von 1116 PJ genutzt.

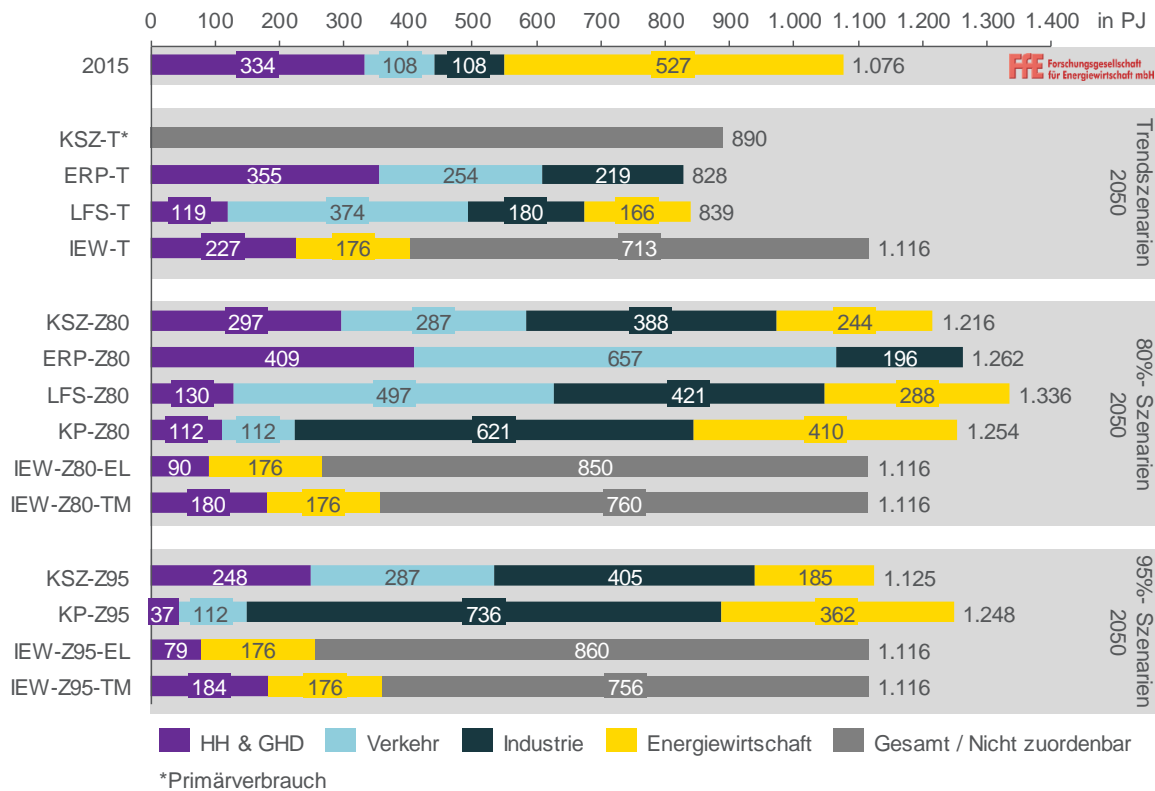


Abbildung 3-14: Biomassennutzung im Jahr 2015 und 2050⁵⁶

Die intersektorale Verteilung der Biomasse wird ebenfalls in Abbildung 3-14 deutlich. In ERP und KP wird die dahinterstehende Verteilungsmethodik nicht genauer beschrieben. In LFS wird die Sektorallokation der Biomasse aus systemischer Sicht vorgenommen. Die Allokation erfolgt in den einzelnen Sektormodellen nicht modellendogen (kostenoptimal). Vielmehr wird in den verschiedenen Sektormodellen (bspw. Astra: Verkehr) die Biomasse iterativ zur Minimierung der sektorübergreifenden Gesamtkosten verteilt. Hierbei wird aus systemischer Sicht der Gesamtnutzen über die Opportunitätskosten der Biomassennutzung in den anderen Sektoren ermittelt. Im Zuge der Opportunitätskostenermittlung werden die technische Nutzbarkeit und die sektorale Zahlungsbereitschaft für Biomasse, die CO₂-Vermeidungskosten der Alternativmaßnahmen und die Flexibilität des Biomasseeinsatzes miteinbezogen. Überdies werden die Akzeptanz und die möglichst faire Verteilung von Belastungen berücksichtigt.⁵⁷

Die sektorale Biomassennutzung für die Szenarien wird in KSZ modellendogen ermittelt. Um eine Validierung der in der Simulation ermittelten intersektoralen Biomassennutzung vorzunehmen, werden die

⁵⁶ Ausgangsbasis 2015 aus [4].

⁵⁷ In LFS wird im Rahmen der Arbeiten dieser Studie zunächst eine Biomasseallokation auf die einzelnen Sektoren und Nutzungspfade durch Fraunhofer ISI durchgeführt, orientiert an modellendogenen Grenznutzen des Biomasseeinsatzes. Anschließend nimmt das IFEU mit Hilfe von Technologiekenntnissen und Biomasseerträgen (bis 2050) aus dem „Meilensteine 2030“-Projekt eine Rückrechnung der benötigten Biomassen und Anbauflächen vor und vollzieht einen Abgleich zwischen Biomassenachfrage und -angebot. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass der Gesamtbiomasseeinsatz im Rahmen der selbst gesetzten Grenzen bleibt.

Ergebnisse mit einer sinnvollen energiewirtschaftlichen Biomassenutzung verglichen. Hierzu wird das Biomassepotenzial in KSZ vorab über Annahmen zur Entwicklung der Biomassenutzung auf die Sektoren allokiert.

In IEW wird die intersektorale Verteilung der Biomasse exogen vorgegeben. Die Verteilung wird in erster Linie von dem im jeweiligen Szenario anvisierten Klimaschutzambitionsniveau beeinflusst. So wird bspw. in den 95 %-Zielszenarien im Vergleich zu den 80 %-Zielszenarien aus Mangel an alternativen Treibhausgasverminderungsoptionen deutlich mehr Bioenergie in Form von flüssigen Kraftstoffen im Verkehrssektor eingesetzt.

Die sektorale Veränderung der Biomassenutzung macht deutlich, dass in den Szenarien der Studien KP, IEW, LFS und KSZ eine Verschiebung vom Energiesektor hin zum Verkehrs- bzw. Industriesektor stattfindet. Auch in ERP steigt die Biomasse im Verkehrs- und Industriesektor, jedoch wird die Erhöhung durch eine allgemeine Erhöhung der Biomassenutzung erreicht. In LFS ist die erhöhte Biomassenutzung in der Industrie und im Verkehr auf die hohen Kosten der Alternativmaßnahmen zurückzuführen. Die Opportunitätskosten zur CO₂-Reduktion sind in der Industrie und dem Verkehr meist deutlich höher als im Haushalts-, GHD- und im Stromsektor. Als Beispiel kann die Verwendung von Biokerosin im Vergleich zu synthetischen Kraftstoffen bei Flugzeugen angegeben werden [10].

Die verstärkte Nutzung von Biomasse im Verkehr ist in LFS, IEW und KSZ aus Kostensicht auf mangelnde Alternativen zurückzuführen. Biomasse ist derzeit der einzige relevante erneuerbare Energieträger im Verkehr (LFS). Im Flugverkehr beispielweise liegen die Alternativen zu Biomasseeinsatz eigentlich nur in aus regenerativem Strom erzeugten Kohlenwasserstoffen. Diese sind jedoch um ein Vielfaches teurer [10], [7]. Aufgrund der hohen Umwandlungsverluste des Biomasseeinsatzes wird in KP hingegen zukünftig keine verstärkte Biomassenutzung im Verkehrssektor erwartet. Zudem verbleibt in KP aufgrund des verstärkten Biomasseeinsatzes in der Industrie ein geringes Biomassepotenzial für den Verkehr.

Die zukünftig erhöhte Biomassenutzung in der Industrie wird vor allem in KP angenommen. Jedoch wird auch in LFS, KSZ und ERP von einer Verschiebung der Biomassenutzung hin zum Industriesektor ausgegangen. So ist der Einsatz von Biomasse zur effizienten Bereitstellung von Nieder- und Mitteltemperaturwärme⁵⁸ am effektivsten in der Industrie möglich [11]. Wird zudem CCS eingesetzt, kann das entstehende CO₂ durch Power-to-Gas (PTG) Prozesse in Kraftstoffen als biogene Kohlenstoffquelle genutzt werden. Durch die Kombination der energetischen Biomassenutzung und CCS in der Industrie entsteht bilanziell eine Emissionssenke [11], [7]. Auf diese Weise ergeben sich etwa in KSZ-Z95 negative energiebedingte Emissionen im Industriesektor. Alternativoptionen zur bilanziell kohlenstofffreien Bereitstellung von Energie bieten darüber hinaus lediglich wesentlich teurere Optionen wie synthetische Brennstoffe oder der Einsatz von Elektrowärme. Im Gegensatz zum Haushalts oder GHD-Sektor wird in der Industrie die Wärme auf relativ hohem Temperaturniveau benötigt, daher sind Alternativen in der Industrie wie der Einsatz von Wärmepumpen, Geothermie und Solarthermie in Deutschland damit nahezu ausgeschlossen [11]. In diesem Zusammenhang ist auch die stete Verfügbarkeit der Biomasse im Gegensatz zur Solarthermie für die Industrie bedeutend [10]. Zudem ist Biomasse als CO₂-Vermeidungsoption in der Industrie von Vorteil, da relativ wenig Eingriffe in die bestehende industrielle Produktionsstruktur notwendig sind [10].

3.3.8 Eigenerzeugung

Die Eigenerzeugung durch Industriekraftwerke wird in den Studien nicht ausgewiesen.

Lediglich in ERP wird qualitativ auf eine steigende Eigenerzeugung in der Industrie verwiesen. Die Zunahme der industriellen Eigenversorgung wird durch drei Entwicklungen angereizt: Sinkende

⁵⁸ „Der Ersatz von Brennstoff durch niederkalorische Ersatzbrennstoffe, zu denen Biomasse im Allgemeinen zählt, ist eng an das sog. „Energieaustauschverhältnis“ geknüpft, wie es [Beckmann und Scholz 1998] definieren. Insbesondere für Hochtemperaturprozesse ergeben sich aus dem Verhältnis der kalorischen Verbrennungstemperatur (abhängig vom Energiegehalt) zweier Brennstoffe Grenzen der Substituierbarkeit: Ab einer bestimmten gewünschten Prozesstemperatur wird bei der Substitution durch einen niederkalorischen Brennstoff überproportional mehr Energie verbraucht. Der Einsatz von niederkalorischen Brennstoffen scheint daher im Nieder- und Mitteltemperaturbereich (<1000°C) effizienter zu sein“ [10].

Stromgestehungskosten dezentraler Erzeugungsanlagen, steigenden Endverbraucherpreise sowie Bestrebungen einer erhöhten Versorgungssicherheit und –qualität in der Industrie.

3.4 Branchenspezifische Maßnahmen

In den Szenarien der branchenübergreifenden Studien berücksichtigte branchenspezifische THG-Verminderungsmaßnahmen entsprechen oftmals den Maßnahmen in branchenspezifischen Studien. Die Detailtiefe zu den Maßnahmen ist in branchenspezifischen Studien erwartungsgemäß deutlich höher. Den Maßnahmen wird in den branchenübergreifenden Studien häufig eine ähnliche Bedeutung zur Reduktion der Treibhausgase wie in den branchenspezifischen Studien beigemessen. In den branchenübergreifenden Studien wird die Durchdringung der branchenspezifischen Technologie jedoch teilweise überschätzt und der dafür notwendige Forschungsbedarf unterschätzt. Branchenübergreifend ist die verstärkte Abwärmenutzung ein wichtiger Hebel zur Reduktion der Treibhausgase.⁵⁹

In den energie- und klimapolitischen Szenarien der branchenübergreifenden Studien reduzieren branchenspezifische THG-Minderungsmaßnahmen den THG-Ausstoß in der Industrie. Aufgrund der homogenen Prozesse werden insbesondere in der energieintensiven Industrie verstärkt Treibhausgase auf der Basis von branchenspezifischen Maßnahmen vermindert. Folgend werden Maßnahmen aus den branchenübergreifenden Studien mit Maßnahmen aus branchenspezifischen Studien abgeglichen. Im Projekt „Energiewende in der Industrie“ werden folgende acht Branchen in der Industrie unterschieden:

- Zement- und Kalkindustrie
- NE-Metalle
- Glasindustrie
- Papierindustrie
- Metallerzeugung und –bearbeitung,
- Grundstoffchemie
- Automobilindustrie
- Nahrungsmittelindustrie

Beim Abgleich der Maßnahmen aus den branchenübergreifenden Studien mit branchenspezifischen Studien wird stets mit selber Methodik vorgegangen. Zunächst werden die branchenspezifischen Maßnahmen der energie- und klimapolitischen Szenarien identifiziert. Anschließend werden branchenspezifische Studien erfasst, die genauere Informationen über die jeweilige Industrie und die verfügbaren Technologien bieten. Die Charakteristika der Maßnahmen aus den branchenübergreifenden und branchenspezifischen Studien werden darauffolgend miteinander verglichen. Für jede Industrie werden je nach Verfügbarkeit maximal drei Maßnahmen ausgewählt. In der Nahrungsmittel- und der Automobilindustrie werden in den branchenübergreifenden Studien keine branchenspezifischen Maßnahmen ausgewiesen. In der Automobilindustrie liegt dies beispielsweise im überwiegenden Einsatz von Querschnittstechnologien begründet. Diese Querschnittstechnologien können der Automobilindustrie in den branchenübergreifenden Studien jedoch nicht eindeutig zugeordnet werden.

