Dynamis

Datenanhang

Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FfE FfE Technische Universität München

2019

Dynamis - Datenanhang

Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems

Herausgeber:
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.

Am Blütenanger 71, 80995 München
+49 (0) 89 158121-0
info@ffe.de www.ffe.de

Kurzbericht zum Projekt Dynamis:

Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems

Veröffentlicht am:

November 2019

Projektleitung:

Steffen Fattler, Jochen Conrad, Anika Regett

Bearbeiter/innen FfE:

Felix Böing, Andrej Guminski, Simon Greif, Tobias Hübner, Fabian Jetter, Timo Kern, Britta Kleinertz, Alexander Murmann, Adrian Ostermann, Dr. Christoph Pellinger, Simon Pichlmaier, Tobias Schmid

Redaktion FfE: Annette Doll

Wissenschaftlicher Leiter:
Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer:
Prof. Dr.-Ing. W. Mauch (e.V.)

Dr.-Ing. Serafin von Roon (GmbH)

Projekt-Manager:
Dr.-Ing. Dipl.-Phys. R. Corradini

FfE-Auftragsnummer:

BMWI-37

Projektpartner:

Bayernwerk AG, BMW Group, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Evonik Technology & Infrastructure GmbH, EWE AG, innogy SE, Lechwerke AG, Main-Donau Netzgesellschaft mbH, Mercedes-Benz Fuel Cell GmbH, rhenag Rheinische Energie AG, Stadtwerke Rosenheim GmbH & Co. KG, Stadtwerke München Services GmbH, Uniper Kraftwerke GmbH, Vorarlberger Kraftwerke AG

Forschungsverbund mit:

Technische Universität München

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

Bearbeiter/innen:
Thomas Zipperle und Clara Orthofer

FKZ: 03ET4037C

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen:

03ET4037A (FfE e. V.)

03ET4037B (FfE GmbH)

RC20190723

Inhalt

1 Bereitstellungsektor 7

1.1 Potenzialanalyse Ergebnisse 7

1.2 Potenzialanalyse Details 8

1.3 Technoökonomische Parameter 14

1.3.1 Strom 14

1.3.2 Wärme 17

1.3.3 Speicher 19

1.3.4 CCU/CCS 19

1.3.5 Green Fuels 20

2 Verkehr 23

2.1 Potenzialanalyse Ergebnisse 23

2.2 Potenzialanalyse Details 24

2.3 Technoökonomische Parameter 29

2.3.1 Straßenverkehr 29

2.3.2 Schienenverkehr 36

2.3.3 Flugverkehr 38

2.3.4 Binnenschifffahrt 40

3 Private Haushalte 41

3.1 Potenzialanalyse Ergebnisse 41

3.2 Potenzialanalyse Details 42

3.3 Technoökonomische Parameter 47

3.4 Gebäudemodell 55

4 Industrie 57

4.1 Potenzialanalyse Ergebnisse - Prozesse 57

4.2 Potenzialanalyse Details 59

4.2.1 Querschnittstechnologien 59

4.2.2 Prozesse 66

4.3 Technoökonomische Parameter 92

4.3.1 Querschnittstechnologien 92

4.3.2 Prozesse - Effizienzmaßnahmen 96

4.3.3 Prozesse – Verfahrensroutenwechsel, Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel und CO_2-Abscheidung 130

5 Literatur 131

1 Bereitstellungsektor

1.1 Potenzialanalyse Ergebnisse

Tabelle 1-1: Ergebnisse der Potenzialanalyse der CO_2-Verminderungsmaßnahmen im Bereitstellungssektor

	Kurzbezeichnung der Maßnahme**	adressierte Anwendung(en)*	energiebedingte CO_2-Emissionen im betrachteten Bereich in 2014	max. techn. CO_2-Verminderungspotenzial der Maßnahme ggü. 2014	verbleibende CO_2-Emissionen bei Umsetzung des techn. Maßnahmenpotenzials 2014	maximale Reduktion in Bezug auf die Gesamtemissionen im Bereitstellungssektor 2014	maximales Bereitstellungspotenzial 2014	Technologiereife (1-9)	Auswirkung auf den Strombedarf	Zukunftsfähigkeit 2050
			Mio. t CO_2	Mio. t CO_2	Mio. t CO_2	%	%	TRL	+/o/-	+/o/-
K1	**Dekarbonisierung durch CO_2-Abscheidung**									
1	Carbon Capture and Storage (CCS)	alle	362	362	0	100 %	-	7	+	ja
2	Carbon Capture and Utilisation (CCU)	alle	362	362	0	100 %	-	4	+	ja
K2	**Dekarbonisierung der Strom-/ Brennstoffbereitstellung**									
3	Laufwasserkraftwerk	S	302	45	257	15 %	15 %	9	o	ja
4	Photovoltaik (Dachfläche)	S	302	88	214	29 %	29 %	9	o	ja
5	Photovoltaik (Freifläche)	S	302	302	0	100 %	157 %	9	o	ja
6	Wind (onshore)	S	302	94	208	31 %	31 %	9	o	ja
7	Wind (offshore)	S	302	111	191	37 %	37 %	9	o	ja
8	Biomass to Liquid/Methan	BS	169	35	134	21 %	21 %	6-8	o	ja
9	Zufeuerung von Biomasse in konv. Kraftwerke	BS, S	265	53	212	20 %	130 %	9	o	nein
K3	**Dekarbonisierung durch Bereitstellung strombasierter Brennstoffe**									
10	PtL + erneuerbarer Strom	BS	393	393	0	100 %	-	6-8	+	ja
11	PtG Methan + erneuerbarer Strom	BS	149	149	0	100 %	-	7	+	ja
12	PtG Wasserstoff + erneuerbarer Strom	BS	149	5	145	3 %	-	7	+	ja
K4	**Dekarbonisierung der komb. Strom- und Fernwärmebereitstellung:**									
13	BHKW Gasmotor + erneuerbarer Brennstoff	S, FW	362	362	0	100 %	-	9	o	ja
14	GuD + erneuerbarer Brennstoff	S, FW	362	362	0	100 %	-	9	o	ja
15	BHKW Gasmotor + konv. Erdgas	S, FW	362	99	263	27 %	-	9	o	nein
16	GuD + konv. Erdgas	S, FW	362	69	294	19 %	-	9	o	nein
K5	**Dekarbonisierung der Fernwärmebereitstellung:**									
17	Gasabsorptions-WP + erneuerbarer Brennstoff	FW	30	30	0	8 %	-	9	o	ja
18	Gasadsorptions-WP + erneuerbarer Brennstoff	FW	30	30	0	8 %	-	9	o	ja
19	Gasmotor-WP + erneuerbarer Brennstoff	FW	30	30	0	8 %	-	9	o	ja
20	Gasheizwerk + erneuerbarer Brennstoff	FW	30	30	0	8 %	-	9	o	ja
21	Elektrodenheizkessel + erneuerbarer Strom	FW	30	30	0	8 %	-	9	+	ja
22	Luft-WP + erneuerbarer Strom	FW	30	30	0	8 %	-	9	+	ja
23	Erd-WP + erneuerbarer Strom	FW	30	30	0	8 %	-	9	+	ja
24	Grundwasser-WP + erneuerbarer Strom	FW	30	30	0	8 %	-	9	+	ja
25	Gasheizwerk + erneuerbarer Brennstoff	FW	30	30	0	8 %	-	9	+	ja
26	Gasabsorptions-WP + konv. Erdgas	FW	30	16	14	4 %	-	9	o	nein
27	Gasadsorptions-WP + konv. Erdgas	FW	30	16	14	4 %	-	9	o	nein
28	Gasmotor-WP + konv. Erdgas	FW	30	18	12	5 %	-	9	o	nein
29	Gasheizwerk + konv. Erdgas	FW	30	9	21	2 %	-	9	o	nein
30	Biomasseheizwerke	FW	30	30	0	8 %	-	9	o	ja
31	Geothermie	FW	30	30	0	8 %	-	9	o	ja
32	Solarthermie	FW	30	30	0	8 %	-	9	o	ja
K6	**Dekarbonisierung der Fernkältebereitstellung**									
33	Absorptionskältemaschine + erneuerbarer Strom	FK	1.3	1.3	0	0.4 %	-	9	+	ja
34	Adsorptionskältemaschine + erneuerbarer Strom	FK	1.3	1.3	0	0.4 %	-	9	+	ja
35	Elektrische Kompressionskältemaschine + erneuerbarer Strom	FK	1.3	1.3	0	0.4 %	-	9	+	ja

*S=Strombereitstellung, FW=Fernwärmebereitstellung, FK=Fernkältebereitstellung, BS=Brennstoffbereitstellung

**PtL=Power-to-Liquid, PtG=Power-to-Gas, BHKW=Blockheizkraftwerk, GuD=Gas- und Dampfturbinenkraftwer, WP=Wärmepumpe

1.2 Potenzialanalyse Details

Tabelle 1-2: Herleitung des maximalen technischen Potenzials und der Zukunftsfähigkeit der CO_2-Verminderungsmaßnahmen im Bereitstellungssektor

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Carbon Capture and Storage (CCS)	CCS beschreibt die technische Abspaltung und anschließende Einlagerung in (unterirdischen) Lagerstätten von CO_2 aus Rauchgas von konventionellen Kraft- und Heizwerken oder Industrieanlagen.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 362 Mio. t CO_2/a Annahmen: Deutsches Speicherpotenzial von 8,75 – 15,75 Mrd. t CO_2 (2,75 Mrd. t. CO_2 (Erdgaslagerstätten) und 6 - 13 Mrd. t. CO_2 (salinare Aquifere)) /BGR-02 10/ Angenommene 33 Jahre von 2017 bis 2050 ergeben ein technisches Potenzial von 265 – 477 Mio. t CO_2/a Maximale bilanzielle Deckung 2014: 132 % Annahmen: Entsprechend des oben genannten maximalen Einspeicherpotenzials von 477 Mio. t CO_2/a ergibt sich ein zusätzliches jährliches Verminderungspotenzial von 115 Mio. t CO_2 und damit eine bilanzielle Deckung von 132 %
Carbon Capture and Utilisation (CCU)	CCU beschreibt die technische Abspaltung und anschließende Nutzung von CO_2 aus Rauchgas von konventionellen Kraft- und Heizwerken oder Industrieanlagen.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 362 Mio. t CO_2/a Annahmen: Durch die anschließende Nutzung des abgeschiedenen CO_2 entfallen hier die beim CCS angesprochenen Probleme bezüglich der Speicherung. Maximale bilanzielle Deckung 2014: unbegrenzt
Laufwasser-kraftwerk	Reduktion der Emissionen aus konventioneller Stromerzeugung durch Bereitstellung regenerativer elektrischer Energie aus Laufwasserkraftwerken.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 45 Mio. t CO_2/a Annahmen: Potenzial für Deutschland nach /MKA-01 14/: 92,6 TWh/a Teilweise Substitution des deutschen Strommix 2014 Emissionsfaktor Strommix 2014: 537 g/kWh Maximale bilanzielle Deckung 2014: 15 % Annahmen: bezogen auf die Stromerzeugung 2014
Photovoltaik (Dachfläche)	Reduktion der Emissionen aus konventioneller Stromerzeugung durch Bereitstellung regenerativer elektrischer Energie aus PV-Dachflächenanlagen.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 88 Mio. t CO_2/a Dachflächenpotenzial: 194 GW Durchschnittliche Volllaststunden PV in Deutschland: 945 h/a Resultierende Stromerzeugung: 183 TWh (FfE-interne Berechnungen mit Regionaldaten der Datenbank FREM) Teilweise Substitution des deutschen Strommix 2014 Emissionsfaktor Strommix 2014: 537 g/kWh Maximale bilanzielle Deckung 2014: 29 % Annahmen: bezogen auf die Stromerzeugung 2014

Photovoltaik (Freifläche)	Reduktion der Emissionen aus konventioneller Stromerzeugung durch Bereitstellung regenerativer elektrischer Energie aus PV-Freiflächenanlagen.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 302 Mio. t CO_2/a Freiflächenpotenzial: 935 GW Durchschnittliche Volllaststunden Freiflächen PV in Deutschland: 1.052 h Resultierende Stromerzeugung: 984 TWh (FfE-interne Berechnungen mit Regionaldaten der Datenbank FREM) Vollständige Substitution des deutschen Strommix 2014 Emissionsfaktor Strommix 2014: 537 g/kWh Maximale bilanzielle Deckung: 157 % Annahmen: bezogen auf die Stromerzeugung 2014
Wind (onshore)	Reduktion der Emissionen aus konventioneller Stromerzeugung durch Bereitstellung regenerativer elektrischer Energie aus Onshore-Windenergieanlagen.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 94 Mio. t CO_2/a Abschätzung des maximalen Potenzials auf Basis interner Berechnungen 130 GW /FFE-21 17/ Durchschnittliche Volllaststunden Wind-Onshore in Deutschland: 1.500 h /AEE-02 13//AEE-02 13/ Resultierende Stromerzeugung 195 TWh /FFE-21 17/ Emissionsfaktor Strommix 2014: 537 g/kWh. Der gesamte Strombedarf Deutschlands könnte gedeckt werden Maximale bilanzielle Deckung 2014: 31 %
Wind (offshore)	Reduktion der Emissionen aus konventioneller Stromerzeugung durch Bereitstellung regenerativer elektrischer Energie aus Offshore-Windenergieanlagen.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 111 Mio. t CO_2/a Potenzial: 53 GW Durchschnittliche Volllaststunden Freiflächen PV in Deutschland: 4.340 h Resultierende Stromerzeugung: 230 TWh (FfE-interne Berechnungen mit Regionaldaten der Datenbank FREM) Maximale bilanzielle Deckung 2014: 37 %
Biomass-to-Liquid (BtL)	In der Energiewirtschaft werden CO_2-Emissionen bei der Umwandlung von Brennstoffen eingespart, wenn Biokraftstoffe statt fossiler Kraftstoffe verwendet werden.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 35 Mio. t CO_2/a Annahmen: Maximales technisches Potenzial der Biomasse in Deutschland: 133 TWh pro Jahr im Jahr 2015 (eigene Analyse). Da das technische Potenzial der Biomasse in Deutschland nur für eine teilweise Substitution fossiler Brennstoffe ausreicht, wird davon ausgegangen, dass die Substitution hauptsächlich im schwer dekarbonisierbaren Verkehrssektor zur Anwendung kommt und dort fossile Flüssigkraftstoffe substituiert werden (also Diesel, Benzin und Kerosin). Diese werden nach ihrem Anteil an den Gesamtemissionen durch den synthetischen BtL-Kraftstoff substituiert. Das Verminderungspotenzial ergibt sich aus dieser Logik. Maximale bilanzielle Deckung 2014: 21 % Annahmen: bezogen auf den Gesamtbedarf von 639 TWh an Diesel, Benzin und Kerosin im Jahr 2014 nach /FFE-13 17/

Zufeuerung von Biomasse in konv. Kraftwerken	Einsparung von Emissionen durch Zufeuerung von Biomasse in konventionelle Kraftwerken	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 53 Mio. t CO_2/a Annahmen: 20 % Beimischung möglich /IRENA-01 13/ Daraus ergibt sich ein Substitutionspotential von 146 TWh Maximale bilanzielle Deckung 2014: 130 % Annahmen: Das nachhaltige Holzpotenzial in Deutschland beträgt 190 TWh/a /AEE-03 14/, sodass sich eine Überdeckung von 30 % ergibt.
Power-to-Liquid (PtL) + erneuerbarer Strom	Einsparung von Emissionen durch die Herstellung von synthetischen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen aus PtL-Anlagen, die mit erneuerbarer elektrischer Energie betrieben werden.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 393 Mio. t CO_2/a Annahmen: Die gesamten Emissionen der Brennstoffumwandlung können eingespart werden, wenn der notwendige Strom aus Erneuerbaren Energien gewonnen wird. Es wird für diese Maximalabschätzung davon ausgegangen, dass das Potenzial solcher Erzeugungsanlagen ausreicht, um die benötigte Menge Brennstoff bereit zu stellen. Dabei handelt es sich um ein technisches Potenzial, Restriktionen wie bspw. die Akzeptanz des Netzausbaus o.ä. spielen hier zunächst keine Rolle. Für diese erste Potenzialabschätzung wird angenommen, dass durch den über PtL bereitgestellten Brennstoff alle flüssigen und gasförmigen Energieträger substituiert werden können. Nach /FFE-13 17/ liegen die Gesamtemission aller flüssigen und gasförmigen Energieträger im Bezugsjahr 2014 bei 393 Mio. t CO_2.
Power-to-Gas (PtG) Methan + erneuerbarer Strom	Einsparung von Emissionen durch die Herstellung von synthetischem Methan aus Power-to-Gas-Anlagen, die mit erneuerbarer elektrischer Energie betrieben werden.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 149 Mio. t CO_2/a Annahmen: Die gesamten Emissionen der Brennstoffumwandlung können eingespart werden, wenn der notwendige Strom aus Erneuerbaren Energien gewonnen wird. Es wird für diese erste Potenzialabschätzung angenommen, dass durch Power-to-Gas hergestellte Methan der gesamte Erdgasbedarf substituiert werden kann. Es wird für die Abschätzung des technischen Verminderungspotenzials angenommen, dass durch das synthetische Methan der gesamte Erdgasbedarf in Deutschland gedeckt werden kann. Das maximale technische Potenzial ergibt sich nach /AGEB-01 16/ und /UBA-13 16/ zu 149 Mio. t CO_2/a.
Power-to-Gas (PtG) Wasserstoff + erneuerbarer Strom	Einsparung von Emissionen durch die Herstellung von synthetischem Wasserstoff aus Power-to-Gas-Anlagen, die mit erneuerbarer elektrischer Energie betrieben werden.	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 4,8 Mio. t CO_2/a Annahmen: Es wird davon ausgegangen, dass der erzeugte Wasserstoff ausschließlich durch Strom aus Erneuerbaren Energien produziert und bis zu einem maximalen Anteil von 10 Vol.-% (nach /ÜNB-02 18/) dem Erdgasnetz beigemischt wird. Eine direkte energetische Nutzung in einem Endenergiesektor wird hier zunächst nicht untersucht.

- BHKW Gasmotor - GuD + erneuerbarer Brennstoff	Einsparung von Emissionen durch die kombinierte Bereitstellung von Strom und Wärme in BHKW-Gasmotoren bzw. GuDs mit erneuerbarem Brennstoff	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 362 Mio. t CO_2/a Annahmen: Bei der Abschätzung des maximalen Potenzials wird angenommen, dass die gesamte Strom- und Fernwärmeerzeugung durch die jeweilige Substitutionstechnologie ersetzt wird. Aufgrund der Verwendung von erneuerbarem Brennstoff werden durch diese Maßnahme die gesamten Emissionen eingespart. Die Gesamtemissionen von Strom und Fernwärme liegen im Bezugsjahr 2014 nach /FFE-13 17/ bei 362 Mio. t CO_2.
BHKW Gasmotor + konv. Erdgas	Einsparung von durch die kombinierte Bereitstellung von Strom und Wärme in BHKWs und der Befeuerung des Gasmotors mit konventionellem Erdgas	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 99 Mio. t CO_2/a Annahmen: Elektrischer Wirkungsgrad: 48 % /ASUE-01 14/ Thermischer Wirkungsgrad: 48 % /ASUE-01 14/ Emissionsfaktor Erdgas: 0,0559 t CO_2 /PJ Brennstoffbedarf Erdgas: 4.708 PJ Es wird davon ausgegangen, dass die Technologie die gesamte konventionelle Stromerzeugung substituiert und die dabei erzeugte Wärme in vorhandene Fernwärmenetze einspeist wird und die dort etablierten Technologien vollständig verdrängt. Die Einsparung wird durch den besseren Wirkungsgrad der Substitutionstechnologie und die Verwendung von dem weniger emissionsintensivem Energieträger Erdgas erzielt. Die zugrundeliegenden Wirkungsgrade beziehen sich auf ein 15 MW Erdgas BHKW.
GuD + konv. Erdgas	Einsparung von Emissionen durch die kombinierte Bereitstellung von Strom und Wärme in Gas- und Dampfkraftwerken und der Befeuerung mit konventionellem Erdgas	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 69 Mio. t CO_2/a Annahmen: Elektrischer Wirkungsgrad: 43% Thermischer Wirkungsgrad: 49% Emissionsfaktor Erdgas: 0,0559 t CO_2 /PJ Brennstoffbedarf: 5.256 PJ Es wird davon ausgegangen, dass die Technologie die gesamte konventionelle Stromerzeugung substituiert und die dabei erzeugte Wärme in vorhandene Fernwärmenetze einspeist wird und die dort etablierten Technologien vollständig verdrängt. Die Einsparung wird durch den besseren Wirkungsgrad der Substitutionstechnologie und die Verwendung von dem weniger emissionsintensivem Energieträger Erdgas erzielt.