3.4.1 Zement- und Kalk

Nachfolgend werden zunächst Maßnahmen der Zement- und anschließend der Kalk- und Keramikindustrie untersucht und analysiert.

⁵⁹ Ein Abgleich mit branchenspezifischen Kernparametern wie der Entwicklung der Brennstoff- und Stromintensität ist dabei nicht möglich, da diese Parameter in den branchenübergreifenden Studien nicht branchenspezifisch ausgewiesen werden.

Zementindustrie

Die Verwendung CO₂-ärmeren Zements, die Verbesserung der Mahlanlagen und die Verbesserung der Drehrohröfen sind entscheidende Maßnahmen, die in den branchenübergreifenden Studien zur Reduktion der Treibhausgase in der Zementindustrie eingesetzt werden. Für den Abgleich werden in der Zementindustrie die branchenspezifischen Studien [19], [20] und [21] herangezogen.

Der zukünftige Einsatz CO₂-ärmeren Zements wird in den energie- und klimapolitischen Szenarien der Studien ERP, KSZ, LFS, THGND, IEW und KP angenommen. Die CO₂-Reduktion wird zum einen durch den Einsatz CO₂-ärmerer Bindemittel (KP, THGND, IEW und ERP), zum anderen durch innovative Zementsorten (low carbon) erreicht (ERP). In IEW-Z95-EL&TM wird davon ausgegangen, dass 100 % der Anlagen alternative Bindemittel eingesetzt werden. CO₂-ärmere Bindemittel werden auch in den branchenspezifischen Studien [19], [20] und [21] als wesentliche Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgase in der Zementindustrie benannt. In [19], [20] und [21] ist die zukünftige Verfügbarkeit dieser Bindemittel jedoch teilweise ungeklärt. Auch in THGND wird die Verfügbarkeit dieser Bindemittel angezweifelt. Innovative Zementsorten weisen aufgrund hoher Investitionen, mangelnder Nachfrage und schlechterer Zementeigenschaften bisher eine geringe Marktdurchdringung auf. Es ist somit fraglich, ob diese Zemente die gängigen Portlandzemente langfristig ersetzen können. Derzeit befinden sich viele der innovativen Zementsorten noch im Forschungsstadium [20].

Neben CO₂-ärmeren Zementsorten werden in einigen branchenübergreifende Studien Verbesserungen an den in der Zementherstellung eingesetzten Mahlanlagen vorausgesetzt, um den Energieverbrauch und infolgedessen den THG-Ausstoß zu vermindern (ERP und KP). In branchenspezifischen Studien nimmt die Verbesserung der von Mahlanlagen hingegen eine untergeordnete Bedeutung ein [19], [21], [20]. Dies ist auch damit zu begründen, dass die Mahlsysteme fast vollständig elektrifiziert sind und der THG-Ausstoß somit allein vom Emissionsfaktor des bezogenen Stroms abhängt. Bei nahezu vollständiger Dekarbonisierung der Stromversorgung bis 2050 würde durch diese Maßnahme keine THG-Reduktion erreicht werden.

Auch die Verbesserung der Drehrohröfen bzw. deren veränderte Befeuerung wird in THGND und KP als Maßnahme zur Minderung des THG-Ausstoßes genannt. Die Erhöhung der thermischen Effizienz der Drehrohröfen infolge eines verstärkten Einsatz der Best-Available Technology führt auch in der branchenspezifischen Studie [19] zu einer THG-Reduktion. In [21] und [20] wird eine Erneuerung der älteren Öfen durch effizientere und größere Drehrohröfen berücksichtigt. Hemmnisse werden in diesen Studien nicht ausgewiesen, sind aber vor allem in hohen Umrüstkosten zu sehen.

Kalkindustrie

Für den Maßnahmenabgleich werden die Branchenspezifischen Studien [22] und [23] herangezogen.

In der Kalkbranche dominieren prozessbedingte Emission. Diese können in erster Linie durch Verfahrenswechsel oder Verbrauchsreduzierung vermieden werden. In THGND und LFS wird eine Verminderung des Branntkalk-Verbrauchs aufgrund von Veränderungen in anderen Industriebereichen diskutiert. Die prozessbedingten Emissionen die aufgrund des verbleibenden Branntkalkbedarfs entstehen werden in KSZ, LFS, DENA und KP durch CCS vermindert. Nichtsdestotrotz wird CCS aufgrund hoher Kosten, Akzeptanzproblemen und aus Gründen der Umweltverträglichkeit meist (siehe Kapitel 3.3.6) als letzte Option zur Verminderung von THG-Emissionen eingesetzt. Diese Ansicht wird von den branchenspezifischen Studien geteilt [22]. In der Kalkindustrie wird aktiv an einer Nutzung von abgeschiedenen CO₂ geforscht, um die teure Speicherung von CO₂ zu vermeiden. Die hohe Anzahl an CCS Forschungsprojekten spiegelt das Interesse der Branche an CCS und CCU wieder [23]. Eine Reduktion des Kalkverbrauchs als Alternative zu CCS/CCU wird in den branchenspezifischen Studien nicht erwähnt.

Da CCS/CCU Technologien noch keine Marktreife im industriellen Maßstab erlangt haben können kurz- bis mittelfristig lediglich die energiebedingten Emissionen vermindert werden. Zu diesem Zweck werden einerseits Effizienzmaßnahmen wie optimierte Mahlanlagen oder modernere Öfen in ERP, DENA und KP, andererseits Energieträgerwechsel-Maßnahmen in ERP, THGND und DENA benannt.

Effizienzmaßnahmen weisen aufgrund der hohen aktuellen Effizienz der Kalköfen ein geringes Potenzial zur THG-Verminderung auf. Die vorzeitige Erneuerung älterer ineffizienter Öfen wäre zudem mit hohen Kosten verbunden. Die Effizienzmaßnahmen die in energie- und klimapolitischen Szenarien aufgeführt werden (ERP, IEW und KP), sind auch in [22] enthalten. Zu den wichtigsten Maßnahmen zählen:

- 1 bessere Abwärmenutzung,
- 2 Ofenwechsel am Lebensende der existierenden Anlage,
- 3 Ofennachrüstung,
- 4 Organic Rankine Cycle,
- 5 verbesserte Ofendämmung und
- 6 Modernisierung der Mahlanlage.

Laut KP können bessere oder erneuerte Öfen und Mahlanlagen in Zement- und Kalkindustrie zu eine CO₂-Verminderung i.H.v. 1 Mio. t_{CO2} führen.

Energieträgerwechselmaßnahmen werden in den untersuchten Studien mehrfach zitiert. Die Studien weisen diverse Alternativen aus. DENA nennt einen verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energien ohne jedoch Details anzuführen. THGND setzt auf den Einsatz synthetischer Brennstoffe. Diese Möglichkeit wird in KSZ explizit aufgrund der hohen Kosten ausgeschlossen. Die branchenspezifischen Studien [22] und [23] nennen als Alternative den Einsatz der „traditionellen“ (erneuerbaren) Energieträger wie Biomasse, Erdgas, Abfall oder Biogas.

Keramikindustrie

Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Keramikindustrie werden lediglich in den energie- und klimapolitischen Szenarien von ERP genannt. Hierbei werden eine umfassendere Abwärmenutzung und der Einsatz von Mikrowellen im Brennprozess zur Steigerung der Effizienz berücksichtigt. Es werden die branchenspezifischen Studien [24], [25] und [26] für den Maßnahmenabgleich herangezogen.

Die umfassende Abwärmenutzung in ERP wird in allen betrachteten branchenspezifischen Studien berücksichtigt. In [25] wird die Abwärmenutzung unter die Verwendung eines Energiemanagementsystems (EMS) subsumiert. Durch den Einsatz eines EMS ist die Verringerung des Energieverbrauchs um 25 % und eine Reduktion der CO₂-Emissionen um bis zu 30 % möglich. In [24] wird jedoch hervorgehoben, dass insbesondere die Rückgewinnung von Niedertemperaturabgasen noch erhebliche Entwicklungsarbeit erfordert.

Das durch Mikrowellen unterstützte Brennen in der Keramikindustrie wird lediglich in der branchenspezifischen Studie [26] berücksichtigt. Die Maßnahme wird in dieser Studie als aufkommende Technologie bezeichnet. Quantitative Daten zur Senkung des Energieverbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen werden in dieser Publikation nicht ausgewiesen. Die fehlende Berücksichtigung in [24] und [25] könnte auf eine geringe Bedeutung der Maßnahme und somit auf eine Überschätzung in ERP hinweisen.

Schlussfolgerung Zement-, Kalk- und Keramikindustrie:

Im Rahmen des Abgleichs branchenspezifischer Maßnahmen aus den energie- und klimapolitischen Szenarien mit Maßnahmen aus branchenspezifischen Studien wird deutlich, dass in beiden Studientypen meist gleiche Maßnahmen in der Zement- und Kalkindustrie berücksichtigt werden. Des Weiteren wird den Maßnahmen zukünftig meist eine ähnliche Bedeutung zur THG-Reduktion beigemessen (Ausnahme Zement: Verbesserung der Mahlanlagen). Hemmnisse werden in den

energie- und klimapolitischen Szenarien meist nur unzureichend benannt (Forschungsstadium: Rückgewinnung von Niedertemperaturabgasen, CO₂-ärmer Zement).

3.4.2 NE-Metalle

Im Rahmen des Maßnahmenabgleichs werden für die Aluminiumindustrie und die Gießereien die branchenspezifischen Studien [27], [28] und [29] und für die Zinkindustrie die branchenspezifischen Studien [30], [31] und [32] herangezogen. Zu Kupfer, Zinn und sonstigen NE-Metallen sind keine weiteren branchenspezifischen Maßnahmen in den energie- und klimapolitischen Szenarien der ausgewählten Studien verfügbar.

Aluminiumindustrie

In den branchenübergreifenden Studien werden insbesondere der Einsatz von Inerten Anoden und ein höherer Anteil von Sekundäraluminium an der Gesamtaluminiumproduktion als Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgase berücksichtigt.

Die prozessbedingten Treibhausgasemissionen aus dem Anodenabbrand der Aluminiumherstellung werden durch die Umstellung auf inerte Anoden in LFS und THGND reduziert. Inerte Anoden werden im elektrolytischen Prozess nicht verbraucht. Hierdurch können erhebliche Senkungen des spezifischen Energieverbrauchs erreicht werden. Nach [28] sind inerte Anoden eine der Technologien in der Aluminiumindustrie, die zur Erreichung der Klimaziele Forschungspriorität besitzen. Zum Einsatz der inerten Anodentechnologie besteht nach [28] jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf. Eine Kommerzialisierung der Technologie ist nicht vor 2030 zu erwarten [28].

Durch die Erhöhung des Sekundäranteils an der Aluminiumproduktion wird der Energieverbrauch der Aluminiumindustrie deutlich reduziert, da für die Produktion von Sekundäraluminium deutlich geringere Energiemengen benötigt werden [28]. Der verstärkte Einsatz von Sekundäraluminium wird in der branchenübergreifenden Studie KSZ vorausgesetzt. Die Erhöhung der Recyclingquoten zur Erhöhung des Sekundäranteils wird auch in [27], [28], [29] als wichtige Maßnahme zur Reduktion der THG-Emissionen in der Aluminiumindustrie berücksichtigt.

Neben den beiden Maßnahmen zur THG-Reduktion wird in KSZ und LFS der Einsatz eines Magnetheizers angenommen. Informationen zu dieser branchenspezifischen Maßnahme sind in keiner der analysierten branchenspezifischen Studien verfügbar [27], [28], [29].

Zinkindustrie

Analog zur Aluminiumindustrie wird in der Zinkindustrie insbesondere die Erhöhung des Sekundäranteils an der Zinkproduktion als THG-Minderungsmaßnahme hervorgehoben. Überdies wird die Erhöhung der Temperatur in der Zinkindustrie in den branchenübergreifenden Studien berücksichtigt.

Der stärkere Einsatz von Sekundärzink ist eine der Maßnahmen der NE-Metallindustrie, die in KSZ Berücksichtigung findet. Die Wiederverwertung von wiedergewonnenen Zinkprodukten aus Endverbrauchsschrotten spielt auch in [30], [31] und [32] eine Schlüsselrolle für die zunehmende Dekarbonisierung der Zinkindustrie.

Neben einem höheren Sekundäranteil an Zink bei der Zinkproduktion wird in ERP die Steuerung und Erhöhung der Temperatur bei der Herstellung von Primärzink als THG-Reduktionsmaßnahme eingesetzt. In den branchenspezifischen Studien [30], [31] und [32] werden diese Maßnahmen jedoch nicht genannt. Dies könnte folglich auf eine eher geringe Bedeutung dieser Maßnahme hindeuten.

Gießereien

Für die Steigerung der Effizienz wird bei Gießereien in der branchenübergreifenden Studie ERP die direkte Verwendung von Flüssigmetall in der Weiterverarbeitung genannt. Die Lieferung von Flüssigmetall an Gießereien zielt auf die Eindämmung der Wärmeverluste in Folge des Abkühlens des Metalls ab und wird auch in [28] eingesetzt.