- Grundwasser-WP - Erd-WP - Luft-WP - Gasabsorptions-WP - Gasadsorptions-WP - Gasmotor-WP - Gasheizwerk - Elektroden-heizkessel + erneuerbarer Strom/Brennstoff	Einsparung von Emissionen in der Fernwärmebereitstellung durch Einsatz von Wärmebereitstellungstechnologien und deren Betrieb mit erneuerbarem Strom/Brennstoff	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 30 Mio. t CO_2/a Annahmen: Bei der Abschätzung des maximalen Potenzials wird angenommen, dass die gesamte konventionelle Fernwärmebereitstellung von 89 TWh durch die Substitutionstechnologie bereitgestellt wird. Aufgrund der Verwendung von erneuerbarem Brennstoff werden durch diese Maßnahme die gesamten Emissionen eingespart. Die Gesamtemissionen von Fernwärme liegen im Bezugsjahr 2014 nach /FFE-13 17/ bei 30 Mio. t CO_2.
Gasabsorptions-WP + konv. Erdgas Gasadsorptions-WP + konv. Erdgas	Einsparung von Emissionen in der Fernwärmebereitstellung durch Einsatz von Gasabsorptions-und Gasadsorptions-Wärmepumpen und deren Befeuerung mit konventionellem Erdgas	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 16 Mio. t CO_2/a Annahmen: Gesamtnutzenergiebedarf: 318.600 TJ Emissionsfaktor Erdgas: 55,9 t CO_2 /TJ Jahresarbeitszahl (JAZ): 1,25 Gaseinsatz: 254.880 TJ Bei der Abschätzung des maximalen Potenzials wird angenommen, dass die konventionelle Fernwärmebereitstellung von 89 TWh durch die Substitutionstechnologie bereitgestellt wird. Die Einsparung wird durch den besseren Wirkungsgrad der Substitutionstechnologie und die Verwendung von dem weniger emissionsintensivem Energieträger Erdgas erzielt. Die Gesamtemissionen von Fernwärme liegen im Bezugsjahr 2014 nach /FFE-13 17/ bei 30 Mio. t CO_2.
Gasmotor-WP + konv. Erdgas	Einsparung von Emissionen in der Fernwärmebereitstellung durch Einsatz von Gasmotor-Wärmepumpen und deren Befeuerung mit konventionellem Erdgas	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 18 Mio. t CO_2/a Herleitung: Gesamtnutzenergiebedarf: 318.600 TJ Emissionsfaktor Erdgas: 55,9 t CO_2 /TJ JAZ: 1,49 Gaseinsatz: 213.462 TJ Bei der Abschätzung des maximalen Potenzials wird angenommen, dass die konventionelle Fernwärmebereitstellung von 89 TWh durch die Substitutionstechnologie bereitgestellt wird. Die Einsparung wird durch den besseren Wirkungsgrad der Substitutionstechnologie und die Verwendung von dem weniger emissionsintensivem Energieträger Erdgas erzielt. Die Gesamtemissionen von Fernwärme liegen im Bezugsjahr 2014 nach /FFE-13 17/ bei 30 Mio. t CO_2.

Gasheizwerk + konv. Erdgas	Einsparung von Emissionen in der Fernwärmebereitstellung durch Einsatz von Gasheizwerken und ihrer Befeuerung mit Erdgas	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 9 Mio. t CO_2/a Herleitung: Gesamtnutzenergiebedarf: 318.600 TJ /FFE-13 17/ Wirkungsgrad Fernheizwerk: 85 % BKA-01 12 Emissionsfaktor Erdgas 55,9 t CO_2 /TJ Bei der Abschätzung des maximalen Potenzials wird angenommen, dass die konventionelle Fernwärmebereitstellung von 89 TWh durch die Substitutionstechnologie bereitgestellt wird. Die Einsparung wird durch den besseren Wirkungsgrad der Substitutionstechnologie und die Verwendung von dem weniger emissionsintensivem Energieträger Erdgas erzielt. Die Gesamtemissionen von Fernwärme liegen im Bezugsjahr 2014 nach /FFE-13 17/ bei 30 Mio. t CO_2.
Biomasseheizwerk	Einsparung von Emissionen in der Fernwärmebereitstellung durch Biomasseverfeuerung	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 30 Mio. t CO_2/a Es wird davon ausgegangen, dass die Technologie die gesamte konventionelle Fernwärmebereitstellung von 89 TWh /FFE-13 17/ substituiert und die dabei erzeugte Wärme in vorhandene Fernwärmenetze einspeist und die dort etablierten Technologien vollständig verdrängt.
Geothermie	Einsparung von Emissionen in der Fernwärmebereitstellung durch Geothermie	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 30 Mio. t CO_2/a Annahmen: Bei der Abschätzung des maximalen Potenzials wird angenommen, dass die gesamte konventionelle Fernwärmebereitstellung von 89 TWh /FFE-13 17/ durch die Substitutionstechnologie bereitgestellt wird. Durch diese Maßnahme die gesamten Emissionen eingespart. Die Gesamtemissionen von Fernwärme liegen im Bezugsjahr 2014 nach /FFE-13 17/ bei 30 Mio. t CO_2.
Solarthermie	Einsparung von Emissionen in der Fernwärmebereitstellung durch Solarthermie	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 30 Mio. t CO_2/a Annahmen: Bei der Abschätzung des maximalen Potenzials wird angenommen, dass die gesamte konventionelle Fernwärmebereitstellung von 89 TWh (/FFE-13 17/) durch die Substitutionstechnologie bereitgestellt wird. Durch diese Maßnahme die gesamten Emissionen eingespart. Die Gesamtemissionen von Fernkälte liegen im Bezugsjahr 2014 nach /FFE-13 17/ bei 30 Mio. t CO_2.
- Absorptionskälte-maschine - Adsorptionskälte-maschine - Elektrische Kompressionskälte-maschine + erneuerbarer Strom	Einsparung von Emissionen in der Fernkältebereitstellung durch Nutzung von Absorptions-/ Adsorptionskältemaschinen bzw. elektrische Kompressionskälte-maschinen und deren Betrieb mit erneuerbarem Strom	Maximales technisches Verminderungspotenzial: 1,3 Mio. t CO_2/a Annahmen: Bei der Abschätzung des maximalen Potenzials wird angenommen, dass die gesamte konventionelle Fernkältebereitstellung von 62 TWh (/AGFW-01 16/) durch die Substitutionstechnologie bereitgestellt wird. Aufgrund der Verwendung von erneuerbarem Strom werden durch diese Maßnahme die gesamten Emissionen eingespart. Die Gesamtemissionen von Fernkälte liegen im Bezugsjahr 2014 nach /FFE-13 17/ bei 1,3 Mio. t CO_2.

Tabelle 1-3: Ausgeschlossene CO_2-Verminderungsmaßnahmen im Bereitstellungssektor

Kurzbezeichnung	Ausschlussgrund
Ausbau KWK Braunkohle	Technologie nicht mit langfristigen Klimazielen vereinbar
Ausbau KWK Steinkohle	Technologie nicht mit langfristigen Klimazielen vereinbar
Ausbau KWK Gas	Technologie nicht mit langfristigen Klimazielen vereinbar
elektr. Effizienzsteigerung Braunkohle	Technologie nicht mit langfristigen Klimazielen vereinbar
elektr. Effizienzsteigerung Steinkohle	Technologie nicht mit langfristigen Klimazielen vereinbar
elektr. Effizienzsteigerung Gas	Technologie nicht mit langfristigen Klimazielen vereinbar
GuD statt Gasturbine	Technologie nicht mit langfristigen Klimazielen vereinbar
Integrated Gasification Combined Cycle-Kraftwerke	Technische Reife nicht ausreichend
Gezeitenkraftwerk	Kein ausreichendes Potenzial in Deutschland vorhanden
Osmosekraftwerk	Kein ausreichendes Potenzial in Deutschland vorhanden
Strömungskraftwerk	Kein ausreichendes Potenzial in Deutschland vorhanden
Wellenkraftwerk	Kein ausreichendes Potenzial in Deutschland vorhanden
PEMFC-Brennstoffzelle	Aktuell noch keine großtechnische Anwendung zu erwarten
MCFC-Brennstoffzelle	Aktuell noch keine großtechnische Anwendung zu erwarten
SOFC-Brennstoffzelle	Aktuell noch keine großtechnische Anwendung zu erwarten

1.3 Technoökonomische Parameter

1.3.1 Strom

Tabelle 1-4: PV Freifläche

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	25	25	25	25	/DENA-01 18/ Seite 428
Wirkungsgrad elektrisch	%	17 %	21 %	26 %	30 %	/ISE-01 15/ Seite 20
CAPEX	€/ MW_{el_out}	827.057	660.122	527.204	445.000	Mittelwert aus /AGORA-03 17/ Seite 19, /AGORA-02 15/ Seite 50, /DIW-07 13/ Seite 9, /RLI-01 13/ Seite 69, /DENA-01 18/ Seite 428 und /AGORA-03 17/ Seite 19
fixe OPEX	€/ (MW_{el_out}*a)	16.541	13.202	10.544	8.900	/AGORA-03 17/ Seite 19

Tabelle 1-5: PV Dach

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	25	25	25	25	/DENA-01 18/ Seite 428
Wirkungsgrad elektrisch	%	17 %	21 %	26 %	30 %	/ISE-01 15/ Seite 20
CAPEX	€/ MW_{el_out}	1.027.667	862.000	854.000	604.250	Mittelwert aus /GWS-01 15/ Seite 97, /RLI-01 13/ Seite 69, /ISE-02 15/ Seite 73, /DENA-01 18/ Seite 428 und /AGORA-03 17/ Seite 19
fixe OPEX	€/ (MW_{el_out}*a)	20.553	17.240	17.080	12.085	/AGORA-03 17/ Seite 19

Tabelle 1-6: Wind Onshore

Siehe Hauptbericht Dynamis Kapitel 4.36

Tabelle 1-7: Wind Offshore

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	25	25	25	25	Mittelwert aus /ISE-02 15/, /DENA-01 18/ und /ISE-01 18/
CAPEX	€/ MW_{el_out}	2.921.381	2.394.694	2.079.847	1.744.000	Abgeleitet aus: /DIW-07 13/, /RLI-01 13/, /ISE-02 15/, /GWS-01 15/, /AGORA-03 17/, /DLR-04 12/ und /DENA-01 18/
fixe OPEX	€/ (MW_{el_out}*a)	96.500	96.500	96.500	96.500	Mittelwert aus: /DENA-01 18/ und /ISE-01 18/

Tabelle 1-8: Tiefengeothermische Stromerzeugung

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	30	30	30	30	/DENA-01 18/ Seite 431
Wirkungsgrad elektrisch	%	10 %	10 %	10 %	10 %	/DLR-04 12/ Seite 11
Wirkungsgrad thermisch	%	35 %	35 %	35 %	35 %	/DLR-04 12/ Seite 11
CAPEX	€/ MW_{el_out}	7.424.875	7.113.133	6.891.402	6.669.500	Mittelwert aus /DENA-01 18/ Seite 431, /DLR 04 12/ Seite 11 und /BLA-01 12 / Seite 33
OPEX	€/ (MW_{el_out}*a)	376.750	365.500	363.250	361.000	Mittelwert aus /DENA-01 18/ Seite 431 und /DLR 04 12/ Seite 11

Tabelle 1-9: Biogasanlage mit direkter Verstromung (unter ggf. Auskopplung von Wärme) Daten beziehen sich auf die Gesamtanlage

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	20	20	20	20	/DLR-04 12/ Seite 11 und /JRC-04 14/
Wirkungsgrad thermisch	%	39 %	39 %	39 %	39 %	/DLR-04 12/ Seite 11 und /JRC-04 14/
Wirkungsgrad elektrisch	%	31 %	31 %	31 %	31 %	/DLR-04 12/ Seite 11 und /JRC-04 14/
CAPEX	€/ MW_{in}	1.191.445	1.168.023	1.140.476	1.134.150	/GWS-01 15/ Seite 97, /DLR-04 12/ Seite 11 und /FNR-06 17/ Seite 47
fixe OPEX	€/ (MW_{in}*a)	77.444	75.922	74.131	73.720	/DLR-04 12/ Seite 11

Tabelle 1-10: Verbrennung von Biomasse zum Betrieb einer Dampfturbine mit ggf. Wärmeauskopplung

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	30	30	30	30	/DENA-01 18/ Seite 430
Wirkungsgrad elektrisch	%	30 %	30 %	30 %	30 %	/DENA-01 18/ Seite 430
CAPEX	€/ MW_{el_out}	3.297.000	3.293.667	3.290.333	3.287.000	/DENA-01 18/ Seite 430
fixe OPEX	€/ (MW_{el_out}*a)	165.000	165.000	165.000	165.000	/DENA-01 18/ Seite 430

Tabelle 1-11: Gasturbine

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	35	35	35	35	eigene Annahme
Wirkungsgrad elektrisch	%	40 %	40 %	40 %	40 %	/EWI-01 14/ und /DENA-01 18/
CAPEX	€/MW_{el_out}	408.750	408.750	408.750	408.750	/IAEW-01 12/ und /DENA-01 18/
fixe OPEX	€/(MW_{el_out}*a)	10.800	10.800	10.800	10.800	/IAEW-01 12/ und /DENA-01 18/

Tabelle 1-12: Gas-BHKW

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	20	20	20	20	eigene Annahme
Wirkungsgrad thermisch	%	40 %	40 %	40 %	40 %	Berechnet nach /ASUE-01 14/, keine Verbesserung erwartet
Wirkungsgrad elektrisch	%	45 %	45 %	45 %	45 %	Berechnet nach /ASUE-01 14/, keine Verbesserung erwartet
CAPEX	€/ MW_{el_out}	717.936	717.936	717.936	717.936	Berechnet nach /ASUE-01 14/, keine Verbesserung erwartet
fixe OPEX	€/ (MW_{el_out}*a)	28.992	28.992	28.992	28.992	Berechnet nach /ASUE-01 14/, keine Verbesserung erwartet

1.3.2 Wärme

Tabelle 1-13: Großwärmepumpe

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	20	20	20	20	/DLR-04 12/ Seite 6
Leistungszahl		3,52	3,67	3,76	3,81	/DLR-04 12/ (JAZ) Seite 6
CAPEX	€/ MW_{th_out}	619.318	560.018	546.593	531.633	Verlauf nach /DLR-04 12/ Seite 6, Anfangswert 2015 nach /VDE-02 15/ Seite 65 für Anlage 100 kW inkl. Installation
fixe OPEX	€/ (MW_{th_out}*a)	21.676	19.601	19.131	18.607	/DLR-04 12/ Seite 6

Tabelle 1-14: Gas Heizwerk

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	20	20	20	20	Annahme basierend auf anderen Bereitstellungstechnologien
Wirkungsgrad thermisch	%	95 %	95 %	95 %	95 %	/FHSWF-01 10/ Seite 2
CAPEX	€/ MW_{th_out}	90.000	90.000	90.000	90.000	/FHSWF-01 10/ Seite 2
fixe OPEX	€/ (MW_{th_out}*a)	1.800	1.800	1.800	1.800	Annahme basierend auf anderen Bereitstellungstechnologien

Tabelle 1-15: Biomasse Heizwerk

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	20	20	20	20	Annahme
Wirkungsgrad thermisch	%	86 %	86 %	86 %	86 %	/PDM-01 16/ Seite 2
CAPEX	€/ MW_{th_out}	479.665	450.984	424.281	399.556	Mittelwert aus /CAR-02 18/ und /GIER-01 13/ Seite 50
fixe OPEX	€/ (MW_{th_out}*a)	9.593	9.020	8.486	7.991	Annahme

Tabelle 1-16: Power to Heat (Elektrodenheizkessel)

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	21	21	21	21	/DENA-01 18/ und /ENST 02 16/
Wirkungsgrad thermisch	%	99 %	99 %	99 %	99 %	/DENA-01 18/
CAPEX	€/ MW_{el_in}	113.333	113.333	113.333	113.333	/DENA-01 18/ und /ENST 02 16/
fixe Opex	€/ (MW_{el_in}*a)	1.000	1.000	1.000	1.000	/DENA-01 18/

1.3.3 Speicher

Tabelle 1-17. Photovoltaik-Hausspeicher

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	20	20	20	20	/ISI-18 15/, Seiten 10-21
Wirkungsgrad	%	94 %	96 %	96 %	96 %	/IRENA-01 17/, abgeleitet aus Seiten 67, 68 und 78
CAPEX	€/ MWh_{Nutz}	6.078	3.598	3.218	3.061	Bottom-Up-Berechnung für 7 kWh Speicher mit IRENA-Tool und Daten aus: /IRENA-01 17/, /ISI-09 17/, /ISEA-01 15/ /TUM-06 16/, /BNETZA-03 18/ und /SON-01 14/
fixe Opex	€/ (MWh_{Nutz}*a)	71	34	28	26	/ACA-04 15/, berechnet aus Anteil auf Seite 23

Tabelle 1-18. Großbatteriespeicher

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	20	20	20	20	/ISI-18 15/, Seiten 10-21
Wirkungsgrad	%	94 %	96 %	96 %	96 %	/IRENA-01 17/, abgeleitet aus Seiten 67, 68 und 78
CAPEX	€/ MWh_{Nutz}	518.444	240.967	231.856	225.856	/IRENA-01 17/, /ISI-09 17/, /ISEA-01 15/ /TUM-06 16/, /BNETZA-03 18/
fixe Opex	€/ (MWh_{Nutz}*a)	7.777	3.615	3.478	3.388	/ACA-04 15/

1.3.4 CCU/CCS

Tabelle 1-19: CCU/CCS

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
CCS DAC inkl. Transport und Speicherung	€/t_{CO2}	408	270	266	241	Mittelwert aus /LBST-02 16/, /BERTA-01 18/, /DENA-02 18/ und /TREM-01 18/
CCU an Punktquelle in der Industrie	€/t_{CO2}	48	48	48	48	Mittelwert aus /THO-01 15/, /DEU-01 08/, /IASS-03 16/

1.3.5 Green Fuels

Tabelle 1-20: Power2Gas-PEMEL

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	11	13	15	16	/DENA-01 18 / Seite 435
Wirkungsgrad Strom zu H_2	%	66 %	73 %	78 %	83 %	/FFE-145 17/ Seite 10
CAPEX	€/MW_{el_in}	1.420.000	820.000	741.250	505.000	/FFE-145 17/ Seite 10
fixe OPEX	€/(MW_{el_in}*a)	28.400	16.400	14.825	10.100	/FFE-145 17/ Seite 10

Tabelle 1-21: Power2Gas-AEL

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	27	30	30	30	/FFE-145 17/ Seite 4, ab 2030 als konstant angenommen
Wirkungsgrad Strom zu H_2	%	73 %	75 %	75 %	75 %	Mittelwert aus /FCHJU-01 14/ Seite 18 und /DENA-01 18/ Seite 434
CAPEX	€/MW_{el_in}	630.000	580.000	580.000	580.000	/FCHJU-01 14/ Seite 20, ab 2030 als konstant angenommen
fixe OPEX	€/(MW_{el_in}*a)	12.600	11.600	11.600	11.600	/FCHJU-01 14/ Seite 20, ab 2030 als konstant angenommen

Tabelle 1-22: Dampfreformierung

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	15	15	15	15	/ISE-02 15/ Seite 79
Wirkungsgrad	%	80 %	80 %	80 %	80 %	/ISE-02 15/ Seite 79
CAPEX	€/MW	955.000	955.000	955.000	955.000	/ISE-02 15/ Seite 79
fixe OPEX	€/(MW*a)	23.875	23.875	23.875	23.875	/ISE-02 15/ Seite 79

Tabelle 1-23: Power to Methan

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	a	11	13	15	16	/DENA-01 18/ Seite 435
Wirkungsgrad Strom zu CH_4	%	56 %	69 %	74 %	78 %	/FFE-145 17/ Seite 6
CAPEX	€/ MW_{el_in}	1.976.667	930.000	857.500	785.000	/FFE-145 17/ Seite 6
var. OPEX	€/ (MWh_{el_in}*a)	6,8	8,4	8,9	9,5	CO_2 aus Punktquelle
fixe OPEX	€/ (MW_{el_in}*a)	39.533	18.600	17.150	15.700	/FFE-145 17/ Seite 6

Tabelle 1-24: Fermenter mit Gasaufbereitung und Einspeisung ins Gasnetz

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer in a	a	20	20	20	20	/FNR-06 16/ Seite 63
Wirkungsgrad	%	55 %	55 %	55 %	55 %	/VDI-05 14/
CAPEX	€/MW_{in}	1.705.115	1.705.115	1.705.115	1.705.115	/FNR-06-17/
fixe OPEX	€/(MW_{in}*a)	51.153	51.153	51.153	51.153	/ISE-02 15/ Seite 74

Tabelle 1-25. Power to Liquid

	Einheit	2020	2030	2040	2050	Quelle
Nutzungsdauer	A	20	20	20	20	/IWES-01 17/, /LUT-102 16/, /LUT-01 17/, /DIET-01 18/
Wirkungsgrad Strom zu SynFuel	%	44 %	47 %	49 %	51 %	/IWES-01 17/, /LUT-102 16/, /LUT-01 17/, /DIET-01 18/
CAPEX	€/ MW_{el_in}	3.901.670	2.131.894	1.956.065	1.859.824	/IWES-01 17/, /LUT-102 16/, /LUT-01 17/, /DIET-01 18/
var. OPEX	€/ (MWh_{el_in}*a)	1,7	1,0	0,7	0,2	CO_2 aus Punktquelle
fixe OPEX	€/(MW_{el_in}*a)	128.755	70.353	64.550	61.374	/IWES-01 17/, /LUT-102 16/, /LUT-01 17/, /DIET-01 18/

2 Verkehr

2.1 Potenzialanalyse Ergebnisse

Tabelle 2-1: Ergebnisse der Potenzialanalyse der CO_2-Verminderungsmaßnahmen im Verkehr

	Kurzbezeichnung der Maßnahme**	energiebedingte CO2-Emissionen der adressierten Verkehrsträger in 2014	min. CO_2-Emissionen der Verkehrsträger bei Umsetzung des techn. Maßnahmenpotenzials	max. techn. CO_2-Verminderungspotenzial der Maßnahme ggü. 2014	Anteil an Gesamtemissionen in 2014	Technologiereife (1-9)	Zukunftsfähigkeit	Spätester Implementierungszeitpunkt	Auswirkungen auf den Strombedarf
		Mio. t CO_2	**Mio. t CO_2**	**Mio. t CO_2**	**%**	**TRL**	**ja/ nein**	**yyyy**	**+/o/-**
1	Modal Shift	165	89	76	10 %	-	ja		
2	Erhöhung der Auslastung im Straßenverkehr	163	64	99	13 %	-	ja		
3	Home Office	119	110	9	1 %	9	ja		
4	Virtual Meetings	143	129	14	2 %	9	ja		
5	Erneuerbare Brennstoffe in konventionellen, verbrennungsmotorischen Verkehrsmitteln	196	0	196	26 %	6 - 9	ja		o/+
6	Batterieelektrische Straßenfahrzeuge + EE-Strom	165	0	165	22 %	9	ja		+
7	Batterieelektrische Lokomotiven + EE-Strom	7	0	7	1 %	7	ja		+
8	Batterieelektrische Binnenschiffe + EE-Strom	1	0	1	0,5 %	5	ja		+
9	Batterieelektrische Flugzeuge + EE-Strom	29	0	29	4 %	1	ja		+
10	Hybridelektrische Straßenfahrzeuge + EE-Strom + konv. Brennstoff	165	33	132	17 %	9	nein	2038-2039	+
11	Hybridelektrische Straßenfahrzeuge + EE-Strom + erneuerbarer Brennstoff	165	0	165	22 %	9	ja		+
12	Wasserstoffelektrische Straßenfahrzeuge + erneuerbarer Brennstoff	165	0	165	22 %	9	ja		o/+
13	Wasserstoffelektrische Lokomotiven + erneuerbarer Brennstoff	7	0	7	1 %	7	ja		o/+
14	Wasserstoffelektrische Binnenschiffe + erneuerbarer Brennstoff	1	0	1	0,5 %	5	ja		o/+
15	Wasserstoffelektrische Flugzeuge + erneuerbarer Brennstoff	29	0	29	4 %	1	ja		o/+
16	Gasbetriebene Straßenfahrzeuge + Erdgas	165	125	40	5 %	9	nein	2038 - 2039	
17	Gasbetriebene Straßenfahrzeuge + erneuerbarer Brennstoff	165	0	165	22 %	9	ja		o/+
18	Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren mit konventionellen Kraftstoffen	202	142	61	8 %	-	ja	jetzt - 2039	
19	Autonomes Fahren/ Digitalisierung im Straßenverkehr	165	99	66	9 %	6	ja		

**PtX=Power-to-X, PtG=Power-to-Gas

2.2 Potenzialanalyse Details

Tabelle 2-2: Herleitung des maximalen technischen Potenzials und der Zukunftsfähigkeit der CO_2-Verminderungsmaßnahmen im Verkehr

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Modal Shift	Modal Shift bezeichnet die Verschiebung von Transportleistung von einem Verkehrsmittel auf ein anderes. Als CO_2-Verminderungsmaßnahme werden der Wechsel von Pkw auf Bus im Personenverkehr und der Wechsel von Lkw auf Bahn im Güterverkehr betrachtet. Dies entspricht jeweils der Verschiebung der Verkehrsleistung vom Verkehrsträger mit dem höchsten zum Verkehrsträger mit dem niedrigsten spezifischen Emissionswert.	Maximales technisches Potenzial: 76 Mio. t CO_2 Herleitung: Das max. technische Potenzial ist gegeben durch $$Potenzial = (1 - \frac{e_{neu}}{e_{alt}}) \cdot E_{alt}$$ E_{alt}: *Emissionen des aktuellen Verkehrsträgers* e_{neu}: *spez. Emissionen des neuen Verkehrsträgers* e_{alt}: *spez. Emissionen des aktuellen Verkehrsträgers* Die spezifischen Emissionsfaktoren werden /UBA-09 10/ entnommen: $$e_{Pkw} = 144\ {}^{g_{CO2}}/_{pkm}$$ $$e_{Bus} = 59\ {}^{g_{CO2}}/_{pkm}$$ $$e_{Lkw} = 104\ {}^{g_{CO2}}/_{tkm}$$ $$e_{Bahn} = 31\ {}^{g_{CO2}}/_{tkm}$$ Es wird angenommen, dass Nahverkehrsbusse 70% und Fernverkehrsbusse 30% des Motorisierten Individualverkehrs (MIV) übernehmen können. Alle Fernverkehrstrecken des Straßengüterverkehrs können auf die Schiene verlagert werden.
Erhöhung der Auslastungen	Verminderung der Fahrzeugkilometer durch Erhöhung der Auslastung einzelner Fahrzeuge. Betrachtet wird dabei nur der Individualverkehr und keine öffentlichen Verkehrsmittel. Mathematisch ausgedrückt erhöht sich hierdurch der Quotient aus Fzg-km / pkm bzw. Fzg-km / tkm.	Maximales technisches Potenzial: 99 Mio. t CO_2 Herleitung: Das maximale technische Potenzial ergibt sich bei vollen Auslastungsgraden Aktuelle Auslastungsgrade: Motorisierter Individualverkehr 33 %, Straßengüterverkehr 47 % /VDV-01 16/
Home Office	Durch Home Office können Wege zwischen dem Wohnort und der Arbeitsstelle vermieden werden, wodurch der Mobilitätsbedarf sinkt.	Maximales technisches Potenzial: 9 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle Berufstätigen, welche die Möglichkeit besitzen im Home Office zu arbeiten, nutzen diese. Anteile der Menschen, die an ihrem Wohnort arbeiten können: 40 % /DIW-02 16/ Anteile der Transportleistung zwischen Zuhause und Arbeitsstelle an der gesamten Transportleistung des jeweiligen Verkehrsträgers nach /BMVI-02 16/: MIV 20 %, Öffentlicher Straßenpersonenverkehr (ÖSPV) 16 %, Schienenpersonenverkehr 25 %

Virtual Meetings	Durch Virtual Meetings können geschäftlich motivierte Wege vermieden werden, wodurch der Mobilitätsbedarf sinkt.	Maximales technisches Potenzial: 4 Mio. t CO_2 Herleitung: Es wird vereinfachend angenommen, dass 20 % der Dienstwege des MIVs und 100 % aller Dienstwege (eigene Annahme basierend auf /VIP-01 12/), die öffentlich zurückgelegt werden, vermieden werden können. Dienstwege sind alle geschäftlich motivierten Wege. Dazu gehören auch u.a. Fahrten zur Erbringung beruflicher Leistungen wie Montage oder Reparatur, die mit Virtual Meetings nicht adressiert werden können. Dienstwege sind abzugrenzen von Arbeitswegen (zwischen dem Wohnort und der Arbeitsstelle). Anteile der Transportleistung von Geschäftswegen an der gesamten Transportleistung des jeweiligen Verkehrsträgers nach /BMVI-02 16/: MIV 14 %, ÖSPV 5 %, Schienenpersonenverkehr 18 %, Luftverkehr 36 %
Erneuerbarer Brennstoff in konventionellen, verbrennungsmotorischen, Verkehrsmitteln	Erneuerbare Kraftstoffe ermöglichen eine Emissionsverminderung bei konventionellen Fahrzeugen.	Maximales technisches Potenzial: 170 Mio. t CO_2 Annahme: Der gesamte, im Verkehr verwendete Brennstoff kann theoretisch CO_2-neutral bereitgestellt werden. Die CO_2-Emissionen von konventionellen, verbrennungsmotorischen Verkehrsmitteln im Verkehrssektor beliefen sich 2014 auf 170 Mio. t.
Batterieelektrische Straßenfahrzeuge + erneuerbarer Strom	Batterieelektrische Straßenfahrzeuge verursachen keine direkten Emissionen und können Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren ersetzen.	Maximales technisches Potenzial: 165 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle Straßenfahrzeuge werden batterieelektrisch angetrieben und der dafür verwendete Strom kann theoretisch CO_2-neutral bereitgestellt. Die gesamten (direkten und indirekten) CO_2-Emissionen im Straßenverkehr beliefen sich 2014 auf 165 Mio. t.
Batterieelektrische Lokomotiven + erneuerbarer Strom	Batterieelektrische Lokomotiven verursachen keine direkten Emissionen und können Lokomotiven mit Verbrennungsmotoren ersetzen.	Maximales technisches Potenzial: 7 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle bisher verbrennungsmotorische Lokomotiven werden batterieelektrisch angetrieben und der dafür verwendete Strom kann theoretisch CO_2-neutral bereitgestellt. Die gesamten (direkten und indirekten) CO_2-Emissionen im Schienenverkehr beliefen sich 2014 auf 7 Mio. t.
Batterieelektrische Binnenschiffe + erneuerbarer Strom	Batterieelektrische Binnenschiffe verursachen keine direkten Emissionen und können Schiffe mit Verbrennungsmotoren ersetzen.	Maximales technisches Potenzial: 1 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle Binnenschiffe werden batterieelektrisch angetrieben und der dafür verwendete Strom kann theoretisch CO_2-neutral bereitgestellt. Die gesamten (direkten und indirekten) CO_2-Emissionen in der Binnenschifffahrt beliefen sich 2014 auf 1 Mio. t.

Batterieelektrische Flugzeuge + erneuerbarer Strom	Batterieelektrische Flugzeuge verursachen keine direkten Emissionen und können Flugzeuge mit konventionellen Turbinen ersetzen.	Maximales technisches Potenzial: 2 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle Flugzeuge werden batterieelektrisch angetrieben und der dafür verwendete Strom kann theoretisch CO_2-neutral bereitgestellt. Die gesamten (direkten und indirekten) CO_2-Emissionen im Flugverkehr beliefen sich 2014 auf 2 Mio. t.
Hybridelektrische Straßenfahrzeuge + erneuerbarer Strom + konv. Brennstoff	Hybridelektrische Straßenfahrzeuge erlauben einen teilelektrischen Betrieb. Der restliche Anteil muss durch einen konventionellen Verbrennungsmotor geleistet werden.	Maximales technisches Potenzial: 132 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle Straßenfahrzeuge werden hybridelektrisch angetrieben und der dafür verwendete Strom wird CO_2-neutral bereitgestellt. Es wird angenommen, dass der gesamte Straßenverkehr hybridelektrisch angetrieben werden kann und 80 % der Kilometerleistung elektrisch zurückgelegt wird. Die gesamten (direkten und indirekten) CO_2-Emissionen im Straßenverkehr beliefen sich 2014 auf 165 Mio. t. Zukunftsfähigkeit: Im Sinne der vollständigen Dekarbonisierung des Energiesystems kritisch, da die Erreichung der Klimaziele bei weiterer Verwendung fossiler Brennstoffe in anderweitig vollständig dekarbonisierbaren Bereichen fragwürdig ist. Das Intervall der letztmöglichen Implementierungszeitpunkte ergibt sich aus den durchschnittlich angenommenen Lebensdauern von Lkw (11 Jahre) und Pkw (12 Jahre) /KBA-03 16/.
Hybridelektrische Straßenfahrzeuge + erneuerbarer Strom + erneuerbarer Brennstoff	Hybridelektrische Straßenfahrzeuge erlauben einen teilelektrischen Betrieb. Der Restanteil wird durch einen konventionellen Verbrennungsmotor geleistet, der mit erneuerbaren Brennstoffen betrieben werden kann.	Maximales technisches Potenzial: 165 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle Verkehrsträger werden hybridelektrisch angetrieben und der dafür verwendete Strom bzw. Brennstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt. Die gesamten (direkte und indirekte) CO_2-Emissionen im Straßenverkehr beliefen sich 2014 auf 165 Mio. t.
Wasserstoff-elektrische Straßenfahrzeuge + erneuerbarer Brennstoff	Bei wasserstoffelektrischen Fahrzeugen wird Wasserstoff getankt, der in einer Brennstoffzelle zu elektrischer Energie umgewandelt wird. Dieser treibt einen Elektromotor an. Dabei entstehen keine direkten Emissionen.	Maximales technisches Potenzial: 165 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle Straßenfahrzeuge werden wasserstoffelektrisch angetrieben und der dafür verwendete Wasserstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt. Die gesamten (direkte und indirekte) CO_2-Emissionen im Straßenverkehr beliefen sich 2014 auf 165 Mio. t.
Wasserstoff-elektrische Lokomotiven + erneuerbarer Brennstoff	Bei wasserstoffelektrischen Lokomotiven wird Wasserstoff getankt, der in einer Brennstoffzelle zu elektrischer Energie umgewandelt wird. Dieser treibt einen Elektromotor an. Dabei entstehen keine direkten Emissionen.	Maximales technisches Potenzial: 7 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle Lokomotiven werden wasserstoffelektrisch angetrieben und der dafür verwendete Wasserstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt. Die gesamten (direkte und indirekte) CO_2-Emissionen im Schienenverkehr beliefen sich 2014 auf 7 Mio. t.

Wasserstoff-elektrische Binnenschiffe + erneuerbarer Brennstoff	Bei wasserstoffelektrischen Binnenschiffen wird Wasserstoff getankt, der in einer Brennstoffzelle zu elektrischer Energie umgewandelt wird. Dieser treibt einen Elektromotor an. Dabei entstehen keine direkten Emissionen.	Maximales technisches Potenzial: 1 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle Binnenschiffe werden wasserstoffelektrisch angetrieben und der dafür verwendete Wasserstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt. Die gesamten (direkte und indirekte) CO_2-Emissionen in der Binnenschifffahrt beliefen sich 2014 auf 1 Mio. t.
Wasserstoff-elektrische Flugzeuge + erneuerbarer Brennstoff	Bei wasserstoffelektrischen Flugzeugen wird Wasserstoff getankt, welche für den Antrieb der Flugzeuge genutzt wird. Dabei entstehen lokal keine Emissionen.	Maximales technisches Potenzial: 2 Mio. t CO_2 Herleitung: Annahme: Alle Flugzeuge werden wasserstoffelektrisch angetrieben und der dafür verwendete Wasserstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt. Die gesamten (direkte und indirekte) CO_2-Emissionen im Flugverkehr beliefen sich 2014 auf 2 Mio. t.
Gasbetriebene Straßenfahrzeuge + Erdgas	Straßenfahrzeuge, welche Erdgas als Brennstoff verwenden. Erdgas verursacht im Vergleich zu Benzin- und Dieselfahrzeugen geringere Emissionen.	Maximales technisches Potenzial: 40 Mio. t CO_2 Herleitung: Laut /LBST-01 16/ sind die Emissionen von Gasmotoren (komprimiertes Erdgas) in großen Lkw, bis zu 24 % geringer als jene eines konventionellen Diesel-Lkw. Vereinfachend wird angenommen, dass das analog für Pkw auch gilt. Die gesamten (direkte und indirekte) CO_2-Emissionen im Straßenverkehr beliefen sich 2014 auf 165 Mio. t. Zukunftsfähigkeit: Im Sinne der vollständigen Dekarbonisierung des Energiesystems kritisch, da die intensive Verwendung fossiler Brennstoffe unter Einhaltung der Klimaziele nicht möglich ist. Das Intervall der letztmöglichen Implementierungszeitpunkte ergibt sich aus den durchschnittlich angenommenen Lebensdauern von Lkw (11 Jahre) und Pkw (12 Jahre) /KBA-03 16/
Gasbetriebene Straßenfahrzeuge + erneuerbarer Brennstoff	Straßenfahrzeuge, die PtG-Gas als Brennstoff verwenden. Hierdurch kann der Einsatz fossiler Brennstoffe reduziert werden.	Maximales technisches Potenzial: 165 Mio. t CO_2 Herleitung: Analog zu „Gasbetriebene Straßenfahrzeuge + Erdgas“ kann in Gasfahrzeugen auch erneuerbarer Brennstoff verwendet werden. Das maximale Potenzial wird erreicht, wenn der gesamte verwendete Brennstoff CO_2-neutral bereitgestellt wird.