Schlussfolgerung NE-Metalle:

Im Maßnahmenabgleich wird deutlich, dass bei der Aluminiumindustrie insbesondere für den Einsatz inerer Anoden noch erheblicher Forschungsbedarf erforderlich ist. Inwieweit der Einsatz und die Durchdringung dieser Effizienzmaßnahme in LFS und in THGND vorausgesetzt wird, wird in diesen branchenübergreifenden Studien jedoch nicht deutlich. Die Erhöhung des Sekundäranteils ist hingegen sowohl in der Aluminium- als auch in der Zinkindustrie eine gängige THG-Minderungsmaßnahme in branchenübergreifenden sowie -spezifischen Studien.

3.4.3 Glasindustrie

In diesem Absatz werden Maßnahmen zusammengefasst, die in den branchenübergreifenden bzw. branchenspezifischen Studien zur Dekarbonisierung der Glasindustrie beitragen können. Für den Abgleich der Maßnahmen werden die branchenspezifischen Studien [33], [34] [35], [36] und [37] herangezogen. In den branchenübergreifenden Studien werden THG-Minderungsmaßnahmen vor allem in der Prozessintegration, -optimierung und -steuerung (u.a. Abwärmenutzung) sowie der Erhöhung des Scherbenanteils zur Steigerung der Materialeffizienz gesehen.

Die Erhöhung der Effizienz innerhalb eines Glaswerkes durch eine umfassendere Abwärmenutzung und eine umfassende Ausschöpfung von verbleibenden Potenzialen wird in ERP und LFS berücksichtigt. Eine maximale Abwärmenutzung durch eine Gemengen- und Scherbenvorwärmung oder eine Stromgewinnung durch eine nachgeschaltete Dampfturbine werden ebenfalls in [33], [35], [36] empfohlen. Außerdem werden in [33], [35] und [36] eine Prozessoptimierung des Schmelzvorganges durch Anwendung von Verbrennungs-Kontroll-Techniken sowie durch die Einführung eines Energiemanagementsystems beschrieben. Eine verbesserte Wärmedämmung der Schmelzwanne und eine Pelletisierung des Gemenges führen nach [33] zu einer weiteren Verbesserung des Schmelzprozesses.

Eine Verminderung von Treibhausgasen wird in nahezu allen branchenübergreifenden Studien ERP, KSZ, LFS und THGND durch einen effizienteren Einsatz von Glas und somit durch eine reduzierte spezifische Nachfrage an Glasmaterialien erzielt. Während in den branchenübergreifenden Studien meist von einer allgemeinen Steigerung der Materialeffizienz gesprochen wird, nennen ERP, [37] und [34] explizit eine Erhöhung bzw. Maximierung des eingesetzten Scherbenanteils als mögliche Maßnahme. In [37] wird zusätzlich eine bessere Verarbeitung und Verwendung von Scherben innerhalb des Recyclingverfahrens thematisiert. In IEW wird zudem von einer sukzessiven Elektrifizierung der Glasherstellung ausgegangen.

Schlussfolgerung Glasindustrie:

Im Rahmen des Abgleichs branchenspezifischer Maßnahmen aus den energie- und klimapolitischen Szenarien mit Maßnahmen aus branchenspezifischen Studien wird deutlich, dass in den branchenspezifischen Studien meist gleiche Maßnahmen berücksichtigt werden. Dabei sind die betrachteten Maßnahmen in den branchenübergreifenden Studien sehr generell gehalten, während in den branchenspezifischen Studien explizit auf umsetzbare Technologien eingegangen wird. Dabei wird deutlich, dass die verbesserte Abwärmenutzung sowie die Maximierung des Scherbenanteils gängige Maßnahmen zur THG-Reduktion sowohl in branchenspezifischen als auch branchenübergreifenden Studien sind.

3.4.4 Papierindustrie

Für den Abgleich der branchenspezifischen Maßnahmen aus den branchenübergreifenden Studien werden die branchenspezifischen Studien [38], [39] und [40] herangezogen. Aus den branchenübergreifenden Studien werden die THG-Minderungsmaßnahmen „hochinnovative

Papier Trocknungsverfahren“ und „verbesserte Prozessintegration, -optimierung und –steuerung“ betrachtet.

Insbesondere wird die Entwicklung und Umsetzung von effizienteren Papier Trocknungsverfahren explizit als Maßnahme in KSZ, LFS, ERP und THGND genannt, da der Trocknungsprozess ein wesentlicher Energieverbraucher in der Papiermaschine bzw. der Papierherstellung ist. Auch in den branchenspezifischen Studien wird die Notwendigkeit von effizienteren Papier Trocknungsverfahren hervorgehoben. So wird in [39] erwähnt, dass rund die Hälfte des Energiebedarfs von Papierfabriken auf die Trocknung von Papierbahnen entfällt und die „dramatische“ Reduzierung des dafür erforderlichen Wärmebedarfs notwendig ist. In [40] wird betont, dass die Trocknung der Papierbahn ca. 70% des fossilen Brennstoffverbrauchs in der Faserstoff- und Papierindustrie ausmacht. Aktuell aufkommende Technologien fokussieren sich in [40] ferner hauptsächlich auf die Trockenpartie der Papiermaschine. Die Autoren erwarten in den kommenden Jahren geringe technologische Weiterentwicklungen in diesem Bereich. In [38] wird der Einsatz von Schuhpressen zur Reduzierung des Stromverbrauchs in der Pressenpartie der Papiermaschine empfohlen. Als energieeffiziente Zukunftstechniken des Papier Trocknungsverfahrens wird ein vereinfachtes Schuhpressensystem genannt.

Energieeffizienzpotenziale in der Papierherstellung werden von den Autoren sonst vor allem in neue Blatt- und Mehrschichtbildungstechniken, die Nutzung des Kühlwassers als Prozesswasser, und langfristig in grundlegenden Änderungen des Prozesses, wie der Herstellung von Papier aus einer Suspension mit deutlich höherem Feststoffgehalt, gesehen. In der Analyse zeigt sich, dass die Entwicklung innovativer Papier Trocknungsverfahren in den branchenübergreifenden Studien wesentlich optimistischer eingeschätzt wird, als dies in den branchenspezifischen Studien der Fall ist. In den branchenspezifischen Studien wird mehrmals aufgezeigt, dass durch die Forschung zur Verbesserung der Papier Trocknung in den letzten Jahren keine großen Fortschritte erreicht wurden. Überdies ist die praktische Umsetzung effizienzverbessernder Maßnahmen in den nächsten Jahren nicht zu erwarten.

Die ganzheitliche Betrachtung der Prozesse und Energieversorgungssystemen von Industriebetrieben ermöglicht es, weitere Energieeinsparpotenziale zu identifizieren. So kann zum Beispiel die Abwärme eines bestimmten Prozessschrittes in einem anderen Teil des Prozesses genutzt werden. In [38] werden die Wärmerückgewinnung in der Holzstoffherstellung bzw. Faserstoffmahlung und in der Papierherstellung hervorgehoben. Außerdem werden als Best Available Practices die Optimierung der Pumpenauslegung und die Überwachung und Steuerung der Prozesse beschrieben. Auch in LFS wird die Systemoptimierung als Maßnahme zur Reduzierung der THG-Emissionen angenommen. In [39] wird darüber hinaus die Wichtigkeit der Einführung und Pflege von Energiemanagementsystemen betont. Außerdem wird die gekoppelte Herstellung von Produkten als Maßnahme zur Reduzierung der CO₂-Emissionen aufgeführt. In ERP wird die Integration von Zellstoff- und Papierherzeugung unterstellt, die ebenfalls in [40] empfohlen wird.

Schlussfolgerung Papierindustrie:

Im Rahmen des Abgleichs branchenspezifischer Maßnahmen aus den energie- und klimapolitischen Szenarien mit Maßnahmen aus branchenspezifischen Studien wird deutlich, dass die meisten Maßnahmen die Energie- und Materialeffizienz und die Integration bzw. Optimierung der Prozesse betreffen. In den branchenübergreifenden Studien sind nur wenige technologische Details zu den Maßnahmen zur Reduktion der THG Emissionen vorhanden, während in den branchenspezifischen Studien explizit auf umsetzbare Maßnahmen wie effizientere Papier Trocknungsverfahren, die Nutzung der Abwärme in der Holzstoffherstellung oder die gekoppelte Zellstoff- und Papierherzeugung eingegangen wird. Insbesondere innovative Papier Trocknungsverfahren stellen eine wesentliche Maßnahme zur THG-Reduktion dar, deren Umsetzung in den branchenübergreifenden Studien jedoch als gegeben angenommen wird. Diese Einschätzung teilen branchenspezifische Studien nicht.

3.4.5 Metallerzeugung und –bearbeitung

Die Metallerzeugung und –bearbeitung beschränkt sich in der folgenden Betrachtung auf die Stahlerzeugung. Für den branchenspezifischen Abgleich wird die Studie [41] herangezogen. Folgend

wird die Nutzung der Abwärme in der Stahlherstellung, gasbasierte Direktreduktionsanlagen zur Erzeugung von Primärstahl und die Nutzung der Hüttengase im Hüttengasverbund zur Reduktion der Fackelverluste betrachtet.

Die Stahlherstellung benötigt Temperaturen von bis zu 1.400°C. Ein wichtiger Aspekt der Energieeinsparung liegt bei der Nutzung der entstehenden Abwärme. Diese kann bei einem integrierten Hüttenwerk bis zu 65 % der eingesetzten Energie ausmachen, wird heute jedoch nur ansatzweise genutzt. Mittels der Kokstroeknkühlung, der Abwärmenutzung der ebenfalls bis zu 1.400°C heißen Hochofenschlacke, der ORC-Abwärmeverstromung aus dem Elektrolichtbogenofen und der Abwärmenutzung der Walzwerke, kann eine deutliche Senkung des spezifischen Energieverbrauchs erreicht werden [41]. Die verbesserte Abwärmenutzung in der Stahlerzeugung wird ebenfalls in KSZ und ERP zur Reduktion der Treibhausgase eingesetzt. Insbesondere in Sinteranlagen und in Anlagen zur Koksherstellung wird die Abwärmenutzung auch in [41] als wichtige Minderungsmaßnahme erachtet.

Zur Reduktion des Energieverbrauchs werden Eisenerzreduktionen in THGND und den Szenarien IEW-Z95-TM&EL nicht mehr mit Hilfe des koksbasierten Hochofenprozesses erfolgen. Stattdessen soll die primäre Stahlerzeugung im Jahr 2050 vollständig in gasbasierten Direktreduktionsanlagen und anschließendem Schmelzvorgang im Lichtbogenofen durchgeführt werden. Gasbasierte Direktreduktionsanlagen zur Erzeugung von Primärstahl werden auch in [41] als wichtige branchenspezifische Maßnahme zur Treibhausgasreduktion berücksichtigt. In IEW-Z95-EL&TM steigt zudem der Anteil der Sekundärstahlherstellung auf 48 % der gesamten Stahlproduktion im Jahr 2050.

Weitere Schlüsseloptionen zur Energieeinsparung in der Branche sind ein Hüttengasverbund zur Reduktion der Fackelverluste, die Gichtgasrückführung in den Hochofenprozess, bei welcher das im Gichtgas enthaltene Kohlenmonoxid einen Teil des Kokses in der Eisenerzreduktion ersetzt und das endabmessungsnahe Gießen, womit eine umfangreiche Wiedererhitzung und Umformung des Stahls vermieden wird (KSZ, ERP). Diese Maßnahmen werden auch in [41] berücksichtigt.

Schlussfolgerung Metallerzeugung und -bearbeitung:

Im Rahmen des Maßnahmenabgleichs in der Metallerzeugung und –bearbeitung wird lediglich die Stahlerzeugung betrachtet. Dabei wird deutlich, dass alle Minderungsmaßnahmen aus den branchenübergreifenden Studien auch in der analysierten branchenspezifischen Studie enthalten sind. Wie in der Zement-, der Glas- und Papierindustrie zuvor, wird die Abwärmenutzung als wichtige THG-Minderungsmaßnahme eingeschätzt.

3.4.6 Grundstoffchemie

Im Folgenden werden wesentliche Minderungsmaßnahmen aus den branchenspezifischen Studien [42] und [43] mit den Maßnahmen aus den branchenübergreifenden Studien verglichen. Hierbei werden die umfassende Abwärmenutzung, der Einsatz verbesserter Katalysatoren und der Nutzung von Niederdruckdampf betrachtet.

In ERP wird die thermische Nutzung der Abgase bei der Calciumcarbidherstellung als Minderungsmaßnahme berücksichtigt. Die verbesserte Abwärmenutzung durch den Einsatz von Organic Rankine Cycle-Anlagen, die Ausspeisung von Wärme in Fernwärmenetze und verbesserter Wärmetauscher werden auch in [43] eingesetzt. Zudem wird die Verbesserung der Abwärmenutzung auch [42] als wesentliche THG-Minderungsmaßnahme angenommen.

In ERP wird der Einsatz von verbesserten Katalysatoren zur Reduktion der Treibhausgase in der Chemieindustrie angenommen. Diese selektiveren, aktiveren und länger haltbaren Katalysatoren werden zur Steigerung der Energieeffizienz und der damit verbunden zunehmenden Dekarbonisierung auch in [43] als inkrementelle Effizienzverbesserung berücksichtigt.