Effizienzsteigerung von konventionellen Verkehrsmitteln	Effizienzsteigerungen bei Verbrennungsmotoren führen zu Kraftstoffeinsparungen und somit zu CO_2-Einsparung.	Maximales technisches Potenzial: 50 Mio. t CO_2 Herleitung: Für die möglichen Effizienzsteigerungen werden für die einzelnen Verkehrsträger folgende Werte der Literatur entnommen: Straßenpersonenverkehr 27 % /EWI-01 17/, Straßengüterverkehr 33 % /EWI-01 17/, Schienenverkehr 20 % /UBA-05 16/, Flugverkehr 40 % /BHL-01 13/, Binnenschifffahrt 14 % /UBA-09 10/. Die gesamten (direkte und indirekte) CO_2-Emissionen beliefen sich 2014 im Straßenpersonenverkehr auf 114 Mio. t, im Straßengüterverkehr auf 51 Mio. t, im Schienenverkehr auf 6 Mio. t, im Flugverkehr auf 2 Mio. t und in der Binnenschifffahrt auf 1 Mio. t. Zukunftsfähigkeit: Im Sinne der vollständigen Dekarbonisierung des Energiesystems kritisch, da die intensive Verwendung fossiler Brennstoffe unter Einhaltung der Klimaziele nicht möglich ist. Das Intervall der letztmöglichen Implementierungszeitpunkte ergibt sich aus den durchschnittlich angenommenen Lebensdauern von Lkw (11 Jahre /KBA-03 16/) und Binnenschiffe (Annahme: 60 Jahre)
Autonomes Fahren / Digitalisierung	Autonomes Fahren und Digitalisierung ermöglicht ein verbrauchsoptimiertes Fahren. Das kann z. B. durch vorausschauende Geschwindigkeitsreduktion vor Ampeln oder sogenanntes Platooning – der Bildung eines Lkw-Zuges auf Autobahnen zur Vermeidung des Luftwiderstands – realisiert werden.	Maximales technisches Potenzial: 66 Mio. t CO_2 Herleitung: Verbrauchsoptimiertes Fahren durch autonomes Fahren bzw. Digitalisierung wird im Straßenverkehr betrachtet. In /CIE-01 16/ werden einige Szenarien diesbezüglich betrachtet und maximale Energieeinsparungen von 40 % angegeben. Es wird angenommen, dass die relative Energieeinsparung gleich der relativen Emissionseinsparung ist. Die gesamten (direkte und indirekte) CO_2-Emissionen im Straßenverkehr beliefen sich 2014 auf 165 Mio. t.

2.3 Technoökonomische Parameter

2.3.1 Straßenverkehr

2.3.1.1 Pkw

Tabelle 2-3: Alle Segmente

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Lebensdauer in a		12,8	12,8	12,8	12,8	Eigene Berechnung nach KBA
Besetzungsgrad in pkm/Fzgkm		1,48	1,47	1,47	1,47	/BMWI-01 14/
Fixe Betriebskosten in €/a	Benzinantrieb	385	385	385	385	/ISI-01 10/
	Hybrid-Benzinantrieb	385	385	385	385	/ISI-01 10/
	Dieselantrieb	356	356	356	356	/ISI-01 10/
	Erdgasantrieb	464	464	464	464	/ISI-01 10/
	Autogasantrieb	385	385	385	385	/ISI-01 10/
	Batterieelektrischer Antrieb	270	270	270	270	/ISI-01 10/
	Plug-In-Hybrid-Benzinantrieb	385	385	385	385	/ISI-01 10/
	Brennstoffzellenantrieb	270	270	270	270	/ISI-01 10/
Jahresfahrleistung in Tausend km/a	Benzinantrieb	10,12	10,02	10,83	11,05	/BMWI-01 14/
	Hybrid-Benzinantrieb	9,61	10,02	10,83	11,05	/BMWI-01 14/
	Dieselantrieb	19,81	18,97	17,30	16,68	/BMWI-01 14/
	Erdgasantrieb	23,68	21,44	18,43	16,68	/BMWI-01 14/
	Autogasantrieb	19,95	19,10	17,42	16,80	/BMWI-01 14/
	Batterieelektrischer Antrieb	5,24	7,46	10,24	10,99	/BMWI-01 14/
	Plug-In-Hybrid-Benzinantrieb	9,13	10,02	10,83	11,05	/BMWI-01 14/
	Brennstoff-zellenantrieb	9,13	10,72	16,58	16,68	/BMWI-01 14/
Batteriekosten (Zellebene) in €/kWh		183	105	74	55	/ISI-09 17/
Systemkostenkostenfaktor PHEV		2,2	2,0	2,0	2,0	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Brennstoffzellenkosten in €/kW		150	80	62	43	/US-107 12/
Kosten des H_2-Tanks in €/kg		666	466	450	433	/US-107 12/

Tabelle 2-4: Kleinwagen

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Kaufpreis (CAPEX) in €/Fzg.	Benzin	13.979	14.879	15.134	15.186	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	HEV	18.198	17.212	16.833	16.488	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Diesel	16.015	16.748	17.210	17.463	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Erdgas	13.856	14.756	15.011	15.064	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Autogas	13.979	14.879	15.134	15.186	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	BEV	20.651	16.925	15.193	13.399	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	PHEV	20.527	19.295	18.856	18.338	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	FCEV	21.515	15.869	14.517	13.093	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
Batteriekapazität in kWh/Fzg.	BEV	29,2	32,4	32,4	32,4	Eigene Annahmen und /CAMB-01 17/
	PHEV	7,4	8,2	8,2	8,2	Eigene Annahmen und /CAMB-01 17/
Batteriesystem-kostenfaktor BEV		1,8	1,8	1,8	1,8	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Leistung BSZ in kW		63,9	63,9	63,9	63,9	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Größe H_2-Tank in kg		2,0	2,0	2,0	2,0	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Spez. Verbrauch in kWh/(100*km)	Benzin	51,1	45,4	42,6	42,6	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	HEV	36,3	31,6	29,1	29,1	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Diesel	42,0	35,6	32,6	32,6	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Erdgas	49,4	44,0	41,4	41,4	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Autogas	51,1	45,4	42,6	42,6	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	BEV	11,0	10,3	9,7	9,77	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	PHEV	20,5	18,5	16,5	16,5	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	FCEV	19,3	15,6	13,8	13,8	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/

Tabelle 2-5: Kompaktklasse

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Kaufpreis (CAPEX) in €/Fzg.	Benzin	24.318	25.454	25.705	25.866	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	HEV	29.858	28.719	28.191	27.839	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Diesel	27.906	28.908	29.558	30.022	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Erdgas	27.026	28.162	28.413	28.574	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Autogas	24.318	25.454	25.705	25.866	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	BEV	34.282	28.648	26.379	24.041	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	PHEV	33.765	32.375	31.944	31.405	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	FCEV	37.840	29.079	27.009	24.858	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
Batteriekapazität in kWh/Fzg.	BEV	41,9	46,9	46,9	46,9	Eigene Annahmen und /CAMB-01 17/
	PHEV	8,4	9,4	9,4	9,4	Eigene Annahmen und /CAMB-01 17/
Batteriesystem-kostenfaktor BEV		1,7	1,7	1,7	1,7	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Leistung BSZ in kW		97,2	97,2	97,2	97,2	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Größe H_2-Tank in kg		3,7	3,7	3,7	3,7	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Spez. Verbrauch in kWh/(100*km)	Benzin	58,9	52,4	49,1	49,1	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	HEV	41,8	36,4	33,6	33,6	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Diesel	50,8	43,2	39,5	39,5	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Erdgas	57,0	50,7	47,7	47,7	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Autogas	58,9	52,4	49,1	49,1	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	BEV	16,8	15,6	14,8	14,8	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	PHEV	31,2	28,1	25,1	25,1	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	FCEV	29,3	23,7	20,9	20,9	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/

Tabelle 2-6: Mittelklasse

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Kaufpreis (CAPEX) in €/Fzg.	Benzin	32.827	33.964	34.215	34.375	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	HEV	33.175	32.606	31.508	31.156	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Diesel	38.105	39.106	39.756	40.220	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Erdgas	35.353	36.489	36.740	36.901	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Autogas	32.827	33.964	34.215	34.375	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	BEV	41.374	35.254	32.725	30.129	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	PHEV	41.175	39.474	38.908	38.237	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	FCEV	47.269	36.797	34.331	31.785	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
Batteriekapazität in kWh/Fzg.	BEV	45,9	51,8	51,8	51,8	Eigene Annahmen und /CAMB-01 17/
	PHEV	10,1	11,4	11,4	11,4	Eigene Annahmen und /CAMB-01 17/
Batteriesystem-kostenfaktor BEV		1,7	1,7	1,7	1,7	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Leistung BSZ in kW		114,0	114,0	114,0	114,0	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Größe H_2-Tank in kg		5,0	5,0	5,0	5,0	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Spez. Verbrauch in kWh/(100*km)	Benzin	58,9	52,4	49,1	49,1	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	HEV	41,8	36,4	33,6	33,6	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Diesel	50,8	43,2	39,5	39,5	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Erdgas	57,0	50,7	47,7	47,7	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Autogas	58,9	52,4	49,1	49,1	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	BEV	16,8	15,6	14,8	14,8	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	PHEV	31,2	28,1	25,1	25,1	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	FCEV	29,3	23,7	20,9	20,9	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/

Tabelle 2-7: Oberklasse

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Kaufpreis (CAPEX) in €/Fzg.	Benzin	55.150	56.615	56.859	57.032	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	HEV	55.931	54.351	53.753	53.291	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Diesel	47.853	49.187	49.862	50.500	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Erdgas	44.383	45.849	46.093	46.265	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	Autogas	55.150	56.615	56.859	57.032	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	BEV	74.798	63.021	58.045	52.981	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	PHEV	69.786	67.969	67.368	66.667	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
	FCEV	66.207	55.194	52.702	50.103	Eigene Modellierung nach /FFE-58 18/
Batteriekapazität in kWh/Fzg.	BEV	99,2	112,0	112,0	112,0	Eigene Annahmen und /CAMB-01 17/
	PHEV	10,8	12,2	12,2	12,2	Eigene Annahmen und /CAMB-01 17/
Batteriesystem-kostenfaktor BEV		1,5	1,5	1,5	1,5	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Leistung BSZ in kW		114,9	114,9	114,9	114,9	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Größe H_2-Tank in kg		7,1	7,1	7,1	7,1	Abgeleitet aus /MFG-01 17/
Spez. Verbrauch in kWh/(100*km)	Benzin	68,5	60,9	57,1	57,1	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	HEV	48,6	42,3	39,1	39,1	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Diesel	66,1	56,2	51,5	51,5	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Erdgas	66,3	59,0	55,5	55,5	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Autogas	68,5	60,9	57,1	57,1	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	BEV	19,8	18,5	17,5	17,5	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	PHEV	36,8	33,3	29,7	29,7	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	FCEV	34,6	28,0	24,7	24,7	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/

2.3.1.2 Straßengüterverkehr - Lkw

Tabelle 2-8: Leichte Nutzfahrzeuge (< 3,5 t)

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Kaufpreis (CAPEX) in €/Fzg.	Benzin	27.250	27.740	28.230	28.720	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	Diesel	27.250	27.740	28.230	28.720	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	Erdgas	28.841	28.707	28.573	28.440	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	Autogas	27.250	27.740	28.230	28.720	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	BEV	39.187	36.261	33.336	30.411	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	FCEV	68.576	59.119	49.663	40.207	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
Spez. Verbrauch in kWh/(100*km)	Benzin	103,1	99,9	96,7	93,5	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Diesel	130,0	122,4	114,9	107,3	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Erdgas	122,0	115,7	109,3	103,0	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Autogas	143,3	138,2	133,1	128,0	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	BEV	30,0	27,3	24,7	22,0	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	FCEV	52,0	49,0	46,0	43,0	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/

Tabelle 2-9: Mittlere Nutzfahrzeuge (3,5 – 12 t)

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Kaufpreis (CAPEX) in €/Fzg	Diesel	45.945	50.059	54.173	58.287	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	Erdgas	45.945	50.059	54.173	58.287	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	Autogas	66.174	66.878	67.582	68.287	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	BEV	105.974	98.026	90.078	82.130	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	FCEV	168.331	137.533	106.736	75.939	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
Spez. Verbrauch in kWh/(100*km)	Diesel	235,8	228,7	221,7	214,6	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Erdgas	225,0	213,0	201,0	189,0	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Autogas	268,7	259,2	249,6	240,0	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	BEV	75,0	72,1	69,2	66,3	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	FCEV	108,0	101,6	95,1	88,7	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/

Tabelle 2-10: Schwere Nutzfahrzeuge (> 12 t)

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Kaufpreis (CAPEX) in €/Fzg	Diesel	70.666	81.998	81.998	81.998	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	Erdgas	114.333	143.000	143.000	143.000	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	BEV	166.470	130.176	130.176	130.176	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	FCEV	252.412	121.057	121.057	121.057	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
Spez. Verbrauch in kWh/(100*km)	Diesel	336,0	285,7	271,0	256,5	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Erdgas	248,7	214,0	211,9	209,8	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	BEV	104,64	95,92	95,92	95,92	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	FCEV	191,7	173,0	173,0	173,0	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/

Tabelle 2-11: Sattelzugmaschinen

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Kaufpreis (CAPEX) in €/Fzg.	Diesel	110.891	128.673	128.673	128.673	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	Erdgas	118.985	195.910	195.910	195.910	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	BEV	166.470	185.177	185.177	185.177	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	O-Lkw	196.258	137.916	137.916	137.916	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
	FCEV	522.047	174.000	174.000	174.000	/DENA-01 18/, /ISI-11 17/, /ÖKO-03 18/
Spez. Verbrauch in kWh/(100*km)	Diesel	437,3	371,8	352,8	333,8	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	Erdgas	323,3	278	275,3	272,6	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	BEV	134,4	134,2	134,2	134,2	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	O-Lkw	164,6	148,5	148,5	148,5	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/
	FCEV	249,7	225,0	225,0	225,0	/DENA-05 17/, angepasst mit /MFG-01 17/

2.3.2 Schienenverkehr

Tabelle 2-12: Straßen-, Stadt- und U-Bahnen (SSU)

	2020	2030	2040	2050	Quelle
Besetzungs-grad in pkm/Fzgkm	57,2	60,2	63,2	66,5	/BMWI-01 14/
Spezifischer Verbrauch in kWh/Fzgkm	5,6	5,4	5,3	5,3	/BMWI-01 14/
Spez. Fahrleistung in km/Fzg.	48090	48090	48090	48090	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/

Tabelle 2-13: Schienenpersonenverkehr (Nahverkehr)

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Spezifischer Verbrauch in kWh/km	Elektro	3,6	3,6	3,6	3,6	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/
	Diesel	8,0	8,0	8,0	8,0	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/
Besetzungsgrad in pkm/Fzg-km		29,0	29,0	29,0	29,0	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/
Jahresfahrleistung in km		170.000	170.000	170.000	170.000	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/

Tabelle 2-14: Schienenpersonenverkehr (Fernverkehr)

		2020	2030	2040	2050	Quelle
Spezifischer Verbrauch in kWh/km	Elektro	7,9	7,9	7,9	7,9	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/
	Diesel	3,7	3,7	3,7	3,7	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/
Besetzungs-grad in pkm/Fzg-km	Elektro	125,6	125,6	125,6	125,6	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/
	Diesel	19,6	19,6	19,6	19,6	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/
Jahresfahr-leistung in km	Elektro	452.961	452.961	452.961	452.961	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/
	Diesel	250.000	250.000	250.000	250.000	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/

Tabelle 2-15: Schienenpersonenverkehr (Höchstgeschwindigkeit, Elektro)

	2020	2030	2040	2050	Quelle
Spezifischer Verbrauch in kWh/km	3,4	3,4	3,4	3,4	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/
Besetzungsgrad in pkm/Fzg-km	54,7	54,7	54,7	54,7	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/
Jahresfahrleistung in km	547.038	547.038	547.038	547.038	Eigene Berechnung nach /BMWI-01 14/, /DESTATIS-14 11/

2.3.3 Flugverkehr

Tabelle 2-16: Passagierflugzeug (national)

	2020	2030	2040	2050	Quelle
spezifischer Verbrauch in MJ/km	155	140	127	114	/DENA-05 17/
Besetzungsgrad in pkm/Flug-km	87,7	87,7	87,7	87,7	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-18 12/
Spez. Jahresflugleistung in km/a	2.235.000	2.235.000	2.235.000	2.235.000	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-18 12/

Tabelle 2-17: Frachtflugzeug (national)

	2020	2030	2040	2050	Quelle
spezifischer Verbrauch in MJ/km	155	140	127	114	/DENA-05 17/
Beladung in tkm/Flug-km	8,8	8,8	8,8	8,8	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-18 12/
Spez. Jahresflugleistung in km/a	2.235.000	2.235.000	2.235.000	2.235.000	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-18 12/

Tabelle 2-18: Passagierflugzeug (international)

	2020	2030	2040	2050	Quelle
spezifischer Verbrauch in MJ/km	254	230	208	188	/DENA-05 17/
Besetzungsgrad in pkm/Flug-km	238	238	238	238	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-18 12/
Spez. Jahresflugleistung in km/a	2.235.000	2.235.000	2.235.000	2.235.000	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-18 12/

Tabelle 2-19: Frachtflugzeug (international)

	2020	2030	2040	2050	Quelle
spezifischer Verbrauch in MJ/km	254	230	208	188	/DENA-05 17/
Beladung in tkm/Flug-km	23,8	23,8	23,8	2	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-18 12/
Spez. Jahresflugleistung in km/a	2.235.000	2.235.000	2.235.000	2.235.000	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-18 12/

2.3.4 Binnenschifffahrt

Tabelle 2-20: Binnenschiff (Dieselantrieb)

	2020	2030	2040	2050	Quelle
spezifischer Verbrauch in MJ/Fzgkm	252,8	252,8	252,8	252,8	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-17 12/
Beladung in t/Fzg.	1259	1259	1259	1259	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-17 12/
Spez. Jahresfahrleistung in km/Fzg.xa	19636	19636	19636	19636	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-17 12/
Lebensdauer in a	47	47	47	47	/ÖKO-02 16/
Kaufpreis in €/Fzg.	2.000.000	2.000.000	2.000.000	2.000.000	/VBD-01 04/, eigene Annahmen
Fixe Betriebskosten in €/Fzg.xa	37.500	37.500	37.500	37.500	/VBD-01 04/, eigene Annahmen

Tabelle 2-21: Binnenschiff (H2-BSZ)

	2020	2030	2040	2050	Quelle
spezifischer Verbrauch in MJ/Fzgkm	241,0	241,0	241,0	241,0	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-17 12/
Beladung in t/Fzg	1259	1259	1259	1259	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-17 12/
Spez. Jahresfahrleistung in km/(Fzg*a)	19636	19636	19636	19636	Berechnung in Konsistenz mit /BMWI-01 14/ und /DESTATIS-17 12/
Lebensdauer in a	47	47	47	47	/ÖKO-02 16/
Kaufpreis in €/Fzg	2.700.000	1.890.000	1.890.000	1.890.000	/VBD-01 04/, eigene Annahmen
Fixe Betriebs-kosten in €/(Fzg*a)	29.521	29.521	29.521	29.521	/VBD-01 04/, eigene Annahmen