Neben dem Einsatz verbesserter Katalysatoren und der verstärkten Abwärmenutzung wird in ERP die Verwendung von Niederdruckdampf in Reaktoren zur Erreichung des THG-Minderungsziels vorausgesetzt. In diesem Zusammenhang wird die Synthese bei der Ammoniakherzeugung unter niedrigerem Druck angenommen. In [43] wird abfallender Niederdruck/Überschussdampf auf ein nutzbares Druckniveau angehoben, um ihn verwenden zu können. Dadurch kann auf die zusätzliche Erzeugung von Frischdampf mit entsprechendem Druckniveau verzichtet werden. Hierzu werden hocheffiziente Wärmepumpen verwendet. Aufgrund der hohen Investitionskosten wird die mechanische Dampfkompensation bisher noch nicht flächendeckend eingesetzt und kommt bisher nur an großen Verbundstandorten zum Einsatz.

In IEW werden insbesondere für die Ethylen- und Ammoniakherstellung Details zu Verminderungsmaßnahmen diskutiert. Für die Ammoniakherstellung werden in Abhängigkeit des anvisierten Klimaziels verschiedene Herstellungspfade unterschieden. Im Referenzszenario IEW-T erfolgt zunächst ein Energieträgerwechsel: Öl wird vollständig durch Erdgas substituiert. In IEW-Z80-EL wird Ammoniak zu zwei Dritteln auf der Basis von elektrolysebasiertem Wasserstoff hergestellt. In den Szenarien mit höchstem Klimaschutzambitionsniveau IEW-Z95-TM&EL wird zudem das innovative Verfahren der Methanpyrolyse eingesetzt indem Erdgas in Wasserstoff und CO₂ zerlegt wird. Auch in [43] werden die in IEW genannten Verminderungsoptionen diskutiert. Dabei wird der Technologiereifegrad der Methanpyrolyse auf vier bis fünf geschätzt.

Für die Ethylenherstellung kommt in IEW-Z80&95-EL das innovative Methanol-to-olefine Verfahren zum Einsatz, welches ebenfalls in [43] genannt wird. In den Szenarien IEW-Z80&95-TM wird angenommen, dass Ethylen nach wie vor Gas-Steamcracker zur Ethylenproduktion herangezogen werden und das benötigte Gas synthetisch hergestellt wird.

Schlussfolgerung Grundstoffchemie

Im Rahmen des Maßnahmenabgleichs in der Grundstoffindustrie wird deutlich, dass die branchenspezifischen Minderungsmaßnahmen aus den branchenübergreifenden Studien auch in den branchenspezifischen Studien Berücksichtigung finden. Dies trifft insbesondere für [43] zu. In dieser Studie wird eine aktuelle und umfangreiche Sammlung technischer Maßnahmen zur Dekarbonisierung der chemischen Industrie in Europa dargelegt.

3.5 Auswirkungen der Energieentwicklungsszenarien auf die Wettbewerbsfähigkeit (IER)

Hinsichtlich der Analyse von Auswirkungen der unterschiedlichen Studien und Szenarien auf die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie besteht ein Vakuum. In keiner der Studien wird dazu Stellung genommen. Lediglich in KP wird konstatiert, dass „auch bei Verfolgung weniger ambitionierter Ziele ohne (auch temporären) globalen Ambitions- und Instrumentenkonsens trotz insgesamt positiver Effekte ein Schutz einzelner Branchen im internationalen Wettbewerb nötig wäre“. Hier besteht bislang ein Defizit, das im Rahmen der vorliegenden Studie durch die Arbeiten im Arbeitspaket 3 (AP 3) geschlossen werden soll.

Exkurs – Behandlung des Themas „Kosten der (Industrie-)Energiewende“ in den analysierten Studien

Die Kosten für die Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung werden in fünf der sieben Studien quantifiziert. KP, IEW und LFS legen den Fokus auf eine volkswirtschaftliche sektorale, maßnahmenbezogene Analyse (in KP und LFS) während ERP und KSZ sich auf die gesamtwirtschaftlichen Effekte konzentrieren. Eine dritte mögliche Analyse der Kosten, die betriebswirtschaftliche Sichtweise, wird in LFS und KSZ modellseitig berücksichtigt, jedoch nicht separat ausgewiesen. Modellbedingt bilden die Kosten aus Investorenperspektive dort die Grundlage für die Maßnahmenumsetzung in der Industrie. In THGND wurden keine Kosten ermittelt. In EU-T werden Kosten ermittelt, es erfolgt jedoch keine separate Ausweisung für Deutschland.

4. FAZIT UND AUSBLICK

In der Studienanalyse wird deutlich, dass die Entwicklung der deutschen Industrie zur Erreichung eines nahezu dekarbonisierten Energiesystems von vielen Einflussfaktoren abhängt. Um die Zielvorgaben in der Industrie erreichen zu können, müssen geeignete CO₂-Minderungsmaßnahmen definiert und der Grad der Maßnahmenumsetzung an die Zielsetzung angepasst werden. Neben dem übergeordneten Klimaschutzambitionsniveau beeinflussen die gewählten Rahmendaten die Ergebnisse der Szenarien stark. Hierbei kann zwischen direktem und indirektem Einfluss auf die industriellen Kerngrößen unterschieden werden. Die Entwicklung der Produktionsmengen der Industriegüter beeinflusst den THG-Ausstoß beispielsweise direkt. Indirekt wird der THG-Ausstoß z. B. durch den CO₂-Preis getrieben, der in den meisten Studien eine exogene Größe darstellt. Wird langfristig von einem stark steigenden CO₂-Preis ausgegangen, werden THG-Verminderungsmaßnahmen in den Modellen früher und stärker umgesetzt. Weitere entscheidende Annahmen stellen beispielsweise die Kosten und die Verfügbarkeit und damit der Einsatz von CCS, Power-to-Heat, synthetischer Brennstoffe oder Biomasse dar.

Die vorliegende Meta-Analyse zeigt, dass in Szenarien, in denen eine 95 %-ige Reduktion der THG-Emissionen ggü. 1990 angestrebt wird, auch die Emissionen des Industriesektors um 95 % oder mehr reduziert werden müssen. Hierzu werden verschiedene Transformationspfade aufgezeigt, die sich grundlegend auf die folgenden Lösungsoptionen beschränken:

- Inkrementelle Verbesserungen der Energie- und Materialeffizienz
- Einsatz von Biomasse
- Einsatz von synthetischen Brennstoffen
- Einsatz von Power-to-Heat
- Einsatz von Carbon Capture and Storage

Die Rolle der Lösungsoptionen in den untersuchten Studien unterscheidet sich stark. So wird in THG-Z95 die 95 %-ige Reduktion der THG-Emissionen durch den erhöhten Einsatz synthetischer Brennstoffe und Power-to-Heat ermöglicht. In KP-Z95 hingegen, nehmen synthetische Brennstoffe und PtH eine im Vergleich zu THG-Z95 untergeordnete Rolle ein. In dieser Studie wird die 95 %-ige THG-Verminderung in der Industrie v.a. durch den Einsatz von CCS und Biomasse ermöglicht. Da bei einer 95 %-igen THG-Verminderung in der Industrie auch die prozessbedingten Emissionen weitestgehend reduziert werden müssen, kommt es in den Studien zwangsläufig entweder zum Einsatz von synthetischen Brennstoffen oder CCS. Welche der Lösungsoptionen zum Einsatz kommt, ist stark abhängig von den zugrundeliegenden Annahmen. Energie- und Materialeffizienz spielen in KP-Z95 im Vergleich zu THG-Z95 und KSZ-Z95 eine untergeordnete Rolle. KSZ-Z95 und THG-Z95 setzen verstärkt auf Energieeffizienzmaßnahmen und erzielen im Jahr 2050 einen ähnlichen Endenergieverbrauch. Die Rolle der Energie- und Materialeffizienz unterscheidet sich in diesen beiden Szenarien dennoch deutlich. In KSZ-Z95 werden Energieeffizienzmaßnahmen und die Reduktion des EEV als zentrale Maßnahme zur THG-Verminderung eingesetzt. Im THG-Z95 werden Energieeffizienzmaßnahmen in erster Linie eingesetzt, um den Bedarf an erneuerbarem Strom und synthetischen Brennstoffen möglichst gering zu halten und somit den Ausbaubedarf Erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien zu minimieren.

Es wird zudem ein Abgleich branchenspezifischer Maßnahmen aus den energie- und klimapolitischen Szenarien mit Maßnahmen aus branchenspezifischen Studien durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Detailtiefe kann lediglich ein Abgleich der Maßnahmen und teilweise deren Bedeutung durchgeführt werden. Dabei wird deutlich, dass den Maßnahmen in den branchenübergreifenden Studien häufig eine ähnliche Bedeutung zur Reduktion der Treibhausgase wie in den branchenspezifischen Studien beigemessen wird. In den branchenübergreifenden Studien wird die

Durchdringung der branchenspezifischen Technologie jedoch teilweise überschätzt und der dafür notwendige Forschungsbedarf unterschätzt.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016.
- [2] Energiewende im Überblick. Berlin: Die Bundesregierung, 2018.
- [3] Erneuerbare Energien in Zahlen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2017.
- [4] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Stand: September 2017 - 1990 bis 2016. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2017
- [5] Klimaschutz in Zahlen: Sektorenziele 2030. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 2018.
- [6] Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose - Projekt Nr. 57/12 - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie . Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2014.
- [7] Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth et al.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V., 2015
- [8] Capros, P. et al.: EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. Brüssel: Europäische Kommission, 2016.
- [9] Günther, Jens et al.: Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Berlin: Umweltbundesamt, 2017.
- [10] Pfluger, Benjamin et al.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2017.
- [11] Gebert, Philipp et al.: Klimapfade für Deutschland. München: The Boston Consulting Group (BCG), prognos, 2018.
- [12] Bründerlinger, Thomas et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. Berlin: dena, 2018.
- [13] Kruse, Jürgen et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil B. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, 2018.
- [14] BMWi: Langfrist- und Klimaszenarien. In: <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html>. (Abruf am 2018-01-09); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6wLNXbxuS>); Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017.
- [15] Fleiter, Tobias et al.: A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. In: Energy Strategy Reviews 22 (2018) 237-254. Philadelphia, USA: Elsevier, 2018.
- [16] Preise - Verbraucherpreisindizes für Deutschland - Lange Reihen ab 1948; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2018.
- [17] Hübner, Tobias et al.: Die Rolle synthetischer Brennstoffe zur Erreichung der klimapolitischen Ziele - Bedeutung im Jahr 2050. In: BWK (Brennstoff, Wärme, Kraft) - Das Energie-Fachmagazin 10/2018. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2018.
- [18] Hübner, Tobias et al.: Modellgestützte Analyse synthetischer Brennstoffe in der Industrie bei ambitioniertem Klimaschutz. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2019.
- [19] Carbon Control and Competitiveness Post 2020: The Cement Report. London: Climate Strategies, 2014.
- [20] The role of CEMENT in the 2050 LOW CARBON ECONOMY. Brüssel, Belgien: European Cement Association, 2013
- [21] Cement Technology Roadmap 2009 - Carbon emissions reductions up to 2050. Paris, Genf: International Energy Agency (IEA), World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2009.
- [22] Stork, Michiel et al.: A Competitive and Efficient Lime Industry - Cornerstone for a Sustainable Europe. Brussels: European Lime Association (EULA), 2014
- [23] Innovation in the lime sector. Brussels: European Lime Association (EuLA), 2017.
- [24] Unser Weg ins Jahr 2050 - Fahrplan der Keramikindustrie. Brussels: Cerame-Unie The European Ceramic Industry Association, 2013

- [25] Weber, Hartmut et al.: Energieeffizienzverbesserung in der keramischen Industrie. In: KRdL-Experten-Forum „Energieeffizienz im Industrieanlagen- und Ofenbau“; Bonn: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL, 2010.
- [26] Reference Document on Best Available Techniques (BAT) in the Ceramic Manufacturing Industry. Brüssel: Europäische Kommission, 2007
- [27] Dessart, Francois J. et al.: Non-ferrous Metals Manufacturing: Vision for 2050 and Actions Needed. Luxembourg: JRC Science for Policy Report, 2017.
- [28] Moya, J.A et al.: Energy Efficiency and GHG Emissions: Prospective Scenarios for the Aluminium Industry. Bruxelles: Europäische Kommission, 2015
- [29] Moss, Ray et al.: Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Petten: JRC - Institute for Energy and Transport, 2013.
- [30] Grund, Sabina: Ressourcen- und Klimaschutz durch Zinkrecycling in der EU. Clausthal-Zellerfeld: GDMB Verlag GmbH, 2014.
- [31] Ekman Nilsson, Anna et al.: A Review of the Carbon Footprint of Cu and Zn Production from Primary and Secondary Sources. Basel: MDPI, 2017.
- [32] Sectoral Roadmap Zinc 2050. Brussels: International Zinc Association, 2012.
- [33] Die deutsche Glasindustrie auf einen Blick: 2015 und 2016. Düsseldorf: Bundesverband Glas, 2017.
- [34] UK glass manufacturing sector decarbonisation roadmap to 2050. Sheffield: British Glass, 2014.
- [35] Glasindustrie in Deutschland - Eine Branchenanalyse. Hannover: Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IGBCE), 2014.
- [36] Scalet, Bianca et al.: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass. Sevilla: Joint Research Centre of the European Commission (JRC), 2013
- [37] The EU Emissions Trading System (EU ETS). Brüssel: Europäische Kommission, 2013
- [38] Suhr, Michael u.a. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. Luxembourg: Europäische Kommission, 2015
- [39] Dispan, Jürgen: Papierindustrie in Deutschland - Branchenreport 2013. Stuttgart: IMU Institut, 2013.
- [40] The Forest Fibre Industry - 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy. Brussels: The Confederation of European Paper Industries (CEPI), 2011.
- [41] Wörtler, Martin; Schuler, Felix; Voigt, Nicole; Schmidt, Torben; Dahlmann, Peter; Lüngen, Hans; Ghenda, Jean-Theo: Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050 - Technical and economic analysis of the sector's CO2 abatement potential. Boston: Steel Institute (VDEh), 2013
- [42] Stork, Michiel et al.: Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050. Utrecht: Ecofys - A Navigant Company, 2018.
- [43] Bazzanella, Alexis et al.: Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 2017.
- [44] Bosold, Diethelm; Pickhardt, Roland: Zemente und ihre Herstellung - Zement-Merkblatt Betontechnik. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2014
- [45] Chapter 5: Cement sector. Paris, Hamburg: ET Risk Consortium, 2017.
- [46] Klassifikationen - Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008). Wiesbaden: Statistische Bundesamt, 2008

6. ANHANG

6.1 Studiensteckbriefe

ERP: ENERGIEREFERENZPROGNOSE (2014)

Auftraggeber: BMWi
Bearbeiter: EWI, Prognos, GWS

Ausgangspunkt

Wahrscheinliche energiewirtschaftliche Entwicklung (Trend); Nationale energie- und klimapolitische Ziele (Ziel)

Sektoren & Branchen

- Industrie, Haushalte, GHD, Verkehr, Energiewirtschaft
- Detaillierte Beschreibung aller angegebenen Branchen – u.a. Papier, Chemie, Maschinenbau, Metallerzeugnisse, Metallerzeugung- und bearbeitung, ...
- Bis zu NACE 3 Level



Besonderheiten

- Prozessbedingte Emissionen werden nicht betrachtet
- Starke Effizienzverbesserung
- Sehr hohes inländisches Biomassepotenzial und -nutzung

Industriemodell

- Sektormodell, Bottom-up
- Perspektive: volkswirtschaftlich
- Zeithorizont: 2011-2050

Industriesektor (2050)

Kerngrößen	ERP-T	ERP-Z	Relevante Maßnahmen
PtG & PtL	Nein	Nein	ERP-T
Biomasse (PJ)	k.A.	203	Branchenspezifische Effizienzmaßnahmen
CCS	Nein	Nein	ERP-Z
CO2 (€/t CO ₂)	76		Zusätzliche Effizienzmaßnahmen
Eigenversorgung	k.A.		Höhere Diffusion Effizienzmaßnahmen
Carbon Leakage Schutz	Ja***		Vermeht Biomasse Einsatz
Produktionsmenge	k.A.	↓**	

Sinkt ggü. Basis Sinkt verstärkt ggü. Basis Annahme Ergebnis

EEV Strom **EEV Brennstoffe**

Jahr	Basis	ERP-T	ERP-Z
2014	2,5	2,2	1,7
2050	0,8	0,8	0,6
2050 (Zusatz)	1,7	1,3	1,1

Prozessbed. Em. **Energiebed. Em.**

Jahr	Basis	ERP-T	ERP-Z
2014	182	80	64
2050	61	121	64

*EEV: Endenergieverbrauch
** Nur für Stahl angegeben
***Kopplung EU-ETS mit internat. Klimaschutzanstrengungen

KSZ: KLIMASCHUTZSZENARIEN 2050 (2015)

Auftraggeber: BMUB
Bearbeiter: ISI, Öko-Institut

Ausgangspunkt

Szenarien mit verschiedenen klimapolitischen Ambitionsniveaus; Fortschreibung Trend und Erreichung der Klimaschutzziele

Sektoren & Branchen

- Industrie, Haushalte, Verkehr, GHD, Landwirtschaft, LULUCF, Energiewirtschaft
- Detaillierte Beschreibung von Stahl, NE-Metalle, Grundstoffchemie, Glas, Zement & Keramik, Papier, Nahrungsmittel, Automobil
- Bis zu NACE 3 Level

Referenzszenario KSZ-T	Fortsetzung des Trends bis 2050	6,2
Zielszenario KSZ-Z80	Ziel: 80% THG-Reduktion	4,9
Zielszenario KSZ-Z95	Ziel: 95% THG-Reduktion	4,0

EEV_{2050-ges} in EJ

Besonderheiten

- Negative prozessbedingte Emissionen in der Industrie durch CCS und Biom.
- Teilweise sehr hoher CO₂-Preis
- Hoher Stromanteil am Endenergieverbrauch (P2H, E-Mob.)

Industriemodell

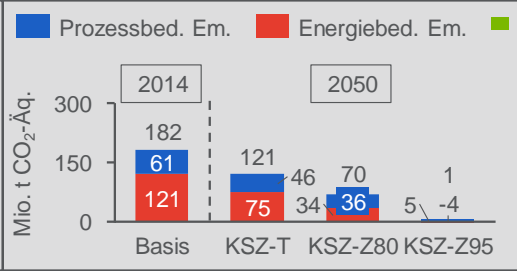
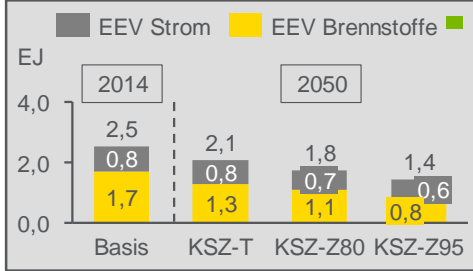
- FORECAST Industry, Bottom-up
- Perspektive: betriebswirtschaftlich
- Zeithorizont: 2010 - 2050

Industriesektor (2050)

Kerngrößen	KSZ-T	KSZ-Z80	KSZ-Z95	Relevante Maßnahmen
PtG & PtL	Nein	Nein	Ja	KSZ-T & KSZ-Z80
Biomasse (PJ)	k.A.	388	405	Steigerung Materialeffizienz
CCS	Nein	Nein	Ja	KSZ-Z95
CO ₂ (€/t CO ₂)	50	130	200	Verstärkte Materialeffizienz
Eigenversorgung	k.A.			Zusätzliche Effizienzmaßnahmen
Carbon Leakage Schutz	k.A.			
Produktionsmenge	↓	↓	↓↓	

↓ Sinkt ggü. Basis ↓ Sinkt verstärkt ggü. Basis

Annahme Ergebnis



*EEV: Endenergieverbrauch

EU-T: EU REFERENZSZENARIO (2016)

Auftraggeber: EC
Bearbeiter: University of Athens

Ausgangspunkt

Umsetzung der aktuellen europäischen Treibhausgasziele; Bis Ende 2015 beschlossene Direktiven berücksichtigt (Trend)

Sektoren & Branchen

- Industrie, Haushalte & GHD, Verkehr, Landwirtschaft, LULUCF, Energiewirtschaft
- Es wird keine branchenspezifische Beschreibung vorgenommen – Eisen und Stahl, NE-Metalle, Glas werden erwähnt
- Bis zu NACE 2 Level

Referenzszenario EU-T

Fortschreibung bei derzeitigen Regularien

7,8 EEV 2050-ges in EJ

Besonderheiten

- Endogene CO2-Preis Ermittlung
- Trotz fehlender CO2-Reduktionszielsetzung wird CCS eingesetzt
- Direktive für EE läuft aus

Industriemodell

- Industriemodul des Primes Modell
- Perspektive: k.A.
- Zeithorizont: 2010 - 2050

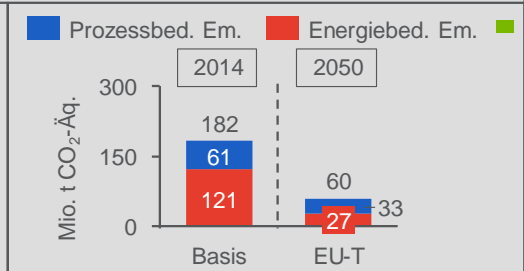
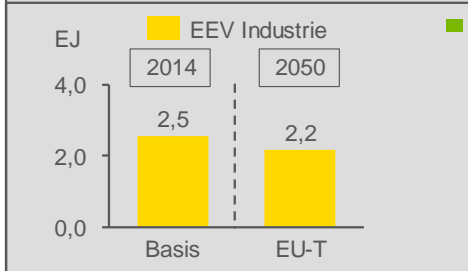
Industriesektor (2050)

Kerngrößen	EU-T
PtG & PtL	Nein ■
Biomasse (PJ)	k.A.
CCS	Ja ■
CO2 (€/t CO ₂)	88 ■
Eigenversorgung	k.A.
Carbon Leakage Schutz	Ja** ■
Produktionsmenge	k.A.

Relevante Maßnahmen

- Keine Angabe branchenspezifischer Maßnahmen
- Verstärkte Energieeffizienz

■ Annahme ■ Ergebnis



*EEV: Endenergieverbrauch
**Wird im Modell für einige Sektoren berücksichtigt (carbon leakage list)

LFS: LANGFRISTSZENARIOEN (2017)

Auftraggeber: BMWi
Bearbeiter: ISI, Consentec, Ifeu

Ausgangspunkt

Entwicklung des Energiesystems ohne Vorgabe energiepolitischer Ziele (Trend); energiepolitische Ziele der Bundesregierung (Ziel)

Sektoren & Branchen

- Industrie, Haushalte & GHD, Verkehr, Energiewirtschaft
- Besonders detaillierte Betrachtung von Stahl, Zement, Grundstoffchemie, NE-Metalle, Glas
- Bis zu NACE 3 Level

Referenzszenario LFS-T: Trendentwicklung ohne Zielvorgaben (7,1 EEV_{2000-ges} in EU)

Basisszenario LFS-Z: Ziel: 80% THG-Reduktion (5,5 EEV_{2000-ges} in EU)

12 Szenarien (5 verfügbar)

Besonderheiten

- CCS zugelassen, aus Kostengründen jedoch nicht eingesetzt
- Referenzszenario ist kein Trendszenario, da keine konsistente Welt abgebildet wird

Industriemodell

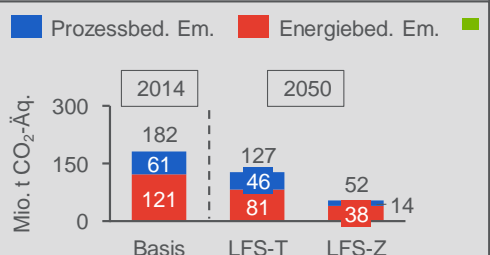
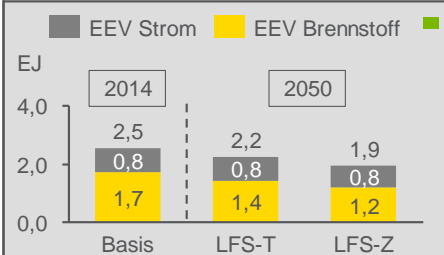
- FORECAST Industry, Bottom-up
- Perspektive: betriebswirtschaftlich
- Zeithorizont: 2013 - 2050

Industriesektor (2050)

Kerngrößen	LFS-T	LFS-Z	Relevante Maßnahmen
PtG & PtL	Nein	Nein	LFS-T
Biomasse (PJ)	180	421	<ul style="list-style-type: none"> Materialeffizienz Effizienzmaßnahmen Technologische Lerneffekte
CCS	Nein	Nein	LFS-Z
CO2 (€/t CO ₂)	30	100	<ul style="list-style-type: none"> Höhere Materialeffizienz Höhere Diffusion Effizienzmaß. Innovative Herstellungsverfahren Erfolgreiche Markteinführung Technologien
Eigenversorgung	k.A.		
Carbon Leakage Schutz	Ja**		
Produktionsmenge	↓	↓↓	

↓ Sinkt ggü. Basis ↓↓ Sinkt verstärkt ggü. Basis

Legend: [Red] Annahme [Green] Ergebnis



*EEV: Endenergieverbrauch
**durch ähnliches klimapolitisches Ambitionsniveau in Europa

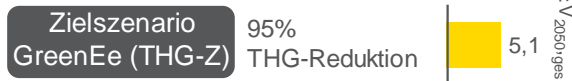
THGND: THG-NEUTRALES DEUTSCHLAND (2017) Auftraggeber: UBA Bearbeiter: Fachgebiet I 2.2 UBA

Ausgangspunkt

Ambitionierter und energetisch effizienter Transformationspfad hin zur Treibhausgasneutralität (95 %); Nur Zielszenario

Sektoren & Branchen

- Industrie, Haushalte & GHD, Verkehr, Landwirtschaft, LULUCF, Abfall & Abwasser, Energiewirtschaft
- Besonders detaillierte Betrachtung von Stahl, Zement, Grundstoffchemie, NE-Metalle
- Bis zu NACE 3 Level



Vier weitere unveröffentlichte Szenarien

Greenlife	Green-Supreme
Green	GreenMe

Besonderheiten

- Starker PTX Einsatz
- Kein CCS trotz 95% THG-Reduktionsziel
- Rückläufige Biomassennutzung
- Geringe Detailtiefe der Studie

Industriemodell

- URMOD, Rohstoffströme
- Perspektive: volkswirtschaftlich
- Zeithorizont: 2015 - 2050

Industriesektor (2050)

Kerngrößen	THG-Z
PtG & PtL	Ja ■
Biomasse (PJ)	k.A.
CCS	Nein ■
CO2 (€/t CO ₂)	k.A.
Eigenerzeugung	k.A.
Carbon Leakage Schutz	k.A.
Produktionsmenge	↑ ■ **

↓ Sinkt ggü. Basis ↓ Sinkt verstärkt ggü. Basis ■ Annahme ■ Ergebnis

EEV (EJ)

2014	2050
2,5	1,5
0,8 (EEV Brennstoff)	0,8 (EEV Brennstoff)
1,7 (EEV Strom)	0,7 (EEV Strom)

Mio. t CO₂-Äq.