3 Private Haushalte

3.1 Potenzialanalyse Ergebnisse

Tabelle 3-1: Ergebnisse der Potenzialanalyse in Privaten Haushalten

	Kurzbezeichnung der Maßnahme**	adressierte Anwendung(en)*	energiebedingte CO_2-Emissionen der Anwendung(en) in 2014	min. CO_2-Emissionen der Anwendung(en) bei Umsetzung des techn. Maßnahmenpotenzials	max. techn. CO_2-Verminderungspotenzial der Maßnahme ggü. 2014	Anteil an Gesamtemissionen in 2014	Technologiereife	Zukunftsfähigkeit 2050	Spätester Implementierungszeitpunkt	Auswirkung auf den Strombedarf
			Mio. t CO_2	Mio. t CO_2	Mio. t CO_2	%	TRL	ja/nein	yyyy	+/o/-
1	Solarthermie	RW, WW	130	0	130	17 %	9	ja		o/-
2	Gas-Brennwertkessel + konv. Methan	RW, WW	130	107	23	3 %	9	nein	2020	o/-
3	Gasabsorptionswärmepumpe + konv. Methan	RW, WW	130	64	66	9 %	8	nein	2035	o/-
4	Gasadsorptionswärmepumpe + konv. Methan	RW, WW	130	67	64	8 %	8	nein	2035	o/-
5	Gasmotorwärmepumpe + konv. Methan	RW, WW	130	60	71	9 %	8	nein	2035	o/-
6	Brennstoffzelle + konv. Methan	RW, WW	130	111	19	2 %	8	nein	2035	-
7	Stirlingmotor + konv. Methan	RW, WW	130	118	12	2 %	8	nein	2035	-
8	Ottomotor + konv. Methan	RW, WW	130	111	19	2 %	9	nein	2035	-
9	Öl- und Gaskessel + erneuerbarer Brennstoff	RW, WW	130	0	130	17 %	8	ja		+
10	Gasabsorptionswärmepumpe + erneuerbarer Brennstoff	RW, WW	130	0	130	17 %	8	ja		+
11	Gasadsorptionswärmepumpe + erneuerbarer Brennstoff	RW, WW	130	0	130	17 %	8	ja		+
12	Gasmotorwärmepumpe + erneuerbarer Brennstoff	RW, WW	130	0	130	17 %	8	ja		+
13	Brennstoffzelle + erneuerbarer Brennstoff	RW, WW	130	0	130	17 %	8	ja		+
14	Stirlingmotor + erneuerbarer Brennstoff	RW, WW	130	0	130	17 %	8	ja		+
15	Verbrennungsmotor + erneuerbarer Brennstoff	RW, WW	130	0	130	17 %	9	ja		+
16	Heizstab als Ergänzung + erneuerbarer Strom	RW, WW	130	0	130	17 %	9	ja		+
17	Luftwärmepumpe + erneuerbarer Strom	RW, WW	130	0	130	17 %	9	ja		+
18	Erdwärmepumpe + erneuerbarer Strom	RW, WW	130	0	130	17 %	9	ja		+
19	Anschluss an Fernwärmeversorgung + erneuerbare Fernwärme	RW, WW	130	0	130	17 %	9	ja		-/o/+
20	Hocheffizienzpumpen	RW, WW	130	128	2	0,3 %	9	ja		-
21	Dämmung (Rohrleitungen, Wärmespeicher)	RW, WW	130	126	5	1 %	9	ja		o/-
22	Wärmerückgewinnung	RW	107	95	12	2 %	9	ja		+
23	Reduktion von Infiltrationsverlusten	RW	107	102	5	1 %	9	ja		o/-
24	Flächenheizungen (Solarthermie, Wärmepumpe & Brennwertkessel)	RW	107	105	2	0,2 %	9	ja		o/-
25	Dämmung (Dach, Fassade, Kellerdecke, Fundament, Fenster)	RW	107	0	107	14 %	9	ja		o/-
26	Automatisierungstechnik zur Raumwärmebedarfsreduktion	RW	107	84	23	3 %	9	ja		o/-
27	Effizientere Kühl-/ Gefriergeräte	PK	16	12	4	0,5 %	9	ja		-
28	Effizientere weiße Geräte	PW, ME	26	24	2	0,3 %	9	ja		-
29	Effizientere Elektrokochherde	PW	20	19	1	0,1 %	9	ja		-
30	Effizientere Beleuchtung	B	6	5	1	0,2 %	9	ja		-
31	Effizientere Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)	IKT	12	8	4	0,5 %	9	ja		-

*RW=Raumwärme, WW=Warmwasser, PK=Prozesskälte, PW=Prozesswärme, ME=Mechanische Energie, B=Beleuchtung

**PtH=Power-to-Heat, PtL=Power-to-Liquid, PtG=Power-to-Gas

3.2 Potenzialanalyse Details

Tabelle 3-2: Herleitung des maximalen technischen Potenzials und der Zukunftsfähigkeit der CO_2-Verminderungsmaßnahmen in privaten Haushalten

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Solarthermie	Erweiterung bestehender Heizsysteme um Solarthermieanlagen. Diese reduzieren den Brennstoffbedarf fossiler Heizsysteme um den solarthermisch substituierten Endenergieanteil.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: dezentrale oder zentrale Wärmespeicher und oder Wärmenetze ermöglichen den saisonalen Ausgleich von Wärmeerzeugung und -bedarf; potenzielle Dachflächen auf Gebäuden in Deutschland in ausreichendem Maß vorhanden (Vgl. /JET-02 16/)
Gas-Brennwert-kessel + konv. Methan	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch hocheffiziente gasbetriebene Brennwertkessel. Erd- bzw. Flüssiggas wird aufgrund des höheren Wasserstoff-zu-Kohlenstoff-Verhältnisses emissionsärmer verbrannt als Heizöl. Zudem können die Wärmeverluste im Abgas durch den Einsatz der Brennwerttechnologie reduziert werden.	Maximales technisches Potenzial: 23 Mio. t CO_2 Herleitung: Nutzenergiebedarf an Raumwärme & Warmwasser (2014 temperaturbereinigt): 426 TWh Berechnung mittels /FFE-04 12/ und Teilsystemnutzungsgrad: 86 % mittels Daten von /CORR-01 13/; Jahresnutzungsgrad: 94 % /REC-01 16/; Emissionsfaktor: 55,9 t CO_2/TJ nach /UBA-03 16/ Zukunftsfähigkeit: Im Sinne der vollständigen Dekarbonisierung des Energiesystems kritisch, da die intensive Verwendung fossiler Brennstoffe unter Einhaltung der Klimaziele nicht möglich ist. Lebensdauer: 30 Jahre
Gasabsorptions-wärmepumpe + konv. Methan	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch gasbetriebene Absorptions-wärmepumpen, welche im Vergleich zu herkömmlichen Gasbrennwertkesseln einen deutlich geringeren fossilen Brennstoffbedarf aufweisen.	Maximales technisches Potenzial: 66 Mio. t CO_2 Herleitung: siehe Gas-Brennwertkessel & Jahresnutzungsgrad von 158 % /REC-01 16/ *Zukunftsfähigkeit*: siehe Gas-Brennwertkessel Lebensdauer: 15 Jahre
Gasadsorptions-wärmepumpe + konv. Methan	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch gasbetriebene Adsorptions-wärmepumpen, welche im Vergleich zu herkömmlichen Gasbrennwertkesseln einen deutlich geringeren fossilen Brennstoffbedarf aufweisen.	Maximales technisches Potenzial: 64 Mio. t CO_2 Herleitung: siehe Gas-Brennwertkessel & Jahresnutzungsgrad von 152 % /REC-01 16/ *Zukunftsfähigkeit*: siehe Gas-Brennwertkessel Lebensdauer: 15 Jahre
Gasmotor-wärmepumpe + konv. Methan	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch Gasmotorwärmepumpen. Diese weisen im Vergleich zu herkömmlichen Gasbrennwertkesseln einen deutlich geringeren fossilen Brennstoffbedarf auf.	Maximales technisches Potenzial: 71 Mio. t CO_2 Herleitung: siehe Gas-Brennwertkessel & Jahresnutzungsgrad von 170 % /REC-01 16/ Zukunftsfähigkeit: siehe Gas-Brennwertkessel Lebensdauer: 15 Jahre

Brennstoffzelle + konv. Methan	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch gasbetriebene Brennstoffzellen. Erdgas kann aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehalts emissionsärmer in Strom und Wärme umgesetzt werden als Heizöl in Wärme.	Maximales technisches Potenzial: 19 Mio. t CO_2 Herleitung: siehe Gas-Brennwertkessel & thermischer Wirkungsgrad 43 %; elektrischer Wirkungsgrad 47 % nach /REC-01 16/; Allokation der Emissionen nach IEA-Methode Zukunftsfähigkeit: siehe Gas-Brennwertkessel Lebensdauer: 15 Jahre
Stirlingmotor + konv. Methan	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch gasbetriebene Stirlingmotoren. Erdgas kann aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehalts emissionsärmer in Strom und Wärme umgesetzt werden als Heizöl in Wärme.	Maximales technisches Potenzial: 12 Mio. t CO_2 Herleitung: siehe Gas-Brennwertkessel & Allokation der Emissionen nach IEA-Methode Zukunftsfähigkeit: siehe Gas-Brennwertkessel Lebensdauer: 15 Jahre
Ottomotor + konv. Methan	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch gasbetriebene Ottomotoren. Erdgas kann aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehalts emissionsärmer in Strom und Wärme umgesetzt werden als Heizöl in Wärme.	Maximales technisches Potenzial: 19 Mio. t CO_2 Herleitung: siehe Gas-Brennwertkessel & Allokation der Emissionen nach IEA-Methode Zukunftsfähigkeit: siehe Gas-Brennwertkessel Lebensdauer: 15 Jahre
Öl- und Gaskessel + erneuerbarer Brennstoff	Bestehende Öl- bzw. Gaskessel können potenziell mit erneuerbaren Brennstoffen betrieben werden, welche aus Biomasse und oder Strom hergestellt werden.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: der verwendete Strom bzw. der dafür verwendete Brennstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt (Annahme)
Gasabsorptions-wärmepumpe + erneuerbarer Brennstoff	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch Gasabsorptionswärmepumpen in Kombination mit erneuerbaren Brennstoffen.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: der verwendete Strom bzw. der dafür verwendete Brennstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt (Annahme)
Gasadsorptions-wärmepumpe + erneuerbarer Brennstoff	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch Gasadsorptionswärmepumpen in Kombination mit erneuerbaren Brennstoffen.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: der verwendete Strom bzw. der dafür verwendete Brennstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt (Annahme)
Gasmotorwärme-pumpe + erneuerbarer Brennstoff	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch Gasmotorwärmepumpen in Kombination mit erneuerbaren Brennstoffen.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: der verwendete Strom bzw. der dafür verwendete Brennstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt (Annahme)
Brennstoffzelle + erneuerbarer Brennstoff	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch Gasmotorwärmepumpen in Kombination mit erneuerbaren Brennstoffen.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: der verwendete Strom bzw. der dafür verwendete Brennstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt (Annahme)
Stirlingmotor + erneuerbarer Brennstoff	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch Stirlingmotor in Kombination mit erneuerbaren Brennstoffen.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: der verwendete Strom bzw. der dafür verwendete Brennstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt (Annahme)
Verbrennungs-motor + erneuerbarer Brennstoff	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch Ottomotoren, welche mit erneuerbaren Brennstoffen betrieben werden.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: der verwendete Strom bzw. der dafür verwendete Brennstoff wird CO_2-neutral bereitgestellt (Annahme)

Heizstab als Ergänzung + erneuerbarer Strom	Erweiterung bestehender Heizsysteme um Heizstäbe in Kombination mit Strom aus Erneuerbaren Energien.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: Einsatz potenziell in allen Gebäuden möglich; Höhe der Emissionen von Strommix abhängig; bei 100 % EE-Strom können die gesamten energiebedingten CO_2-Emissionen vermieden werden.
Luftwärmepumpe + erneuerbarer Strom	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch Luftwärmepumpen in Kombination mit Strom aus Erneuerbaren Energien.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: Siehe Heizstab + EE-Strom
Erdwärmepumpe + erneuerbarer Strom	Ersatz bestehender Wärmeerzeuger durch Erdwärmepumpen in Kombination mit Strom aus Erneuerbaren Energien.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: Einbringung von Erdwärmesonden und -kollektoren aus technischer Sicht an jedem Standort möglich; aufgrund höherer Quelltemperatur im Vergleich zu Luftwärmepumpen weisen Erdwärmepumpen höhere Arbeitszahlen auf.
Anschluss an Fernwärme-versorgung + erneuerbare Fernwärme	Anschluss an die Nah-/ Fernwärmeversorgung und Ersatz des bestehenden Wärmeerzeugers durch einen Wärmetauscher in Kombination mit Erneuerbaren Energien.	Maximales technisches Potenzial: 130 Mio. t CO_2 Herleitung: Anhand von Fernwärmenetzen können aus technischen Gesichtspunkten hypothetisch alle Gebäude in Deutschland erschlossen werden. Wird Fernwärme ausschließlich mittels Erneuerbarer Energien bereitgestellt können alle energiebedingten Emissionen der Anwendung vermieden werden.
Hocheffizienz-pumpen	Ersatz ungeregelter Umwälzpumpen durch Hocheffizienzpumpen. Während ungeregelte Umwälzpumpen durch-gehend mit konstanter Leistung betrieben werden, können Hocheffizienzpumpen ihre Pumpleistung an den hydraulisch erforderlichen Bedarf anpassen und somit den Strombedarf von Wärmebereit-stellungsanlagen signifikant reduzieren.	Maximales technisches Potenzial: 2 Mio. t CO_2 Herleitung: Das Emissionsverminderungspotenzial wurde /UBA-05 12/ entnommen.
Dämmung (Rohrleitungen, Wärmespeicher)	Die Dämmung des Verteilsystems bzw. von Wärmespeichern kann den Einsatz fossiler Brennstoffe reduzieren.	Maximales technisches Potenzial: 5 Mio. t CO_2 Anzahl Gebäude rund 19 Mio. nach /FFE-04 12/ durchschnittliche Länge von Rohrleitungen in unbeheizten Räumen: 22,5 m /RAU-01 14 /; davon ungedämmt (inkl. Armaturen): 25 % (Annahme); anhand von lückenloser Dämmung (150 % des Rohrduchmessers) /RAU-01 14/ kann ein Einsparpotenzial von 23 TWh/a berechnet werden
Wärmerück-gewinnung	Der Einsatz von Wärmerückgewinnungs-anlagen kann den Wärmebedarf und somit auch den Einsatz fossiler Brennstoffe reduzieren.	Maximales technisches Potenzial: 12 Mio. t CO_2 Herleitung: Wohnfläche 3.4 Mrd. m^2 nach /FFE-04 12/; durchschnittliche Raumhöhe: 2,5 m (Annahme); Luftwechselrate 0,5 1/h nach /DIN-01 16/; Wärmerückgewinnung 18,3 kWh/m^3/a nach /UCB-01 13/; Wirkungsgrad: 75 % nach /UCB-01 13/

Reduktion von Infiltrations-verlusten	Die Behebung von Undichtigkeiten in der Gebäudehülle z. B. an Fenstern und Türen kann die Höhe der Wärmeverluste und somit den Einsatz fossiler Brennstoffe reduzieren.	Maximales technisches Potenzial: 5 Mio. t CO_2 Herleitung: Wohnfläche: 3.4 Mrd. m^2 /FFE-04 12/; durchschnittliche Raumhöhe: 2,5 m (Annahme); Luftwechselrate (normales Gebäude): 0,25 1/h /SCH-02 09/; Luftwechselrate (modernisiertes Gebäude): 0,1 1/h /SCH-02 09/; vermeidbarer Luftaustausch: 0,15 1/h (Annahme); spez. Wärmemenge: 18,3 kWh/m^3/a nach /UCB-01 13/
Flächenheizungen (Solarthermie, Wärmepumpe & Brennwertkessel)	Ersatz bestehender Wärmeübertrager durch Flächenheizungen. Diese verfügen im Vergleich zu Radiatoren und Konvektoren über eine größere Fläche zur Wärmeübertragung. Dies wirkt sich aufgrund der geringen Vorlauftemperatur positiv auf die Effizienz von Wärme-pumpen, Brennwertkesseln und solarthermischen Systemen aus.	Maximales technisches Potenzial: 2 Mio. t CO_2 Herleitung: Potenzialermittlung durch Gebäudesimulationen in Polysun; Anteil von Heizsystemen, welche von geringeren Vorlauftemperaturen profitieren (2014): rund 35 % nach /BDH-01 15/
Dämmung (Dach, Fassade, Kellerdecke, Fundament, Fenster)	Durch die Dämmung der Gebäudehülle wird der Bedarf an Raumwärme und somit der Einsatz fossiler Brennstoffe reduziert.	Maximales technisches Potenzial: 107 Mio. t CO_2 Herleitung: Werden Aspekte wie Platzverfügbarkeit vernachlässigt, kann der Raumwärmebedarf aller Gebäude in Deutschland auf 0 reduziert werden.
Automatisierungs-technik zur Raumwärme-bedarfsreduktion	Die Verringerung der Raumtemperatur bei Abwesenheit der Bewohner kann den Raumwärmebedarf und somit den Einsatz fossiler Brennstoffe reduzieren. Die Regelung der Raumtemperatur kann sowohl an den Thermostaten als auch in Kombination mit der Heizungsregelung erfolgen.	Maximales technisches Potenzial: 23 Mio. t CO_2 Herleitung: Mittlere Reduktion des Brennstoffverbrauchs von 22 % nach /ÖKO-03 12/, /IBP-03 13/ und /HLH-01 09/.
Effizientere Kühl-/ Gefriergeräte	Durch die Umstellung der Gefriergeräte, Kühlschränke und Kühl-Gefrierkombis auf eine höhere Energieeffizienzklasse werden der Bedarf an elektrischer Energie und somit die mit dem Strombezug verbundenen Emissionen reduziert.	Maximales technisches Potenzial: 4 Mio. t CO_2/a Herleitung: Anzahl der Gerätetypen und Anteil der Effizienzklassen am Gesamtbestand im Jahr 2014 sowie Stromverbrauch nach Effizienzklassen gemäß /UBA-01 17/ Berechnung der prozentualen Einsparung bei Umstellung des Bestandes 2014 auf mindestens Energieeffizienzklasse A++ Einsparung: Gefriergeräte = 2,2 TWhel/a, Kühlschränke und Kühl-Gefrierkombis = 4,9 TWhel/a Emissionsfaktor Strommix 2014: 537 g/kWhel

Effizientere weiße Geräte	Durch die Umstellung der Waschmaschinen, Waschtrockner, Wäschetrockner und Geschirrspüler auf eine höhere Energieeffizienzklasse werden der Bedarf an elektrischer Energie und somit die mit dem Strombezug verbundenen Emissionen reduziert.	Maximales technisches Potenzial: 2 Mio. t CO_2/a Herleitung: Anzahl der Gerätetypen und Anteil der Effizienzklassen am Gesamtbestand im Jahr 2014 sowie Stromverbrauch nach Effizienzklassen gemäß /UBA-01 17/ Berechnung der prozentualen Einsparung bei Umstellung des Bestandes 2014 auf mindestens Energieeffizienzklasse A++ Einsparung: Waschmaschinen = 1,1 TWhel/a, Waschtrockner und Wäschetrockner = 1,6 TWhel/a, Geschirrspüler = 1,4 TWhel/a Emissionsfaktor Strommix 2014: 537 g/kWhel
Effizientere Elektrokochherde	Durch die Umstellung auf Elektroherde mit Induktionskochfeldern und Backkomponenten mit einer höheren Energieeffizienzklasse werden der Bedarf an elektrischer Energie und somit die mit dem Strombezug verbundenen Emissionen reduziert.	Maximales technisches Potenzial: 1 Mio. t CO_2/a Herleitung: Stromverbrauch Elektroherde im Jahr 2014 nach /UBA-01 17/: 11,5 TWhel/a Anzahl Elektroherde: 32,2 Mio. im 2011 /BMWI-01 14/; Annahme: gleiche Anzahl in 2014 Spezifischer Verbrauch nach /UBA-01 17/: Induktionskochfelder = 175 kWh/Gerät*a, Backkomponente der Effizienzklasse A = 120 kWh/Gerät*a Einsparung durch Umstellung aller Elektroherde auf Induktionskochfelder und Backkomponente Klasse A: 2 TWhel/a Emissionsfaktor Strommix 2014: 537 g/kWhel
Effizientere Beleuchtung	Durch die Umstellung auf LED-Lampen mit einer höheren Lichtausbeute werden der Bedarf an elektrischer Energie und somit die mit dem Strombezug verbundenen Emissionen reduziert.	Maximales technisches Potenzial: 1 Mio. t CO_2/a Herleitung: Stromverbrauch für Beleuchtung im Jahr 2014 nach /UBA-01 17/: 7,7 TWhel Anzahl Lampentypen im Jahr 2014 und jeweilige Lichtausbeute (in Lumen pro Watt) nach /UBA-01 17/ Einsparung durch Umstellung aller Lampen auf LED bei gleichem Lichtstrom (in Lumen): 2,4 TWhel Emissionsfaktor Strommix 2014: 537 g/kWhel
Effizientere Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)	Durch die Senkung des Stromverbrauchs von Fernsehgeräten und Computern werden der Bedarf an elektrischer Energie und somit die mit dem Strombezug verbundenen Emissionen reduziert.	Maximales technisches Potenzial: 4 Mio. t CO_2/a Herleitung: Stromverbrauch für Fernsehgeräte und Computer im Jahr 2011 und 2014 nach /UBA-01 17/ Reduktion des mittleren spezifischen Verbrauchs bis 2050 (ggü. 2011) um 52 % für Fernsehgeräte und 51 % für Computer /BMWI-01 14/ Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 7 TWhel Emissionsfaktor Strommix 2014: 537 g/kWhel