2014	2050
182	16
61 (Prozessbed. Em.)	
121 (Energiebed. Em.)	

*EEV: Endenergieverbrauch
**Nur für Stahl angegeben

KP: KLIMAPFADE FÜR DEUTSCHLAND (2018)

Auftraggeber: BDI
Bearbeiter: BCG, Prognos

Ausgangspunkt

Fortschreibung der derzeitigen Entwicklung (Trend); Kombination politische Rahmenbedingungen und THG-Reduktionsziele (Ziel)

Sektoren & Branchen

- Industrie, Haushalte & GHD, Verkehr, Land- und Abfallwirtschaft, Energiewirtschaft
- Besonders detaillierte Betrachtung von Stahl, Zement, Grundstoffchemie, NE-Metalle
- Bis zu NACE 3 Level

Referenzszenario KP-T	Fortsetzung des Trends bis 2050	7,3
Zielszenario KP-Z80	Ziel: 80% THG-Reduktion, NA**	5,8
Zielszenario KP-Z95	Ziel: 95% THG-Reduktion, GK**	5,9

EEV_{2050, gas} in EJ

Besonderheiten

- Biomasse hauptsächlich in Industrie
- Ökonomischen Auswirkungen von Klimaschutztechnologien
- Politischer Rahmen: Nationale Alleingänge vs. Globaler Klimaschutz

Industriemodell

- Industrie: Sektormodell, Bottom-up
- Perspektive: volkswirtschaftlich
- Zeithorizont: 2015 - 2050

Industriesektor (2050)

Kerngrößen	KP-T	KP-Z80	KP-Z95	Relevante Maßnahmen
PtG & PtL	Nein	Ja	Ja	KP-T ▪ Effizienzmaßnahmen ▪ Erneuerbare in der Wärmeerzeugung
Biomasse (PJ)	216	621	736	
CCS	Nein	Nein	Ja	KP-Z80 & KP-Z95 ▪ Höhere Diffusion Effizienzmaß. ▪ Mehr Erneuerbare in der Wärmeerzeugung
CO2 (€/t CO ₂)	45		124	
Eigenversorgung	k.A.			
Carbon Leakage Schutz	Ja***		Nein***	
Produktionsmenge	↑	k.A.	↑↑	

↓ Sinkt ggü. Basis ↓↓ Sinkt verstärkt ggü. Basis ■ Annahme ■ Ergebnis

EEV Strom & Brennstoff

EEV	2014	2050
Strom	0,8	0,8
Brennstoff	1,7	1,6
Gesamt	2,5	2,4

Prozessbed. Em. & Energiebed. Em.

Em.	2014	2050
Prozessbed. Em.	61	57
Energiebed. Em.	121	91
Gesamt	182	148

*EEV: Endenergieverbrauch
** Nationale Alleingänge, Globaler Klimaschutz
***Nur bei nationalen Alleingängen zum Schutz der Industrie

IEW: INTEGRIERTE ENERGIEWENDE (2018)

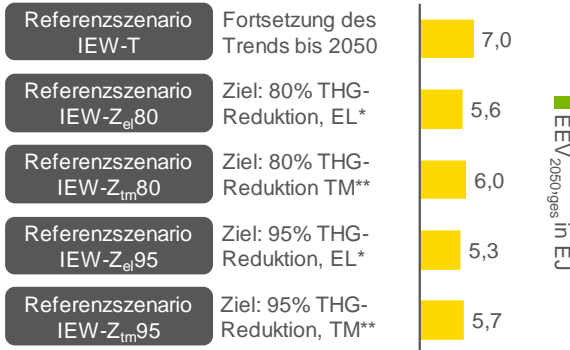
Auftraggeber: Dena
Bearbeiter: EWI

Ausgangspunkt

Fortschreibung bisheriger Entwicklung (Trend) und THG- Verminderungsziele (Ziel) durch TechnologiemiX und Elektrifizierung

Sektoren & Branchen

- Industrie, Haushalte & GHD, Verkehr, Land- und Abfallwirtschaft, Energiewirtschaft
- Besonders detaillierte Betrachtung von Stahl, Aluminium, Kupfer, Zement, Kalk, Glas, Ammoniak, Chlor, Ethylen und Papier
- Bis zu NACE 3 Level



Besonderheiten

- Verstärkte Nutzung von Wasserstoff in den Zielszenarien (insb. PtX in der chem. Industrie)

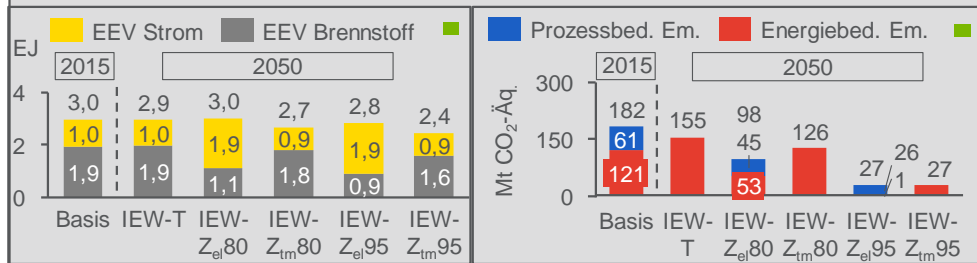
Industriemodell

- Es findet keine Modellierung statt. Verbrauchsentwicklungen sind exogen vorgegeben

Industriesektor (2050)

Kerngrößen	IEW-					Maßnahmen
	T	Z _{el} 80	Z _{tm} 80	Z _{el} 95	Z _{tm} 95	
PtG & PtL	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	IEW-T ▪ Effizienzmaß.
Biomasse (TWh)	86	104	108	90	97	IEW-Z _{el} 80&95 ▪ Verstärkte Effizienzmaß.
CCS	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	▪ Wechsel Verfahrensrouen
CO2 (€/t CO ₂)	60	k.A.				IEW-Z _{tm} 80&95 ▪ Verstärkte Effizienzmaß.
Eigenversorgung	k.A.					▪ H ₂ -Nutzung
Carbon Leakage Schutz	Ja					
Produktionsmenge	↑↑					

↓ Sinkt ggü. Basis ↓ Sinkt verstärkt ggü. Basis ■ Annahme ■ Ergebnis



*EEV: Endenergieverbrauch
**EL: Elektrifizierungsszenarien
**TM: TechnologiemiXszenarien
©2019 Navigant Energy Germany GmbH
Nicht zur Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte bestimmt

6.2 Ökonomische Modellbeschreibungen

<p>Klimaschutzszenario 2050 (2015), S. 400 ff.</p>	<p>Analyse gesamtwirtschaftlicher Effekte</p>
	<p>ASTRA-D</p> <p>Das Modell ist ein Multi-Paradigmen-Simulationsmodell, in welchem System Dynamics strukturgebend fungiert. Über die betriebswirtschaftlichen (Differenz-)Investitionen aus den Sektormodellen wird das Modell getrieben. Es wird versucht, die Finanzierungsströme darzustellen, um so die Gegenfinanzierung zu sichern.</p> <p>Mit ASTRA-D werden die nationalen Auswirkungen ermittelt, bezogen auf BIP, sektorale Bruttowertschöpfung sowie Beschäftigung.</p>
<p>Entwicklung der Energiemärkte Energie-referenzprognose (2014), S. 534 ff.</p>	<p>FARM-EU</p> <p>Das Modell ist ein multi-sektorales allgemeines Gleichgewichtsmodell mit globaler Abdeckung und der expliziten Modellierung von Deutschland und sechs anderen EU Mitgliedsstaaten. Der Investitionspfad wird an die Investitionserfordernisse, die die Bottom-up Modellierung berichtet, angepasst.</p> <p>Die ermittelten Auswirkungen auf die internationalen Märkte werden für die Energieimporte -exporte und die energiebedingten CO₂-Emissionen außerhalb Deutschlands ausgewiesen, nicht jedoch für die Handelseffekte.</p>
	<p>Analyse gesamtwirtschaftlicher Effekte</p> <p>Die Berechnungen zu den gesamtwirtschaftlichen Effekten werden mit dem energie- und umweltökonomischen Modell PANTA RHEI durchgeführt. Es erfolgt keine Rückkopplung der Ergebnisse auf die den Szenarien zugrunde liegenden Rahmenannahmen, z. B. die Produktionsmengen in der Industrie.</p>
	<p>PANTA RHEI</p> <p>Das Modell verknüpft für Deutschland volkswirtschaftliche Größen auf Basis der amtlichen Statistik und Energiemärkte vollständig interdependent. Verhaltensparameter werden ökonometrisch geschätzt.</p> <p>Das Modell nimmt Impulse aus den verwendeten Bottom-up-Modellen und Strommarktmodellen zusammen mit weiteren Szenarioannahmen auf und ermittelt die direkten und indirekten volkswirtschaftlichen Wirkungen. Folgende Impulse aus den vorgeschalteten Modellen werden in PANTA RHEI eingestellt:</p> <p>Veränderungen im Strommarkt in Form von Strompreisen für einzelne Verbrauchergruppen, Investitionen und Nettostromimporten,</p> <p>Mehrinvestitionen zur Reduktion des Endenergieverbrauchs,</p>

	<p>Rückgang der Energieeinsatzmengen in den Kategorien der Energiebilanz und der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen.</p>
<p>Klimapfade für Deutschland (2018), S. 33 f., S. 96 ff.</p>	<p>Analyse gesamtwirtschaftlicher Effekte</p> <p>Die Ergebnisse der mit den energiewirtschaftlichen Bottom-up-Modellen erstellten Simulationen der einzelnen sektoralen Verbräuche und des Strommarkts werden über ein Input-Output-Modell mit dem Weltmodell VIEW gekoppelt. Mit Hilfe dieses Modells erfolgen die quantitative Berechnung der Szenarien und die Ermittlung der volkswirtschaftlichen Effekte.</p> <p>Input-Output-Modell</p> <p>Es handelt sich um ein dynamisches Input-Output-Modell für Deutschland, das die Entstehungsseite des BIP nach 72 Wirtschafts-/Güterbereichen differenziert. Die Kapital- und Arbeitsnachfrage der Unternehmen, die Lohn- und Preisdynamik, der technologische Fortschritt, die Produktionskapazitäten und viele weitere Variablen werden für jede Branche separat modelliert.</p> <p>Mit dem Modell werden die nationalen volkswirtschaftlichen Effekte (Konsum, Wertschöpfung, BIP, Beschäftigung, ...) der Klimapfade im Vergleich zum Referenzszenario ermittelt.</p>
	<p>VIEW</p> <p>Das globale Prognose- und Simulationsmodell deckt 42 Länder der Welt ab und ermöglicht eine detaillierte und konsistente Darstellung der zukünftigen Entwicklung der Weltwirtschaft.</p> <p>Mit dem Modell werden die außenwirtschaftlichen Rahmenbedingungen wie etwa die Importnachfrage der übrigen Welt bereitgestellt. Die Importnachfrage der übrigen Welt und die Kosten-Preis-Relation gegenüber den ausländischen Konkurrenten bestimmen die Exporte der deutschen Branchen.</p>
<p>Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten (2017)</p>	<p>Analyse gesamtwirtschaftlicher Effekte</p> <p>Es erfolgt keine Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte des Szenarios THG-Z (GreenEe).</p>
<p>Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland (2017-2018), Modul 3, S. 330 ff.</p>	<p>Analyse gesamtwirtschaftlicher Effekte</p> <p>Es erfolgt keine Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte zwischen den beiden Szenarien LFS-T und LFS-Z80. Es werden lediglich die Differenzkosten zwischen den beiden Szenarien ausgewiesen.</p>
<p>EU Reference Scenario (2016), S. 98 ff.</p>	<p>Analyse gesamtwirtschaftlicher Effekte</p> <p>Für die energiewirtschaftlichen Projektionen werden makroökonomische und multisektorale Projektionen als Input genutzt, die mit dem Modell GEM-E3 erstellt werden, sowie Projektionen der Weltenergiepreise, basierend auf Analysen mit dem Modell PROMETHEUS.</p>
	<p>GEM-E3</p> <p>Es handelt sich um ein makroökonomisches, länder- und sektorübergreifendes, berechenbares allgemeines Gleichgewichtsmodell für die integrierte Analyse von</p>

Wirtschaft und Umwelt, entweder für Europa oder für die Welt. Durch die Darstellung der Weltwirtschaft als geschlossenes System stellt das Modell auf Weltniveau sicher, dass Angebot und Nachfrage identisch sind.

Mit GEM-E3 werden die makroökonomischen und multisektoralen Projektionen ermittelt, die als Input für die Szenarioanalyse dienen.

PROMETHEUS

Hier handelt es sich um ein globales, multiregionales Energiemodell, das Projektionen für den Energiebedarf, die Energieversorgung, die energiebedingten Emissionen und die Weltenergiepreise liefert. Das Modell leitet endogen konsistente Preisverläufe für Öl, Erdgas und Kohle ab, basierend auf der Entwicklung der globalen Energienachfrage, von Ressourcen und Reserven, Förderkosten und dem bilateralen Handel zwischen Regionen.

Diese Projektionen der Weltenergiepreise dienen als Input in die Szenarioanalyse.

6.3 Produktionsmengen

Produktionsmenge in [kt]	ERP-Z80				KP-T				KP-Z95				THG-Z
Jahr	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2050
Eisen und Stahl													
Oxygenstahl-Hochofen	26,2	23,5	21,4	20,0		29,2	29,8	30,4		29,2	29,8	30,4	18,0
Elektrostahl-Lichtbogenofen	13,7	13,3	13,0	12,8		14,7	15,5	16,2		14,7	15,5	16,2	27,0
Papiergewerbe													
Papier						23,0	23,2	23,5		23,0	23,2	23,5	
Nicht-metallische Mineralstoffe													
Klinker Brennen (trocken)						22,3	21,6	20,9		23,5	23,6	23,7	
Zementmahlen						31,1	31,0	30,9		31,1	31,0	30,9	
Chemie													
Ammoniak						3,0	3,0	3,0		3,0	3,0	3,0	
Chlor, Membran						4,9	4,9	4,8		4,9	4,9	4,8	
Ethylen						5,4	5,5	5,7		5,4	5,5	5,7	
Methanol						1,9	1,8	1,8		1,9	1,8	1,8	

Produktionsmenge i n[kt]	KSZ-T & KSZ-Z80					KSZ-Z95				LFS-T				LFS-Z80			
Jahr	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Eisen und Stahl																	
Sintern	28,6	26,5	24,3	22,5	20,6	25,9	22,8	20,2	17,8	26,5	24,3	22,9	21,7	25,4	21,4	18,5	16,0
Oxygenstahl-Hochofen	30,6	30,6	26,0	24,1	22,1	27,4	24,1	21,4	18,9	28,4	26,0	24,6	23,3	26,3	22,2	19,2	16,6
Elektrostahl-Lichtbogenofen	13,2	13,2	16,9	16,9	18,0	16,8	17,6	18,0	19,2	16,3	16,8	16,4	16,8	17,8	19,5	20,2	21,5
Walzstahl	36,8	36,8	34,4	34,4	33,7	37,1	35,1	33,1	32,0	37,6	36,0	34,4	33,7	37,1	35,1	33,1	32,0
Koksofen	8,2	8,2	6,4	6,4	5,9	7,3	6,4	5,7	5,0	7,6	6,9	6,6	6,2	7,0	5,9	5,1	4,4
Direkte Reduktion	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Nicht-Eisen Metalle																	
Aluminium primär	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
Aluminium sekundär	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,7	0,7	0,8	0,9	0,7	0,7	0,8	0,9	0,7	0,7	0,8	0,9
Aluminium Strangpressen	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,6	0,6	0,7	0,8	0,6	0,6	0,7	0,8	0,6	0,6	0,7	0,8
Aluminium Gießereien	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2	0,8	0,9	1,0	1,1	0,8	0,9	1,0	1,2	0,8	0,9	1,0	1,1
Aluminium Walzen	1,9	2,0	2,2	2,5	2,8	2,0	2,1	2,4	2,7	2,0	2,2	2,5	2,8	2,0	2,1	2,4	2,7
Kupfer Primär	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Kupfer Sekundär	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Kupferbearbeitung	1,7	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9
Primärzink	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Sekundärzink	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Papiergewerbe																	
Papier	22,5	24,0	24,3	24,4	25,0	23,7	23,7	23,4	23,7	24,0	24,3	24,4	25,0	23,7	23,7	23,4	23,7
Zellstoff-Verfahren	1,4	1,3	1,1	0,9	0,8	1,2	0,9	0,7	0,5	1,3	1,1	0,9	0,8	1,2	0,9	0,7	0,5
Holzstoff-Verfahren	1,5	1,4	1,2	1,0	0,8	1,4	1,0	0,8	0,5	1,4	1,2	1,0	0,8	1,4	1,0	0,8	0,5
Altpapierstoff	15,4	16,5	17,0	17,4	18,3	16,6	17,3	17,6	18,3	16,5	17,0	17,4	18,3	16,6	17,3	17,6	18,3

Produktionsmenge in [kt]	KSZ-T & KSZ-Z80					KSZ-Z95				LFS-T				LFS-Z80			
Jahr	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Glas																	
Behälterglas	4,4	4,4	4,5	4,7	4,8	4,3	4,4	4,5	4,6	4,4	4,4	4,5	4,8	4,3	4,4	4,5	4,6
Flachglas	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	1,8	1,9	1,9	2,0	1,8	1,8	1,9	2,0	1,8	1,9	1,9	2,0
Glasfasern	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1
Übriges Glas	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Nicht-metallische Mineralstoffe																	
Klinker Brennen (trocken)	22,8	22,7	20,8	19,0	17,7	21,6	18,8	16,2	14,3	22,4	21,2	20,3	19,3	21,0	18,6	16,6	14,7
Klinker Brennen (halbtrocken)	1,7									1,7				1,7			
Aufbereitung von Kalkstein	24,3	22,5	20,6	18,9	17,5	22,5	20,6	18,8	17,3	22,2	21,0	20,1	19,2	22,2	21,0	20,1	19,2
Gips	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Zementmahlen	32,7	31,1	30,2	29,5	28,9	30,7	29,4	28,4	27,5	31,1	30,2	29,5	28,9	30,7	29,4	28,4	27,5
Kalkmahlen	5,3	5,0	4,9	4,9	4,9	4,9	4,8	4,8	4,7	4,9	4,5	4,2	4,0	4,5	3,8	3,3	2,8
Ziegel	10,6	10,9	10,6	10,3	9,9	10,9	10,6	10,3	9,9	10,9	10,6	10,3	9,9	10,9	10,6	10,3	9,9
Kalkbrennen	6,3	6,6	6,5	6,5	6,5	6,6	6,5	6,5	6,5	5,9	5,4	5,1	4,8	4,6	4,6	4,0	3,4
Keramik																	
Haushalts- und Sanitärkeramik	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Technische Keramik	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Fliesen, Platten, Feuerfestkeramik	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,2	2,2	2,3	2,3	2,2	2,2	2,3	2,3	2,2	2,2	2,3	2,3
Kunststoffverarbeitung																	
Extrusion	4,2	4,9	5,3	5,9	6,5	4,8	5,2	5,7	6,2	4,9	5,3	5,9	6,5	4,9	5,3	5,9	6,5
Spritzgießen	2,2	2,5	2,7	3,0	3,3	2,4	2,6	2,8	3,1	2,5	2,7	3,0	3,3	2,5	2,7	3,0	3,3
Blaßformen	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,1	1,2	1,4	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2	1,3	1,4

Produktionsmenge in [kt]		KSZ-T & KSZ-Z80					KSZ-Z95				LFS-T				LFS-Z80			
Jahr	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	
Chemie																		
Adipinsäure	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5	0,6	
Ammoniak	3,1	3,3	3,2	3,2	3,1	3,2	3,1	3,0	3,0	3,3	3,2	3,2	3,1	3,3	3,2	3,2	3,1	
Calciumcarbid	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
Industrieruß	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
Chlor, Diaphragma	1,1	1,1				1,1				1,1				1,1				
Chlor, Membran	2,6	3,6	4,8	4,9	4,8	3,5	4,7	4,7	4,6	3,6	4,8	4,9	4,8	3,6	4,8	4,9	4,8	
Chlor, Amalgan	0,8																	
Ethylen	4,8	5,0	5,4	5,8	6,3	4,9	5,2	5,6	6,0	4,8	4,7	4,7	4,6	4,8	4,7	4,7	4,6	
Methanol	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8	1,7	1,9	1,9	1,8	1,8	1,9	1,9	1,8	1,8	
Salpetersäure	2,5	2,8	3,2	3,5	3,8	2,8	3,2	3,5	3,8	2,8	3,2	3,5	3,8	2,8	3,2	3,5	3,8	
Sauerstoff	7,3	7,6	8,2	8,9	9,6	7,6	8,2	8,9	9,6	7,6	8,2	8,9	9,6	7,6	8,2	8,9	9,6	
Polycarbonat	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,5	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,6	0,7	0,5	0,6	0,6	0,7	
Polyethylen	2,7	3,1	3,3	3,6	4,0	3,0	3,2	3,5	3,8	3,1	3,3	3,6	4,0	3,1	3,3	3,6	4,0	
Polypropylen	1,8	2,1	2,2	2,5	2,7	2,1	2,2	2,4	2,6	2,1	2,2	2,5	2,7	2,1	2,2	2,5	2,7	
Polysulfine	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	
Soda	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	
Toluol-2,4-diisocyanat(TDI)	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,6	0,6	
Titandioxid	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	
Nahrungsmittel																		
Zucker	3,8	3,9	3,8	3,8	3,8	3,9	3,8	3,8	3,8	3,9	3,8	3,8	3,8	3,9	3,8	3,8	3,8	
Molkerei	13,9	13,9	13,7	13,7	13,7	13,9	13,7	13,7	13,7	13,9	13,7	13,7	13,7	13,9	13,7	13,7	13,7	
Bierbrauen	9,9	9,7	9,3	9,1	8,9	9,7	9,3	9,1	8,9	9,7	9,3	9,1	8,9	9,7	9,3	9,1	8,9	
Fleischverarbeitung	4,6	4,8	4,8	5,0	5,1	4,7	4,7	4,8	4,8	4,8	4,8	5,0	5,1	4,8	4,8	5,0	5,1	

Backwaren	4,3	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Stärke	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9

Papier

Angaben zur Entwicklung der Papierproduktion sind in fünf der sieben vorausgewählten Studien enthalten (KP, LFS, THGND, KSZ und ERP). In THGND und ERP werden lediglich qualitative Aussagen getroffen. Ein Beispiel dafür ist folgender Auszug aus ERP: „Insgesamt steigern die energieintensiven Branchen ihre Wirtschaftsleistung zwischen 2011 und 2030 (2050) um 0,5 % (0,6 %) p.a. und damit deutlich langsamer als die anderen Wirtschaftszweige, die um 1,4 % (1,2 %) zulegen. Besonders energieintensive Wirtschaftszweige wie die Metallerzeugung, die Papierindustrie [...] entwickeln sich deutlich ungünstiger als weniger energieintensive Branchen.“ Quantitative Daten zur Entwicklung der Papierproduktion sind hingegen in LFS, KSZ und KP verfügbar:

Zementproduktion

Angaben zur Entwicklung der Zementproduktion sind in fünf der sieben vorausgewählten Studien enthalten (KP, LFS, THGND, KSZ, ERP). In KP, THGND, und ERP werden lediglich qualitative Aussagen getroffen. Quantitative Daten zur Entwicklung der Zementproduktion sind hingegen in LFS und KSZ verfügbar. In KSZ und LFS sinkt die Zementproduktion über alle Szenarien. Dies ist in beiden Studien auf eine leichte Erhöhung der Materialeffizienz zurückzuführen, aus der eine Reduktion energieintensiver Grundstoffe folgt. In KSZ und LFS zeigt sich, dass in Szenarien mit niedrigerem Klimaschutzambitionsniveau von einer geringeren Abnahme der Produktionsmenge als in Szenarien mit höherem Klimaschutzambitionsniveau bis 2050 ausgegangen wird. Sowohl in LFS als auch in KSZ ist die verstärkte Abnahme der Produktionsmenge in den Szenarien mit höherem Klimaschutzambitionsniveau auf nochmals erhöhte Materialeffizienz zurückzuführen. In LFS und in KSZ werden für die weniger bzw. die höher ambitionierten Szenarien gleiche Produktionsmengen ausgewiesen.

Es zeigt sich, dass in den energie- und klimapolitischen Szenarien der Studien im Vergleich zu den branchenspezifischen Studien eine verstärkte Abnahme der Zementproduktion bis 2050 angenommen wird. Dies könnte zu einer zu optimistischen Annahme bezüglich der THG-Reduktion in der Zementindustrie führen. In der Keramikindustrie ist ein analoger Abgleich für das Jahr 2050 aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit branchenspezifischer Produktionsdaten nicht möglich.

Klinkerproduktion und Klinkerzementfaktor

Neben der Zementproduktion steht im Kontext der Zementherstellung das Zwischenprodukt Klinker im Fokus. Klinker ist ein durch Brennen und Mahlen hergestellter hydraulischer Stoff aus Kalkstein und Ton [44]. Die Produktionsmenge von Klinker ist ebenfalls in LFS und KSZ quantifiziert. Hierbei wird in beiden Studien von einer Abnahme der Klinkerproduktion ausgegangen. In diesem Zusammenhang ist das Verhältnis zwischen eingesetztem Klinker und produzierten Zement (Klinker-Zementfaktor) maßgeblich, um den spezifischen Energieverbrauch der Zementherstellung zu reduzieren. Nimmt der Klinker-Zementfaktor ab, ist auch von einer Abnahme des spezifischen Energieverbrauchs auszugehen. Der Klinker Zementfaktor variiert in den untersuchten Studien. In KSZ und in LFS sinkt der Klinker-Zementfaktor. Als Begründung wird in LFS angeführt, dass neue Zementsorten mit geringerem Klinker-Zementfaktor eingesetzt werden. Auch in der branchenspezifischen Studie [45] ist eine Abnahme des Klinker-Zementfaktors hinterlegt.