3.3 Technoökonomische Parameter

Tabelle 3-3: Fixe Betriebskosten

Technologie	Fixe Betriebskosten in %/a	Quelle(n)	Seite(n)
Ölniedertemperaturkessel	3,5	/VDI-06 13/	22
Ölbrennwertkessel	3,5	/VDI-06 13/	22
Gasniedertemperaturkessel	2,5	/VDI-06 13/	22
Gasbrennwertkessel	2,5	/VDI-06 13/	22
Blockheizkraftwerk	8,0	/VDI-06 13/	22
Luftwärmepumpe	2,5	/VDI-06 13/	22
Erdwärmepumpe	2,5	/VDI-06 13/	22
Gaswärmepumpe	4,5	/VDI-06 13/	22
Elektrospeicherheizung	3,0	/VDI-06 13/	22
Fernwärme	3,0	/VDI-06 13/	23
Pelletkessel	6,0	/VDI-06 13/	22
Heizstab	0	Annahme	-
Solarthermie	1,5	/VDI-06 13/	23
Wärmerückgewinnung	7,5	/VDI-06 13/	23

Tabelle 3-4: Investition

Kostenbestandteil						
Anpassung Schornstein	$Inv = F * (15{,}1 * P + 1108) * deg$ $P = Nennleistung\ in\ kW$ $F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$ $deg = Kostendegression$ Quelle Entwicklung: Annahme: keine Kostenreduktion möglich Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ Seite 61					
		2015	2020	2030	2040	2050
	deg in %	100	100	100	100	100
Gasbrenn-wertkessel	$Inv = F * P * (1464 * P^{-0{,}4411}) * deg$ $P = Nennleistung\ in\ kW$ $F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$ $deg = Kostendegression$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451 Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61					
		2015	2020	2030	2040	2050
	deg in %	100	99	96	93	90
Gaswärme-	$Inv = P * 1672 \frac{€}{kW_{th}} * deg$ $P = Nennleistung\ in\ kW$ $deg = Kostendegression$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 452 Quelle Startjahr: /IWES-01 15/ S. 43, /ISE-02 15/ S. 81					

pumpe[1]		2015	2020	2030	2040	2050
	deg in %	100	94	83	71	60
Ölbrennwertkessel	$Inv = F * P * (1851 * P^{-0,4617}) * deg$ $P = Nennleistung\ in\ kW$ $F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$ $deg = Kostendegression$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451 Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61, /DENA-02 18/ S. 5					
		2015	2020	2030	2040	2050
	deg in %	100	99	96	93	90
Öltank	$Inv = \frac{q}{10} * deg$ $q = Raumwärme - und\ Warmwasserbedarf\ in\ \frac{kWh}{a}$ $deg = Kostendegression$ Quelle Entwicklung: keine Kostenreduktion möglich, da ausgereifte Technologie (Annahme) Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61					
		2015	2020	2030	2040	2050
	deg in %	100	100	100	100	100
Pelletlager	$Inv = I^*deg$ $m = \frac{WB}{i*q*1000}\ I = \frac{m}{566,667}$ $WB = Wärmebedarf\ in\ \frac{kWh}{a}$ $i = Anzahl\ Befüllungen\ pro\ Jahr$ $q = spezifische\ Energiedichte\ in\ kWh/kg$ $m = Größe\ Pelletlager\ in\ t$ $I = Investition\ in\ €$ $deg = Kostendegression$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451 Quelle Startjahr: /DOELL-01 18/, /GUENT-01 18/, /FRAHM-01 18/, /HSW-01 11/ S. 61					
		2015	2020	2030	2040	2050
	deg in %	100	99	96	93	90
Biomassekessel	$Inv = F * P * (6786 * P^{-0,6305}) * deg$ $P = Nennleistung\ in\ kW$ $F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$ $deg = Kostendegression$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451 Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61					
		2015	2020	2030	2040	2050
	deg in %	100	97	91	86	80
Fernwärme-Anschluss	$Inv = F * P * (1961 * P^{-0,6781}) * deg$ $P = Nennleistung\ in\ kW$ $F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$ $deg = Kostendegression$ Quelle Entwicklung: Nach /DENA-02 18/ S. 452 keine Kostenreduktion Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61					
Blockheizkraftwerk (1-10kW)	$Inv = 9585 * P^{-0,542} * deg$ $P = Nennleistung\ BHKW\ in\ kW$ $deg = Kostendegression$ Quelle Entwicklung: keine Kostenreduktion möglich, da ausgereifte Technologie (Annahme) Quelle Startjahr:/ASUE-01 14/ S. 11					

Blockheizkraftwerk (10-100kW)	$$Inv = 5438 * P^{-0,351} * deg$$ $$P = Nennleistung\ BHKW\ in\ kW$$ $$deg = Kostendegression$$ Quelle Entwicklung: keine Kostenreduktion möglich, da ausgereifte Technologie (Annahme) Quelle Startjahr:/ASUE-01 14/ S. 11
Blockheizkraftwerk (>100kW)	$$Inv = 4907 * P^{-0,352} * deg$$ $$P = Nennleistung\ BHKW\ in\ kW$$ $$deg = Kostendegression$$ Quelle Entwicklung: keine Kostenreduktion möglich, da ausgereifte Technologie (Annahme) Quelle Startjahr:/ASUE-01 14/ S. 11
Gasanschluss	$$Inv = F * (18,1 * P + 9043) * deg$$ $$P = Nennleistung\ Gasspitzenlast\ in\ kW$$ $$F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$$ $$deg = Kostendegression$$ Quelle Entwicklung: Nach /DENA-02 18/ S. 452 keine Kostenreduktion Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61
Solarthermie-kollektor	$$Inv = (A * 500) + (A * 500) * \frac{1}{(1 - 0,25) * 0,25} * deg$$ $$A = Solarthermie\ Größe\ in\ m^2$$ $$deg = Kostendegression$$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451 Quelle Startjahr: eigene Kostenfunktion

	2015	2020	2030	2040	2050
deg in %	100	98	94	89	85

Kombi-Speicher	$$Inv = 2 * V * \left(3,126 * e^{-0,00114 * V} + 0,7402 * e^{-2,22 * 10^{-6} * V}\right) * deg$$ $$V = Speichergröße\ in\ l$$ $$deg = Kostendegression$$ Quelle Entwicklung: /UBA-21 16/ S. 80 Quelle Startjahr: Kostenfunktion nach /FFE-45 17/

	2015	2020	2030	2040	2050
deg in %	100	94	83	71	60

Installation Elektrospeicher-heizung	$$Inv = F * 800 \frac{€}{Wohnung}$$ $$F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$$ $$deg = Kostendegression$$ Quelle Entwicklung: keine Kostenreduktion möglich, da ausgereifte Technologie (Annahme) Quelle Startjahr: /HERBE-01 17/ S. 8
elektrischer Durchlauferhitzer	$$Inv = 322 * \frac{€}{Wohnung}$$ $$deg = Kostendegression$$ Quelle Entwicklung: keine Kostenreduktion möglich, da ausgereifte Technologie (Annahme) Quelle Startjahr: /SWT-01 15/ S. 4

[1] Mittelwert der genannten Quellen

Elektrospeicher-heizung

$$Inv = F * P * \frac{2750}{9}$$

$$P = Nennleistung\ in\ kW$$

$$F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$$

$$deg = Kostendegression$$

Quelle Entwicklung: keine Kostenreduktion möglich, da ausgereifte Technologie (Annahme)

Quelle Startjahr: /HERBE-01 17/ S. 8

Heizstab

$$Inv = 129 * P^{-0,79}$$

$$P = Nennleistung\ in\ kW$$

$$deg = Kostendegression$$

Quelle Entwicklung: keine Kostenreduktion möglich, da ausgereifte Technologie (Annahme)

Quelle Startjahr: eigene Kostenfunktion

Luftwärmepumpe (<50kW)

$$Inv = F * P * (5706 * P^{-0,4779}) * deg$$

$$P = Nennleistung\ in\ kW$$

$$F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$$

Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 452

Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61

	2015	2020	2030	2040	2050
deg in %	100	98	94	89%	85%

Luftwärmepumpe (>50kW)

$$Inv = F * P * (5706 * P^{-0,4779}) * deg$$

$$P = Nennleistung\ in\ kW$$

$$F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$$

$$deg = Kostendegression$$

Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 452

Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61

	2015	2020	2030	2040	2050
deg in %	100	98	94	89	85

Erdwärmepumpe (<100kW)

$$Inv = F * P * (3577 * P^{-0,4085}) * deg$$

$$P = Nennleistung\ in\ kW$$

$$F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$$

$$deg = Kostendegression$$

Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 452

Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61

	2015	2020	2030	2040	2050
deg in %	100	97	91	86	80

Erdwärmepumpe (>100kW)

$$Inv = F * P * (3577 * 100^{-0,4085}) * deg$$

$$P = Nennleistung\ in\ kW$$

$$F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$$

$$deg = Kostendegression$$

Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 452

Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61

	2015	2020	2030	2040	2050
deg in %	100	97	91	86	80

Sondenverlegung

$$Inv = F * (P * 900 + 1080)$$

$$P = Nennleistung\ in\ kW$$

$$F = Faktor\ für\ Inflationsbereinigung$$

$$deg = Kostendegression$$

Quelle Entwicklung: keine Kostenreduktion möglich, da ausgereifte Technologie (Annahme)

Quelle Startjahr: /HSW-01 11/ S. 61

<table>
<tr><td>Pufferspeicher</td><td>$$Inv = (104 + 10 * P) * \left(2{,}556 * e^{-0{,}00248*(104+10*P)} + 0{,}738 * e^{-1{,}38*10^{-5}*(104+10*P)}\right) * deg$$
$$P = Nennleistung\ in\ kW$$
$$deg = Kostendegression$$
Quelle Entwicklung: eigene Annahme
Quelle Startjahr: Kostenfunktion nach /FFE-45 17/
<table><tr><th></th><th>2015</th><th>2020</th><th>2030</th><th>2040</th><th>2050</th></tr><tr><td>deg in %</td><td>100</td><td>99</td><td>96</td><td>93</td><td>90</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>Warmwasser-speicher</td><td>$$Inv = V * \left(41{,}9 * e^{-0{,}02406*V} + 2{,}551 * e^{-8{,}459*10^{-5}*V}\right) * deg$$
$$V = Warmwasser - Speichervolumen\ in\ l$$
$$deg = Kostendegression$$
Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 400
Quelle Startjahr: Kostenfunktion nach /FFE-45 17/
<table><tr><th></th><th>2015</th><th>2020</th><th>2030</th><th>2040</th><th>2050</th></tr><tr><td>deg in %</td><td>100</td><td>99</td><td>96</td><td>93</td><td>90</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>dezentrale Wärmerück-gewinnung</td><td>$$Inv = A * (838 * A^{-0{,}652})$$
$$A = Wohnfläche\ in\ m^2$$
$$deg = Kostendegression$$
Quelle Entwicklung: keine Kostenreduktion möglich, da ausgereifte Technologie (Annahme)
Quelle Startjahr: /IWU-02 15/ S. 60</td></tr>
</table>

Tabelle 3-5: Nutzungsdauer

Technologie	Nutzungs-dauer	Quelle(n)	Seite(n)
Ölniedertemperatur-kessel	30	FFE Berechnungen aufbauend auf /ZIV-01 09/, /ZIV-01 13/, /ZIV-01 15/ und /ZIV-01 16/	
Ölbrennwertkessel	30	FFE Berechnungen aufbauend auf /ZIV-01 09/, /ZIV-01 13/, /ZIV-01 15/ und /ZIV-01 16/	
Gasniedertemperatur-kessel	30	FFE Berechnungen aufbauend auf /ZIV-01 09/, /ZIV-01 13/, /ZIV-01 15/ und /ZIV-01 16/	
Gasbrennwertkessel	30	FFE Berechnungen aufbauend auf /ZIV-01 09/, /ZIV-01 13/, /ZIV-01 15/ und /ZIV-01 16/	
Blockheizkraftwerk[2]	15	/VDI-06 13/	22
Luftwärmepumpe[3]	18	/VDI-06 13/	22
Erdwärmepumpe[3]	20	/VDI-06 13/	22
Gaswärmepumpe[3]	15	/VDI-06 13/	22
Elektrospeicherheizung[4]	20	/VDI-06 13/	22
Pelletkessel	15	/VDI-06 13/	22
Heizstab	20	Annahme	
Solarthermieanlage	25	/BFRW-01 17/	4

Tabelle 3-6: Nutzungsgrad thermisch

Technologie						
Gasnieder-temperaturkessel	$\eta_{th} = 89\% \cdot es$ $es = Effizienzsteigerung$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451 Quellen Startjahr: /REC-01 17/ S. 1370, /CYP-01 10/ S. 73, /DENA-02 18/ S. 451					
		2015	2020	2030	2040	2050
	es in %	100	100	100	100	100
Gasbrenn-wertkessel	$\eta_{th} = 98\%$ Quelle Entwicklung: Nach /DENA-02 18/ S. 451 keine Effizienzsteigerung Quellen Startjahr: /DEB-01 03/ S. 8, /DENA-02 18/ S. 451, /ECOINV-01 14/					

[2] Bestätigung durch Expertenschätzung der FFE GmbH

[3] Bestätigt durch Hersteller u.a. https://www.stiebel-eltron.de/de/home/service/haeufige-fragen/wie-hoch-ist-die-lebensdauer-einer-waermepumpe-.html und https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/darum-waermepumpe/experten/fragen-sie-die-experten/antwort-der-experten/wie-hoch-ist-die-lebensdauer-einer-waermepumpe-wie-kann-ich-diese-erhoehen/

[4] 30 a bei https://www.welt.de/welt_print/wirtschaft/article5282748/Nachtspeicherheizung-passe.html

<table>
<tr><td>Gaswärmepumpe</td><td>$\eta_{th} = 139\% \cdot es$
$es = Effizienzsteigerung$
Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451
Quellen Startjahr: /DENA-02 18/ S 451, /ASUE-01 02/
<table><tr><th></th><th>2015</th><th>2020</th><th>2030</th><th>2040</th><th>2050</th></tr><tr><td>es in %</td><td>100</td><td>103</td><td>109</td><td>114</td><td>120</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>Ölnieder-temperaturkessel</td><td>$\eta_{th} = 89\%$
Quelle Entwicklung: Nach /DENA-02 18/ S. 451 keine Effizienzsteigerung
Quellen Startjahr: /REC-01 16/ S .1370, /DEHLI-01 10/ S. 1, /CYP-01 10/ S. 73, /DENA-02 18/ S. 451</td></tr>
<tr><td>Ölbrennwertkessel</td><td>$\eta_{th} = 97\%$
Quelle Entwicklung: Nach /DENA-02 18/ S. 451 keine Effizienzsteigerung
Quellen Startjahr: /DEB-01 03/ S. 8, /DENA-02 18/ S .451, /ECOINV-01 14/</td></tr>
<tr><td>Pelletkessel</td><td>$\eta_{th} = 86\% \cdot es$
$es = Effizienzsteigerung$
Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451
Quellen Startjahr: /ECOFYS-02 11/ S 14, /DENA-02 18/ S.451, /ECOINV-01 14/
<table><tr><th></th><th>2015</th><th>2020</th><th>2030</th><th>2040</th><th>2050</th></tr><tr><td>es in %</td><td>100</td><td>101</td><td>104</td><td>107</td><td>110</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>Blockheizkraftwerk</td><td>$\eta_{th} = 0{,}9 - \frac{21{,}79 * P^{0{,}108}}{100}$
$P = elektrische\ Nennleistung\ in\ kW$
Quelle Entwicklung: Effizienzsteigerung bezieht sich auf elektrischen Nutzungsgrad
Quelle Startjahr: /ASUE-01 14/ S. 7</td></tr>
<tr><td>Elektrospeicher-heizung</td><td>$\eta_{th} = 85\%$
Quelle Entwicklung: Annahme keine Effizienzsteigerung möglich.
Quelle Startjahr: Annahme 15 % nicht nutzbare Verluste (Überschreibung der Behaglichkeitstemperatur)</td></tr>
<tr><td>Heizstab</td><td>$\eta_{th} = 100\%$
Quelle Entwicklung: Effizienzsteigerung nicht möglich.
Quelle Startjahr: Annahme</td></tr>
<tr><td>Luftwärmepumpe (Bestand)[5]</td><td>$\eta_{th} = (-0{,}0064 \cdot q + 3{,}889) \cdot es$
$q = flächenspezifischer\ Raumwärmebedarf\ in\ \frac{kWh}{m^2}$
$es = Effizienzsteigerung$
Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451
Quellen Startjahr: /ISE-07 14/, /ISE-03 10/ mehrere Seiten
<table><tr><th></th><th>2015</th><th>2020</th><th>2030</th><th>2040</th><th>2050</th></tr><tr><td>es in %</td><td>100</td><td>102</td><td>105</td><td>109</td><td>112</td></tr></table></td></tr>
</table>

[5] Eigene Berechnung der JAZ aufbauend auf diesen Quellen. Berücksichtigung der Abhängigkeit der JAZ von der Vorlauftemperatur.

Luftwärmepumpe (Neubau)	$$\eta_{th} = (-0{,}0064 \cdot q + 3{,}889) \cdot es$$ $$q = flächenspezifischer\ Raumwärmebedarf\ in\ \frac{kWh}{m^2}$$ $$es = Effizienzsteigerung$$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451 Quellen Startjahr: /ISE-07 14/, /ISE-03 10/ mehrere Seiten

	2015	2020	2030	2040	2050
es in %	100	103	109	114	120

Erdwärmepumpe (Bestand)	$$\eta_{th} = (-0{,}0084 \cdot q + 4{,}577) \cdot es$$ $$q = Flächenspezifischer\ Raumwärmebedarf\ in\ \frac{kWh}{m^2}$$ $$es = Effizienzsteigerung$$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451 Quellen Startjahr: /ISE-07 14/, /ISE-03 10/ mehrere Seiten

	2015	2020	2030	2040	2050
es in %	100	102	105	109	112

Erdwärmepumpe (Neubau)	$$\eta_{th} = (-0{,}0084 \cdot q + 4{,}577) \cdot es$$ $$q = Flächenspezifischer\ Raumwärmebedarf\ in\ \frac{kWh}{m^2}$$ $$es = Effizienzsteigerung$$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451 Quellen Startjahr: /ISE-07 14/, /ISE-03 10/ mehrere Seiten

	2015	2020	2030	2040	2050
es in %	100	103	109	114	120

Tabelle 3-7: Nutzungsgrad elektrisch

Technologie	
Blockheiz-kraftwerk	$$\eta_{el}(P < 10kW) = \frac{21{,}79 * P^{0{,}108}}{100} \cdot es$$ $$\eta_{el}(P \geq 10kW) = \frac{22{,}56 * P^{0{,}130}}{100} \cdot es$$ $$P = elektrische\ Nennleistung\ in\ kW$$ $$es = Effizienzsteigerung$$ Quelle Entwicklung: /DENA-02 18/ S. 451 Quelle Startjahr:/ASUE-01 14/ S. 7

	2015	2020	2030	2040	2050
es in %	100	101	103	105	107

3.4 Gebäudemodell

Tabelle 3-8: Gebäudemodell

Gebäudetyp	Baualter	Sanierungs-zustand	Anzahl an Wohnein-heiten im Jahr 2015 in Mio.	Anzahl an Gebäuden im Jahr 2015 in Mio.	Raumwärme-bedarf pro Gebäude in kWh/a	Warmwasser-bedarf pro Gebäude in kWh/a
Ein- und Zweifamilienhaeuser	< 1979	unsaniert	5,37	4,37	19.000	2.200
Ein- und Zweifamilienhaeuser	< 1979	teilsaniert	5,82	4,73	18.600	2.200
Ein- und Zweifamilienhaeuser	< 1979	vollsaniert	0,00	0,00	9.800	2.200
Ein- und Zweifamilienhaeuser	1979 - 1994	unsaniert	2,11	1,79	15.000	2.400
Ein- und Zweifamilienhaeuser	1979 - 1994	teilsaniert	1,24	1,05	14.300	2.400
Ein- und Zweifamilienhaeuser	1979 - 1994	vollsaniert	0,00	0,00	9.900	2.400
Ein- und Zweifamilienhaeuser	1995 - 2020	unsaniert	3,43	3,03	10.600	2.500
Mehrfamilienhaeuser (3 -6 Wohneinheiten)	< 1979	unsaniert	3,13	0,76	37.000	5.600
Mehrfamilienhaeuser (3 -6 Wohneinheiten)	< 1979	teilsaniert	3,39	0,83	33.500	5.600
Mehrfamilienhaeuser (3 -6 Wohneinheiten)	< 1979	vollsaniert	0,00	0,00	19.500	5.600
Mehrfamilienhaeuser (3 -6 Wohneinheiten)	1979 - 1994	unsaniert	0,70	0,18	29.300	6.000
Mehrfamilienhaeuser (3 -6 Wohneinheiten)	1979 - 1994	teilsaniert	0,51	0,13	25.300	6.000
Mehrfamilienhaeuser (3 -6 Wohneinheiten)	1979 - 1994	vollsaniert	0,00	0,00	19.500	6.000
Mehrfamilienhaeuser (3 -6 Wohneinheiten)	1995 - 2020	unsaniert	1,31	0,33	21.500	6.300
Mehrfamilienhaeuser (7 -12 Wohneinheiten)	< 1979	unsaniert	2,44	0,28	65.900	11.600
Mehrfamilienhaeuser (7 -12 Wohneinheiten)	< 1979	teilsaniert	2,65	0,30	48.900	11.600
Mehrfamilienhaeuser (7 -12 Wohneinheiten)	< 1979	vollsaniert	0,00	0,00	30.100	11.600
Mehrfamilienhaeuser (7 -12 Wohneinheiten)	1979 - 1994	unsaniert	0,81	0,09	52.400	12.900

Mehrfamilienhaeuser (7 -12 Wohneinheiten)	1979 - 1994	teilsaniert	0,59	0,07	36.500	12.900
Mehrfamilienhaeuser (7 -12 Wohneinheiten)	1979 - 1994	vollsaniert	0,00	0,00	30.800	12.900
Mehrfamilienhaeuser (7 -12 Wohneinheiten)	1995 - 2020	unsaniert	1,05	0,12	37.100	12.500
Mehrfamilienhaeuser (> 12 Wohneinheiten)	< 1979	unsaniert	1,46	0,06	143.100	27.900
Mehrfamilienhaeuser (> 12 Wohneinheiten)	< 1979	teilsaniert	1,59	0,07	102.600	27.900
Mehrfamilienhaeuser (> 12 Wohneinheiten)	< 1979	vollsaniert	0,00	0,00	66.500	27.900
Mehrfamilienhaeuser (> 12 Wohneinheiten)	1979 - 1994	unsaniert	0,59	0,03	117.800	28.600
Mehrfamilienhaeuser (> 12 Wohneinheiten)	1979 - 1994	teilsaniert	0,43	0,02	84.300	28.600
Mehrfamilienhaeuser (> 12 Wohneinheiten)	1979 - 1994	vollsaniert	0,00	0,00	66.900	28.600
Mehrfamilienhaeuser (> 12 Wohneinheiten)	1995 - 2020	unsaniert	0,76	0,03	79.100	22.800

4 Industrie

4.1 Potenzialanalyse Ergebnisse - Prozesse

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Potenzialanalyse der CO_2-Verminderungsmaßnahmen prozessspezifischer Energieeffizienzmaßnahmen im Industriesektor (Teil 1)

	Kurzbezeichnung der Maßnahme**	Energiebedingte CO2-Emissionen der Prozesse in 2014	Min. CO2-Emissionen der Prozesse bei Umsetzung des techn. Maßnahmenpotenzials	Max. techn. CO2-Verminderungspotenzial der Maßnahme ggü. 2014	Anteil an Emissionen der Prozesse (2014)	Anteil an Gesamtemissionen in 2014	Technologiereife	Zukunftsfähigkeit	Auswirkung auf den Strombedarf
		Mio. t CO_2	Mio. t CO_2	Mio. t CO_2	%	%	TRL	ja/ nein	+/o/-
K1	**Sekundärstahlerzeugung**								
1	Stromerzeugung aus Abwärme	5	5	0.161	3 %	<0,1%	9	ja	.
2	Umstellung bzw. Aufrüstung der Pfannenfeuer	5	5	0.001	0 %	<0,1%	9	ja	.
3	Schrottvorwärmung	5	4	0.643	13 %	0.1 %	9	ja	.
4	Prozessoptimierung	5	5	0.289	6 %	<0,1%	9	ja	.
K2	**Primärstahlerzeugung**								
5	Optimierung Wärmetauscherlösung für Winderhitzer	50	50	0.035	0.1 %	<0,1%	9	ja	0
6	Gichtgasentspannungsturbine	50	50	0.148	0.3 %	<0,1%	9	ja	-
7	Gichtgasrückführung	50	47	2.934	6 %	0.4 %	9	ja	0
8	Optimierung Sinter-Pellet-Verhältnis	50	46	3.270	7 %	0.4 %	9	ja	0
9	Einblasung von wasserstoffreichen Reduktionsmitteln	50	48	1.940	4 %	0.3 %	9	ja	0
10	Konvertergasrecycling	50	49	0.545	1 %	0.1 %	9	ja	0
11	Stromerzeugung aus Abwärme	50	50	0.113	0.2 %	<0,1%	9	ja	-
K3	**Zementherstellung**								
12	Ersatz von Kugelmühlen (Rohmaterialaufb.)	10	10	0.087	1 %	<0,1%	9	ja	-
13	Ersatz Transportsysteme (Rohmaterialaufb.)	10	10	0.024	0 %	<0,1%	9	ja	-
14	Homogenisierung mittels Schwerkraft (Rohmaterialaufb.)	10	10	0.022	0 %	<0,1%	9	ja	-
15	Wärmerückgewinnung (ORC) (Brennen)	10	10	0.049	0 %	<0,1%	9	ja	-
16	Optimierte Prozessteuerung (Brennen)	10	10	0.058	1 %	<0,1%	9	ja	-
17	Retrofit Vorcalcinatoren (Brennen)	10	10	0.608	6 %	0.1 %	9	ja	0
18	Ersatz Lepolöfen (Brennen)	10	10	0.217	2 %	<0,1%	9	ja	0
19	Ersatz Drehkühler/ Satellitenkühler (Zementmahlen)	10	10	0.077	1 %	<0,1%	9	ja	-
20	Modernisierung Rostkühler (Zementmahlen)	10	10	0.009	0 %	<0,1%	9	ja	-
21	Retrofit von Zyklonen (Brennen)	10	10	0.020	0 %	<0,1%	9	ja	0
22	Ersatz Kugelmühlen (Zementmahlen)	10	10	0.263	3 %	<0,1%	9	ja	-
23	Retrofit hocheffiziente Separatoren (Zementmahlen)	10	10	0.045	0 %	<0,1%	9	ja	-
K4	**Kalkherstellung**								
24	Effizienteres Ofendesign	3	2	0.363	13 %	<0,1%	9	ja	-
25	Ersatz bestehender Mühlen (Kalkmahlen)	3	3	0.164	6 %	<0,1%	9	ja	-
K6	**Papiergewerbe**								
26	Schwarzlaugevergasung (Sulfatverfahren)	21	21	0.283	1 %	<0,1%	9	ja	0
27	Hochkonsistenzstoffauflösung (Altpapierstoff)	21	21	0.039	0.2 %	<0,1%	9	ja	-
28	Effiziente Siebung (Altpapierstoff)	21	21	0.083	0.4 %	<0,1%	9	ja	-
29	Wärmerückgewinnung von der Bleiche (Altpapierstoff)	21	21	0.019	0.1 %	<0,1%	9	ja	-
30	Optimierung Deinking-Verfahren (Altpapierstoff)	21	21	0.120	1 %	<0,1%	9	ja	-
31	Effiziente Disperger (Altpapierstoff)	21	21	0.037	0.2 %	<0,1%	9	ja	-
32	Wärmerückgewinnung (TMP, GW) (Holzstoff)	21	21	0.014	0.1 %	<0,1%	9	ja	0
33	Hocheffizientes Mahlen (GW) (Holzstoff)	21	21	0.278	1 %	<0,1%	9	ja	-
34	Enzymatische Vorbehandlung (Holzstoff)	21	21	0.086	0.4 %	<0,1%	9	ja	-
35	Effiziente Refiner (z.B. RTS), (Holzstoff)	21	21	0.066	0.3 %	<0,1%	9	ja	-
36	Effizientere Refiner (Papiermaschine)	21	21	0.405	2 %	0.1 %	9	ja	-
37	Optimierung Refiner (Papiermaschine)	21	21	0.188	1 %	<0,1%	9	ja	-
38	Chemische Fasermodifikation (Papiermaschine)	21	20	0.814	4 %	0.1 %	9	ja	-
39	Dampfblaskasten (Papiermaschine)	21	21	0.079	0.4 %	<0,1%	9	ja	0
40	Einsatz von Schuhpressen (Papiermaschine)	21	21	0.285	1 %	<0,1%	9	ja	-
41	Neue Trocknungsverfahren (Papiermaschine)	21	20	0.800	4 %	0.1 %	9	ja	0
42	Wärmerückgewinnung / Abwärmenutzung (Papiermaschine)	21	20	0.652	3 %	0.1 %	9	ja	0

Tabelle 4-2. Ergebnisse der Potenzialanalyse der CO_2-Verminderungsmaßnahmen prozessspezifischer Energieeffizienzmaßnahmen im Industriesektor (Teil 2)

	Kurzbezeichnung der Maßnahme**	Energiebedingte CO2-Emissionen der Prozesse in 2014	Min. CO2-Emissionen der Prozesse bei Umsetzung des techn. Maßnahmenpotenzials	Max. techn. CO2-Verminderungspotenzial der Maßnahme ggü. 2014	Anteil an Emissionen der Prozesse (2014)	Anteil an Gesamtemissionen in 2014	Technologiereife	Zukunftsfähigkeit	Auswirkung auf den Strombedarf
		Mio. t CO_2	Mio. t CO_2	Mio. t CO_2	%	%	TRL	ja/ nein	+/o/-
K7	**Hohlglasherstellung**								
43	Gemenge und Scherbenvorwärmung (Gemenge-bereitung)	2	2	0.117	6 %	<0,1%	9	ja	-
44	Erhöhung Scherbeneinsatz (Gemenge-bereitung)	2	2	0.045	2 %	<0,1%	9	ja	-
45	Abwärmenutzung (ORC) (Schmelzen)	2	2	0.064	3 %	<0,1%	9	ja	-
46	Substitution der Rohmaterialien (Gemenge-bereitung)	2	2	0.019	1 %	<0,1%	9	ja	-
47	Optimiertes Brennerdesign (Oxy-fuel) (Schmelzen)	2	2	0.136	7 %	<0,1%	9	ja	0
K8	**Flachglasherstellung**								
48	Gemenge-und Scherben-vorwärmung (Gemenge-bereitung)	2	1	0.064	4 %	<0,1%	9	ja	-
49	Erhöhung Scherbeneinsatz (Gemenge-bereitung)	2	2	0.013	1 %	<0,1%	9	ja	-
50	Abwärmenutzung (ORC) (Schmelzen)	2	1	0.102	7 %	<0,1%	9	ja	-
51	Substitution der Rohmaterialien (Gemengebereitung)	2	2	0.016	1 %	<0,1%	9	ja	-
52	Optimiertes Brennerdesign (Oxy-fuel) (Schmelzen)	2	1	0.080	5 %	<0,1%	9	ja	0
K9	**Milchverarbeitung**								
53	Effizientere Wärmerückgewinnung (Allgemein)	2	2	0.002	0.1 %	<0,1%	9	ja	0
54	Teilhomogenisierung (Homogenisieren)	2	2	0.010	0.5 %	<0,1%	9	ja	-
55	Energieeffiziente Homogenisierung (Homogenisieren)	2	2	0.003	0.1 %	<0,1%	9	ja	-
56	Ultrahocherhitzung ohne Pasteurisierung (Wärmebehandlung)	2	2	0.082	4 %	<0,1%	9	ja	0
57	Mikrowellen- und UV-Wärmebehandlung (Wärmebehandlung)	2	2	0.099	4 %	<0,1%	9	ja	+
58	Optimierung der Reinigung (Allgemein)	2	2	0.021	1 %	<0,1%	9	ja	0
K10	**Primäraluminiumherstellung**								
59	Magnetische Kompensation (Elektrolyse)	5	5	0.325	6.4 %	<0,1%	9	ja	-
60	Wärmerückgewinnung (ORC) (Elektrolyse)	5	5	0.087	1.7 %	<0,1%	9	ja	-
61	Wärmerückgewinnung (ORC) (Anodenbacken)	5	5	0.016	0.3 %	<0,1%	9	ja	-
62	Optimierte Prozesssteuerung (Elektrolyse)	5	5	0.080	2 %	<0,1%	9	ja	-
K11	**Ammoniakherstellung**								
63	Allgemeine Maßnahmen	2	2	0.077	4 %	<0,1%	9	ja	-
64	Kleine Verbesserungen des Reformers	2	2	0.048	2.4 %	<0,1%	9	ja	-
65	Große Verbesserungen des Reformers	2	2	0.069	3.4 %	<0,1%	9	ja	-
66	Verbesserung der Synthese	2	2	0.043	2.1 %	<0,1%	9	ja	-
67	CO2-Abscheidung	2	2	0.047	2 %	<0,1%	9	ja	+
K12	**Steamcracking**								
68	Allgemeine Maßnahmen	10	10	0.067	1 %	<0,1%	9	ja	-
69	Verbesserung des Steamcrackers	10	9	1.293	13.0 %	0.2 %	9	ja	-
70	Fortgeschrittene Destillationskolonnen	10	10	0.069	0.7 %	<0,1%	9	ja	-
K13	**Methanolherstellung**								
71	Allgemeine Maßnahmen	1	1	0.028	3 %	<0,1%	9	ja	-
72	Kleine Verbesserungen des Reformers	1	1	0.017	1.8 %	<0,1%	9	ja	-
73	Große Verbesserungen des Reformers	1	1	0.025	2.6 %	<0,1%	9	ja	-
74	CO2-Abscheidung	1	1	0.017	1.8 %	<0,1%	9	ja	+
K14	**Chlorherstellung**								
75	Amalgan-verfahren zu Membranverfahren	10	9	0.529	5.5 %	0.1 %	9	ja	+
76	Wärmerückgewinnung	10	10	0.019	0.2 %	<0,1%	9	ja	0
77	Prozesskontrolle	10	10	0.057	0.6 %	<0,1%	9	ja	-
78	Membran-Elektrolyse auf Basis der SVK-Technologie (ODC)	10	9	0.318	3 %	<0,1%	9	ja	-
79	Diaphragma-Verfahren zu Membran-Elektrolyse	10	10	0.075	1 %	<0,1%	9	ja	+
80	Verbessertes Membran-Verfahren	10	9	0.278	3 %	<0,1%	9	ja	-
K14	**Polyethylenherstellung**								
81	Reaktor mit Statikmischern	1	1	0.076	5.5 %	<0,1%	9	ja	-
82	Allgemeine Maßnahmen	1	1	0.006	0.4 %	<0,1%	9	ja	-
83	Wärmerückgewinnung	1	1	0.007	0.5 %	<0,1%	9	ja	0

4.2 Potenzialanalyse Details

4.2.1 Querschnittstechnologien

Die Maßnahmen und deren Potenziale zur CO_2-Verminderung wurden aus Primärdaten der FfE abgeleitet. Ihnen zugrunde liegen ca. 150 Energieaudits und ca. 2500 Einzelmaßnahmen, die innerhalb der vergangen 10 Jahre erhoben wurden.

Tabelle 4-3: Herleitung des maximalen technischen Potenzials und der Zukunftsfähigkeit der CO_2-Verminderungsmaßnahmen für den Bereich der QST in der Industrie

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Tausch sonst. Hochdruck-entladungslampen gegen LED	Durch den Ersatz ineffizienter Hochdruckentladungslampen (>50 lm/W) gegen effiziente LED-Systeme (Leuchte & Leuchtmittel) mit höherer Lichtausbeute werden der Strombedarf sowie die damit verbundenen Emissionen reduziert.	*Maximales technisches Potenzial:* 500 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Beleuchtung im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 10 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 16 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 1 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Tausch Leuchtstoffröhren gegen LED	Durch den Ersatz von Leuchtstoffröhren gegen effizientere LED-Systeme (Leuchte & Leuchtmittel) mit höherer Lichtausbeute werden der Strombedarf sowie die damit verbundenen Emissionen reduziert.	*Maximales technisches Potenzial:* 1.600 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Beleuchtung im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 10 TWh_{el} Anwendungsfaktor:58 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 3 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Beleuchtung – steuerungs-technische Optimierung	Durch den Einsatz von Bewegungs-/ oder Präsenzmeldern, Zeitschaltuhren, tageslichtabhängiger Steuerung oder eine bereichsweise Schaltung werden die Betriebszeiten bzw. die Beleuchtungsstärke angepasst. Dies verringert wiederum den Strombedarf sowie die damit verbundenen Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 1.600 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Beleuchtung im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 10 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 70 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 3 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}

Druckluft – WRG	Die Nutzung der Abwärme der Drucklufterzeugung zur Raum- oder Prozesswärmeerzeugung oder Warmwassererzeugung (max. 70 C) verringert den Einsatz konventioneller Brennstoffe sowie die damit verbundenen Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 800 kt CO_2/a *Herleitung:* Brennstoffverbrauch für Raumwärme und Warmwasser, Prozesswärme (<60 °C) im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 82 TWh Anwendungsfaktor: 36 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 4 TWh Emissionsfaktor Brennstoffmix 2014: 216 g/kWh
Absenkung des Druckniveaus	Eine Druckniveauabsenkung hat einen spezifisch geringeren Energieaufwand zur Drucklufterzeugung zur Folge. Dadurch werden der Strombedarf sowie die damit verbundenen Emissionen reduziert.	*Maximales technisches Potenzial:* 400 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Druckluft im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 17 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 53 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 0,6 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Behebung von Druckluftleckagen	Die Behebung von Druckluftleckagen, der Einsatz von verlustarmen Armaturen sowie die Abschieberung von Leitungen nach Produktionsende verringern den Strombedarf sowie damit verbundenen Emissionen für die Drucklufterzeugung.	*Maximales technisches Potenzial:* 500 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Druckluft im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 17 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 99 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 1 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Druckluft – steuerungs-technische Optimierung	Der Einsatz einer übergeordneten Steuerung bewirkt eine möglichst effiziente Einsatzreihenfolge und Kombination der Kompressoren zur Drucklufterzeugung. Durch den geringeren spez. Stromverbrauch reduzieren sich der Strombedarf sowie die damit verbundenen Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 500 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Druckluft im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 17 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 48 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 1 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Effiziente Druckluft-kompressoren	Der Einsatz von Last-/Leerlaufkompressoren und drehzahlgeregelten Kompressoren mit geringerer spezifischer Leistungsaufnahme (kW/(m^3/min)) bewirkt einen geringeren Strombedarf sowie geringere Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 600 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Druckluft im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 17 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 41 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 1 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}