In THGND und in KP wird hingegen von einem steigenden Klinker-Zementfaktor ausgegangen. Dieser Entwicklung liegt eine geringere Verfügbarkeit von Substituten für Klinker zugrunde. Bei diesen Ersatzstoffen handelt es sich überwiegend um Abfallprodukte aus der Stahl- und der konventionellen Energiewirtschaft (z.B. Flugasche). Diese stehen, aufgrund des zunehmenden Wechsels der Verfahrensrouten auf Elektrostahl in der Stahlindustrie und des verstärkten Einsatzes von Erneuerbaren Energien in der Energiewirtschaft, zukünftig in geringerem Maße zur Verfügung [11], [9].

Keramikproduktion

Die Produktionsmenge von Keramik wird ebenfalls lediglich in KSZ und in LFS ausgewiesen. In beiden Studien werden über alle Stützjahre und Szenarien hinweg die gleichen Produktionsmengen angegeben. Ein Abgleich der Produktionsmengenentwicklung von Keramik mit branchenspezifischen Daten ist aufgrund deren mangelnder Verfügbarkeit nicht möglich.

NE-Metalle

Bei NE-Metallen stehen vor allem Aluminium und Kupfer im Vordergrund. Die Produktionsmenge wird ebenfalls lediglich in KSZ und in LFS ausgewiesen.

Glas

Angaben zur Entwicklung der Glasproduktion sind in drei der sieben vorausgewählten Studien enthalten (LFS, KSZ und ERP). In ERP wird lediglich eine qualitative Aussage über die Entwicklung der Produktionsmenge über den betrachteten Zeitraum (2015 bis 2050) getroffen. Diese qualitative Aussage beschreibt eine Stagnierung der Glasproduktion bis zum Jahr 2050. Quantitative Daten zur Entwicklung der Glasproduktion sind hingegen in LFS und KSZ verfügbar

In KSZ und LFS steigt die Glasproduktion über alle Szenarien. Dabei nimmt die produzierte Glasmenge in allen Sektoren (Behälterglas, Flachglas, Glasfasern und übrigen Glas) zu. Somit wird die gesamte Glasproduktion über den betrachteten Zeitraum um 10,0% (KSZ-Z95 und LFS-Z80) bzw. 14,9% (KSZ-Z80 und LFS-T) steigen. In KSZ und LFS zeigt sich, dass in Szenarien mit niedrigerem Klimaschutzambitionsniveau (KSZ-Z80 und LFS-T) von einer geringeren Abnahme der Produktionsmenge als in Szenarien mit höherem Klimaschutzambitionsniveau (KSZ-Z95 und LFS-Z80) bis 2050 ausgegangen wird. Sowohl in LFS als auch in KSZ ist die verstärkte Abnahme der Produktionsmenge in den Szenarien mit höherem Klimaschutzambitionsniveau auf nochmals erhöhte Materialeffizienz zurückzuführen. In LFS und in KSZ werden für die weniger bzw. die höher ambitionierten Szenarien gleiche Produktionsmengen ausgewiesen.

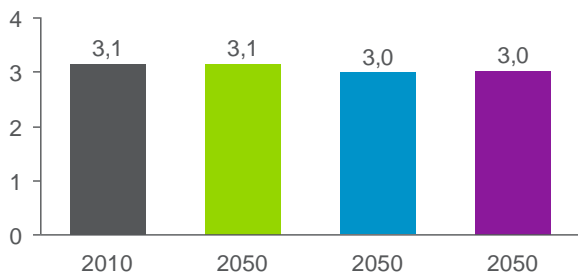
Automobil

In den analysierten Studien sind keine Angaben zur Produktionsentwicklung in der Automobilindustrie enthalten.

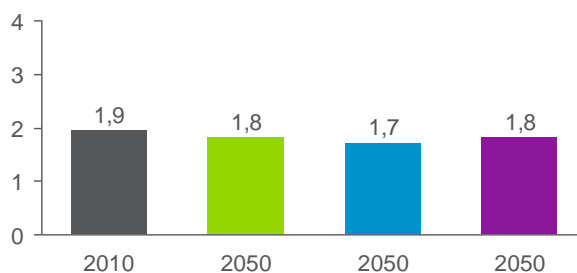
Grundstoffchemie

Angaben zur Entwicklung der Produktionsmengen in der Chemieindustrie sind in drei der sieben vorausgewählten Studien enthalten (KSZ, LFS und KP). Deziert sind Zahlen für die die Ammoniak-, Chlor-, Methanol, und Ethylenproduktion ausgewiesen. Die Produktionsmenge von Ammoniak, Chlor und Methanol ist in allen Szenarien bis 2050 annähernd konstant (vgl. **Abbildung 6-1**). Lediglich die Produktion von Ethylen steigt in KSZ und KP um etwa 30% an. Die gleichbleibende Produktionsmenge ist in allen Studien auf eine leichte Erhöhung der Materialeffizienz zurückzuführen, aus der eine Reduktion energieintensiver Grundstoffe folgt.

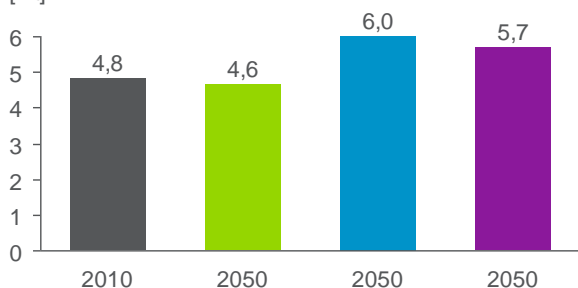
Ammoniakproduktion
[Mt]



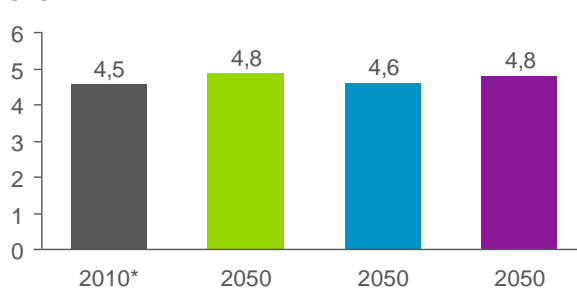
Methanolproduktion
[Mt]



Ethylenproduktion
[Mt]



Chlorproduktion
[Mt]



■ Ausgangswert ■ LFS-Z ■ KSZ-Z95 ■ KP-Z

*Produktion im Diaphragma, Mebram und Amalgan Verfahren. Für die Szenarien wird eine Produktion rein im Membran Verfahren angenommen.

Abbildung 6-1: Entwicklung der Produktion von Ammoniak und Chlor 2010 - 2050 in LFS und KSZ

Die beiden untersuchten branchenspezifischen Studien fokussieren ebenfalls auf energieintensive Prozesse bzw. Grundstoffchemikalien wie Ammoniak, Methanol, Ethylen, BTX (Benzene, Toluene, Xylene) und Chlor. Produktionszahlen sind lediglich in [43] für den europäischen Kontext ausgewiesen. Beide Studien gehen von einem konstanten jährlichen Wachstum bis 2050 aus. [43] geht von einem jährlichen Wachstum von 1,0% der Produktionsmengen aus. In [42] wird eine jährliche Steigerung der Bruttowertschöpfung der Niederländischen Chemieindustrie angenommen.

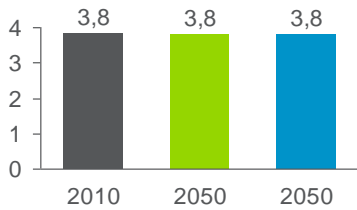
[43] beschreibt drei Reduktionsszenarien mit unterschiedlichem Ambitionsniveau; maximal (MAX), ambitioniert (AMB) und mittleres (MID) Ambitionsniveau. Im MAX Szenario wird von einer vollständigen Durchdringung alternativer CO₂-armer Technologien bis 2050 ausgegangen. Dies entspricht einer jährlichen Austauschrate von 2,85%. Im AMB-Szenario werden bis 2050 50% der herkömmlichen Technologien durch CO₂-armer Technologien ersetzt (jährlich 1,5%) und im MID-Szenario werden bis 2035 noch 35% der herkömmlichen Technologien ersetzt (jährlich 1%).

Je Szenario werden in [43], die über CO₂-arme Technologien hergestellten Grundstoffe im Zeitraum von 2005-2050 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass der übrige Bedarf weiterhin über konventionelle Prozesse dargestellt wird.

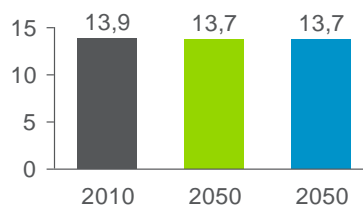
Nahrungsmittelindustrie

In den Langfrist- sowie Klimaschutzszenarien (LFS-Z und KSZ-95) werden Produktionswerte nach Sub-Branche der Nahrungsmittelindustrie aufgeführt. Für beide gilt, dass in keiner der betrachteten Sub-Branchen eine nennenswerte Produktionsänderung zwischen 2010 und 2050 erwartet wird.

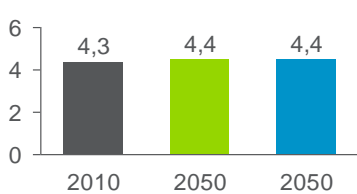
Zuckerproduktion
[Mt]



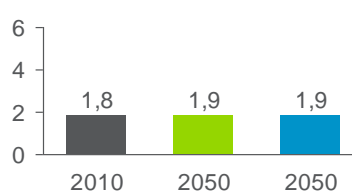
Molkereiproduktion
[Mt]



Backwarenproduktion
[Mt]



Stärkeproduktion
[Mt]



■ Ausgangswert ■ LFS-Z ■ KSZ-Z95

Abbildung 6-2: Entwicklung der Produktionsmengen in der Nahrungsmittelindustrie Studienvergleich

Metallerzeugung- und Bearbeitung

In Deutschland wurden im Jahr 2010 etwa 44 Mt Rohstahl erzeugt. Dies entspricht auch ungefähr der Produktionsmenge im Jahr 2016 (42Mt). In allen Studien werden konkrete Produktionsmengen genannt, diese sind jedoch stark unterschiedlich. Die ERP nimmt einen drastischen Produktionsrückgang von etwa 25% an. Die aktuellste Studie des BDI erwartet eine geringfügige Steigerung der Rohstahl-Produktionsmengen von etwa 6%. Insgesamt nehmen drei Studien (KSZ-95, ERP sowie LFS-Z80) eine teils deutliche Verringerung der Rohstahlproduktion in Deutschland bis zum Jahr 2050 an. Zwei Studien (THG-Z95 und KP-Z) gehen von leichten Steigerungen aus (vgl. **Abbildung 6-3**). Grund für die Verringerungen der Produktion ist neben zunehmender Wettbewerbsintensität eine Verminderung der Stahlintensität in den Anwendungsbereichen. Die Anteile der einzelnen Produktionsrouten an der Gesamtproduktion variieren ebenfalls und reichen von 43% für die Primärstahlproduktion in traditionellen Hochöfen bis hin zu 63% Oxygenstahl im Jahr 2050. Dies liegt hauptsächlich an unterschiedlichen Annahmen zur Verbreitung des Direktreduktionsverfahrens, über das auch Eisenerz in großem Stil in Lichtbogenöfen verarbeitet werden kann. Die branchenspezifische Studie der Boston Consulting Group und dem VDEh im Auftrag von Eurofer (2013) erwartet dagegen eine Produktionssteigerung um über 30% auf europäischer Ebene. Mit einem aktuellen Anteil von 25% an der europäischen Stahlproduktion ist zu erwarten, dass ein signifikanter Anteil dieser Steigerung auch in Deutschland stattfindet. In einem Szenario, dass maximal mögliche THG Senkungen ohne CCS oder CCU darstellen soll, werden jedoch 89% des europäischen Rohstahls in Lichtbogenöfen produziert. Die Hälfte des Elektrostahls basiert dabei auf direktreduziertem Eisenerz.

Stahlproduktion und Anteil der Produktionsrouten

[Mt]

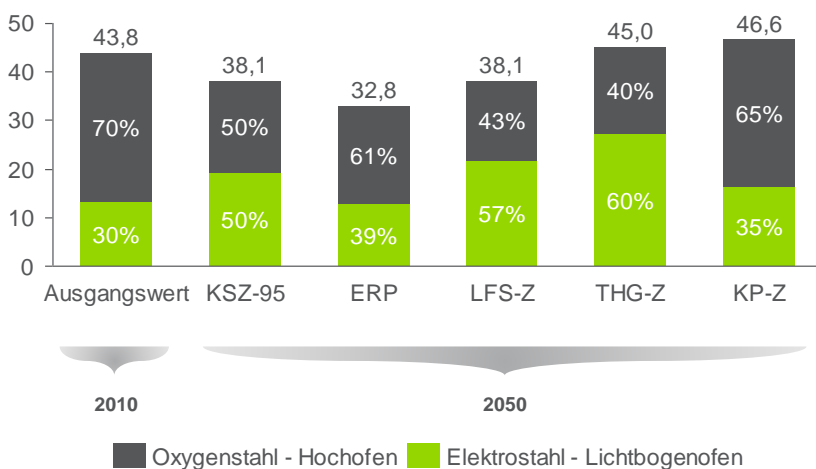


Abbildung 6-3: Entwicklung der Produktionsmengen und Anteil der Produktionsrouten Studienvergleich