Hocheffiziente Antriebe (alle nichtgenannten)	Der Einsatz hocheffizienter Antriebe (Effizienzklassen IE3 und IE4) die an den Bedarf angepasste Dimensionierung von Antrieben sowie der Einsatz geeigneter Motorentyp (Servo- / Synchron- / Asynchronmotor etc.) bewirken einen reduzierten Strombedarf sowie geringere Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 5.300 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für elektrische Antriebe im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 117 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 49 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 9 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Effiziente Kraftübertragung (alle nichtgenannten)	Die bei der Kraftübertragung durch Riemen oder Getriebe entstehenden Verluste können durch Einsatz effizienter Riemen verringert werden. Durch Direktantriebe werden die Verluste bei der Kraftübertragung gänzlich vermieden, aufgrund Platzmangels können diese jedoch nicht überall eingesetzt werden. Die Minimierung der Kraftübertragungsverluste führt zu einem reduzierten Strombedarf sowie geringeren Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 600 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für elektrische Antriebe im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 117 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 19 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 1 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Elektrische Antriebe (alle nichtgenannten) – steuerungs-technische Optimierung (inkl. FU)	Betriebszeitenanpassungen oder die Anpassung konstanter Drehzahlen an den Bedarf führen zu einem geringeren Strombedarf sowie geringeren Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 4.000. kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für elektrische Antriebe im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 117 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 24 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 7 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Server-virtualisierung	Durch die Virtualisierung von Servern (im Unternehmen oder extern) reduziert sich die Anzahl an Hardwarekomponenten, was zu einer geringeren Gesamtleistungsaufnahme und somit reduziertem Strombedarf führt.	*Maximales technisches Potenzial:*1.700. kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für EDV im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 9 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 71 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 3 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Effiziente EDV-Geräte	Durch die Senkung der Leistungsaufnahme von Computern, Monitoren, zentralen Multifunktionsgeräten etc. werden der Strombedarf und die damit verbundenen Emissionen reduziert.	*Maximales technisches Potenzial:* 300 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für EDV im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 9 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 38 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 0,4 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}

Effiziente Kältemaschine (FU)	Durch effiziente Kältemaschinen (beispielsweise mit Drehzahlregelung) reduziert sich der spezifische Stromverbrauch zur Kälteerzeugung. Das hat einen geringeren Strombedarf sowie geringere Emissionen zur Folge.	*Maximales technisches Potenzial:* 600 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Kältetechnik im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 10 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 54 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 1 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Kälte – WRG	Die Nutzung der Abwärme der Kälteerzeugung zur Raum- oder Prozesswärmeerzeugung oder Warmwassererzeugung verringert den Einsatz konventioneller Brennstoffe sowie die damit verbundenen Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:300* kt CO_2/a *Herleitung:* Brennstoffverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 50 TWh Anwendungsfaktor: 33 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 1 TWh_{el} Emissionsfaktor Brennstoffmix 2014: 216 g/kWh
Optimierte Kälteverteilung	Die Erhöhung der Verdampfertemperatur bzw. der Vorlauftemperatur im Kühlkreislauf oder die Reduzierung der Verflüssigertemperatur bewirken eine geringere Leistungsaufnahme des Verdichters. Die Anpassung des Volumenstroms an den Bedarf und die damit einhergehende Erhöhung der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf sowie die Absenkung des Druckniveaus im Kühlkreislauf führen zu einer verminderten Leistungsaufnahme der Kühlkreislaufpumpen. Durch den geringeren Stromverbrauch reduzieren auch die damit verbundenen Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:1.000* kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Kältetechnik im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 10 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 73 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 2 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Lüftung – steuerungs-technische Optimierung	Die Anpassung von Volumenströmen an den Bedarf, die Optimierung von Betriebszeiten und die Anpassung von Regelgrößen, wie z.B. Temperatur oder relative Feuchte, führen zu einem geringeren Strombedarf und somit geringeren Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 1300 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Lüftung im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 25 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 43 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 2 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}

Lüftung – effiziente Antriebe	Der Einsatz hocheffizienter Antriebe (Effizienzklassen IE3 und IE4) die an den Bedarf angepasste Dimensionierung von Antrieben für Ventilatoren bewirken einen reduzierten Strombedarf sowie geringere Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 900 Mio. kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Lüftung im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 25 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 52 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 2 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Lüftung – effiziente Kraftübertragung	Die bei der Kraftübertragung durch Riemen oder Getriebe entstehenden Verluste können durch Einsatz effizienter Riemen verringert werden. Durch Direktantriebe werden die Verluste bei der Kraftübertragung gänzlich vermieden, aufgrund Platzmangels können diese jedoch nicht überall eingesetzt werden. Die Minimierung der Kraftübertragungsverluste führt zu einem reduzierten Strombedarf sowie geringeren Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 300 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Lüftung im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 25 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 57 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 1 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
Lüftung – WRG	Die Einbindung einer Wärmerückgewinnung aus der Abluft zur Erwärmung der Zuluft und ggf. Auskopplung in andere Systeme führt zu einem verminderten Heizenergie- und somit geringerem Brennstoffbedarf und reduzierten Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 300 kt CO_2/a *Herleitung:* Brennstoffverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 46 TWh Anwendungsfaktor: 27 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 2 TWh Emissionsfaktor Brennstoffmix 2014: 216 g/kWh
Komplett-erneuerung der Lüftungsanlage	Eine effiziente Lüftungsanlage nach dem Stand der Technik (hocheffiziente, drehzahlgeregelte Direktantriebe, hocheffiziente Wärmerückgewinnung, moderne Filter, effiziente Ventilatoren, ausreichend groß dimensionierte Kanäle, geringes Temperaturniveau der Heizregister sowie hohes Temperaturniveau der Kühlregister etc.) reduziert den Strom- sowie Brennstoffbedarf und die damit verbundenen Emissionen.	*Maximales technisches Potenzial:* 2.000 kt CO_2/a *Herleitung:* Stromverbrauch für Lüftung im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 25 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 28 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 3 TWh (Strom und Brennstoff) Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el} Emissionsfaktor Brennstoffmix 2014: 216 g/kWh

Dämmung Wärmeverteilung	Das Dämmen der Wärmeerzeugung (Kessel, Pufferspeicher) und -verteilung (Pumpen, Rohrleitungen, Armaturen, Wärmetauscher) sowie von Produktionsanlagen minimiert die Wärmeverluste und reduziert damit den Brennstoffeinsatz bzw. Strombedarf der Wärmepumpe.	*Maximales technisches Potenzial:* 100 kt CO_2/a *Herleitung:* Brennstoffverbrauch für Raumwärme, Warmwasser und NT-Prozesswärme (<240 °C) im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 160 TWh Anwendungsfaktor: 22 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 1 TWh Emissionsfaktor Brennstoffmix 2014: 216 g/kWh
Optimierte Wärmeverteilung	Die Absenkung von Vor- oder Rücklauftemperaturen sowie die Anpassung von Betriebszeiten an den Bedarf reduzieren den Wärmebedarf und somit den Brennstoffeinsatz bzw. Strombedarf zur Wärmeerzeugung.	*Maximales technisches Potenzial:* 1.300 kt CO_2/a *Herleitung:* Brennstoffverbrauch für Raumwärme, Warmwasser und NT-Prozesswärme (<240 °C) im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 160 TWh Stromverbrauch für Pumpen im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 6 TWh_{el} Anwendungsfaktor: 52 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 16 TWh_{el} (Strom und Brennstoff) Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el} Emissionsfaktor Brennstoffmix 2014: 216 g/kWh
(NT bis 240°C) Energieträger-wechsel Biomasse	Durch einen Energieträgerwechsel von einem mit konventionellen Brennstoffen beheizten System auf ein mit Biomasse befeuertes System, können die Emissionen der Wärmeerzeugung reduziert werden.	*Maximales technisches Potenzial:* 32.000 Mio. t CO_2/a *Herleitung:* Fossiler Brennstoffverbrauch für NT-Prozesswärme (bis 240 °C) und Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 147 TWh Anwendungsfaktor: 100 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050 ist Szenario abhängig Emissionsfaktor Brennstoffmix 2014: 216 g/kWh
(NT 100°C bis 240°C) Energieträger-wechsel Elektrodenkessel	Durch einen Energieträgerwechsel von einem mit konventionellen Brennstoffen beheizten System auf ein einen Elektro- / Elektrodenkessel können die Emissionen der Wärmeerzeugung reduziert werden. Eine Umstellung von einem brennstoffbasierten System auf ein elektrisches führt zu einem Rückgang des Brennstoffbedarfs bei gleichzeitig ansteigendem Strombedarf.	*Maximales technisches Potenzial:* 7.000 Mio. t CO_2/a *Herleitung:* Brennstoffverbrauch für Raumwärme, Warmwasser und NT-Prozesswärme (100°C bis 240°C) im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 32 TWh Anwendungsfaktor: 100 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050 ist Szenario abhängig Emissionsfaktor Brennstoffmix 2014: 216 g/kWh

(NT <100°C) Energieträger-wechsel Wärmepumpen	Durch einen Energieträgerwechsel von einem mit konventionellen Brennstoffen beheizten System auf eine Wärmepumpe können die Emissionen der Wärmeerzeugung reduziert werden. Eine Umstellung von einem brennstoffbasierten System auf ein elektrisches führt zu einem Rückgang des Brennstoffbedarfs bei gleichzeitig ansteigendem Strombedarf.	*Maximales technisches Potenzial:* 25.000 Mio. t CO_2/a *Herleitung:* Brennstoffverbrauch für Raumwärme, Warmwasser und NT-Prozesswärme (<100 °C) im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 115 TWh Anwendungsfaktor: 100 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050 ist Szenario abhängig Emissionsfaktor Brennstoffmix 2014: 216 g/kWh
Effizienterer fossiler Wärmeerzeuger (kein Energieträger-wechsel)	Effiziente Wärmeerzeuger sowie die Umstellung von Dampf auf Heißwasser führen zu einem verminderten Brennstoffeinsatz.	*Maximales technisches Potenzial:* 1.300 kt CO_2/a *Herleitung:* Fossiler Brennstoffverbrauch für NT-Prozesswärme und Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 147 TWh Anwendungsfaktor: 54 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 6 TWh_{el} Emissionsfaktor Strommix 2014: 573 g/kWh_{el}
WRG NT Wärmeerzeuger	Die Nutzung von Abwärme (Abgas-Wärmetauscher in der Wärmeerzeugung) führt zu einer Reduktion des Brennstoffeinsatzes oder Strombedarfs zur Wärmeerzeugung.	*Maximales technisches Potenzial:* 600 kt CO_2/a *Herleitung:* Brennstoffverbrauch für Raumwärme, Warmwasser und NT-Prozesswärme (<240 °C) im Jahr 2014 nach /ISI-02 16/: 160 TWh Anwendungsfaktor: 57 % Einsparung gegenüber 2014 durch Reduktion des spezifischen Bedarfs auf den Wert für 2050: 3 TWh Emissionsfaktor Brennstoffmix 2014: 216 g/kWh

4.2.2 Prozesse

Die Prozessmaßnahmen wurden durch Literaturrecherche und Experteninterviews identifiziert und im Rahmen von Experteninterviews plausibilisiert und validiert.

Tabelle 4-4: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Metallerzeugung

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Stromerzeugung aus Abwärme (Elektrolichtbogen -ofen / electric arc furnace - EAF)	Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/ Hier wird die Abwärme aus dem EAF genutzt.	*Maximales technisches Potenzial: 200 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 22 kWh_{el} / t Rohstahl /TUR-01 16/, /CAM-01 13/, /FFE-36 17/ - Anwendungsfaktor: 92 % /FFE-36 17/
Umstellung bzw. Aufrüstung der Pfannenfeuer (EAF)	Zur Temperaturregulierung und Trocknung werden die Pfannengefäße vor dem Abstechen der Stahlschmelze aus dem Schmelzofen mit Pfannenfeuer beheizt. Durch die Aufrüstung der Pfannenfeuer auf Stand der Technik Sauerstoff/Gas-Brenner werden fossile Energieträger eingespart. Es ergibt sich hierdurch allerdings eine Steigerung des Stromverbrauchs. /WVS-04 17/, /LSW-01 15/	*Maximales technisches Potenzial: <10 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme (EAF: Strom zur Wärmeerzeugung, hier jedoch Brennstoff): 1,21 kWh / t Rohstahl, aber: Strom: -0,24 kWh / t Rohstahl /FFE-36 17/, /LSW-01 15/ - Anwendungsfaktor: 50 % /FFE-36 17/
Schrottvor-wärmung (EAF)	Durch Vorwärmung des Schrotts mit Abwärme des EAFs kann die benötigte Energiemenge für das Schmelzen des Schrotts im EAF gesenkt werden. /EOLB-01 10/	*Maximales technisches Potenzial: 600 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 81 kWh / t Rohstahl /MOYA-01 13/, /VILL-01 12/, /EAEID-01 13/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FFE-36 17/
Prozess-optimierung (EAF)	Die hier inkludierten Aspekte beziehen sich vor allem auf die Modernisierung der Automatisierungssysteme. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der kontinuierlichen Messung von Prozessparametern sowie der dynamischen Prozessmodellierung. /BCG-01 13/	*Maximales technisches Potenzial: 300 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 46 kWh / t Rohstahl /BCG-01 13/ - Anwendungsfaktor: 80 % /FFE-36 17/

Optimierung Wärmetauscher-lösung für Winderhitzer (Hochofen / blast furnace - BF)	Das Abgas der Winderhitzer (Rauchgas) wird zum Vorheizen der dem Winderhitzer zugeführten Brennluft und Brenngas (Gichtgas, Koksofengas oder Erdgas) verwendet. Dadurch kann die so ausgetauschte Energie der Rauchgas-Abwärme beim Aufheizen der Winderhitzer eingespart werden (Wirkungsgrad des Winderhitzers 10 %). /WVS-02 17/	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme (BF: Brennstoff zur Wärmeerzeugung): 36 kWh / t Rohstahl /WVS-02 17/ - Anwendungsfaktor: 10 % /FFE-36 17/
Gichtgas-entspannungs-turbine (engl. Top Gas/pressure recovery turbine, TRT) (BF)	Dadurch, dass einige Hochöfen in Deutschland mit Überdruck gefahren werden (neun Anlagen in Deutschland, vier mit Normaldruck), hat das entweichende Gas neben einer hohen Temperatur noch immer einen erhöhten Druck. Durch den Einsatz einer Expansionsturbine kann dies zur Stromerzeugung genutzt werden. /BCG-01 13/, /EOLB-01 10/	*Maximales technisches Potenzial:* *0 kt CO_2/a (antinomische Wechselwirkung mit Top Gas Recycling, Potenzial bei 100 kt CO_2)* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 38 kWh / t Rohstahl /MOYA-01 13/, /VILL-01 12/, /EAEID-01 13/, /BCG-01 13/ - Anwendungsfaktor: 23,1 % /FFE-36 17/, (näherungsweise, da Maßnahme in 3 von 13 Hochöfen möglich, Annahme: alle BF haben die gleiche Kapazität)
Gichtgasrück-führung (engl. Top Gas Recycling, TGR) (BF)	Beim TGR werden die Abgase des Hochofenprozesses (enthält CO und H_2) separiert und teilweise wieder dem Hochofen zugeführt und als Ersatzreduktionsmittel verwendet. Dies kann den Verbrauch von Koks oder eingeblasener Kohle im Hochofen senken. Darüber hinaus vereinfacht das Verfahren die Abtrennung von CO_2 und bietet damit bedeutendes zusätzliches Potenzial bei Einführung von CCS/CCU. /BCG-01 13/, /EOLB-01 10/	*Maximales technisches Potenzial: 3.000 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme 556 kWh / t Rohstahl /BCG-01 13/ - Anwendungsfaktor: 53,8 % /FFE-36 17/, (näherungsweise, da Maßnahme in 7von 13 Hochöfen möglich, Annahme: alle BF haben die gleiche Kapazität)
Optimierung Sinter-Pellet-Verhältnis (BF)	Da die Herstellung von Sinter etwa dreimal so hohe Emissionen verursacht wie die von Pellets, ist durch eine Substitution von Sinter durch Pellets im Hochofen die Senkung von Emissionen möglich. /BCG-01 13/	*Maximales technisches Potenzial: 3.000 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 333 kWh / t Rohstahl /BCG-01 13/, /FFE-36 17/ - Annahme: 100 % Substitution von Sinter durch Pellets /BCG-01 13/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FFE-36 17/

Einblasung von wasserstoffreichen Reduktionsmitteln (BF)	Durch den Einsatz von wasserstoffreichen Reduktionsmitteln wie Erdgas oder Koksofengas als Substitut für Koks oder Kohle werden die CO_2-Emissionen des Hochofenprozesses gesenkt. /BCG-01 13/	*Maximales technisches Potenzial: 2.000 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 164 kWh / t Rohstahl und Strom: 19 kWh/t Rohstahl /EAEID-01 13/, /BCG-01 13/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FFE-36 17/
Konvertergas-recycling (Blasstahl-konverter - basic oxygen furnace – BOF)	Das Konvertergas, welches bei der Umwandlung von Roheisen zu Stahl im Konverter anfällt, kann recycelt und zur Erzeugung von Dampf eingesetzt sowie entstaubt als Erdgasersatz verwendet werden. /BCG-01 13/, /EOLB-01 10/ Aktuell nutzen 40 % aller Anlagen in D das Konvertergas zur Dampferzeugung und erzielen damit eine Einsparung von 0,4-0,5 GJ/t Rohstahl. Würden diese Anlagen aufdie Entstaubung des Gases als Erdgassubstitut umgestellt, könnten diese eine insgesamte Einsparung von 0,9 GJ/t Rohstahl erzielen. Die verbleibenden 60 % der Anlagen in D nutzen das Konvertergas bereits zur Entstaubung und als Erdgassubstitut. /FFE-36 17/	*Maximales technisches Potenzial: 500 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme (BOF: Strom zur Wärmeerzeugung): 139 kWh / t Rohstahl /MOYA-01 13/, /VILL-01 12/, /BCG-01 13/ - Anwendungsfaktor: 40 % /FFE-36 17/
Stromerzeugung aus Abwärme (BF/BOF)	Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/ Hier wird die Abwärme aus dem Hochofen/ Konverter genutzt.	*Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 22 kWh / t Rohstahl /FFE-36 17/ - Anwendungsfaktor: 30 % /FFE-36 17/
Kohleeinblasung (BF)	Durch das Einblasen von pulverisierter Kohle in den Hochofen können zu einem gewissen Teil der Kokseinsatz reduziert und damit Emissionen eingespart werden. /EOLB-01 10/	*Antinomische Wechselwirkung mit Einblasung von wasserstoffreichen Reduktionsmitteln. Außerdem keine wesentlichen Potenziale /FFE-36 17/*
Energieerzeugung durch Gichtgaskraftwerk (BF)	Das aus dem Hochofen entweichende überschüssige Hochofengas (Gichtgas = brennbares Kuppelgas) kann energetisch als Brennstoff genutzt werden. Dadurch entsteht im Gichtgaskraftwerk Dampf und Strom, welcher einerseits im Prozess benutzt als auch andererseits eingespeist werden kann. /WVS-03 17/, /FFE-36 17/	*Stand der Technik und keine wesentlichen zusätzlichen Potenziale /FFE-36 17/*

Tabelle 4-5: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Zementherstellung

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Ersatz von Kugelmühlen (Rohmaterial-aufbereitung)	Der Ersatz von Kugelmühlen durch wesentlich energieeffizientere vertikale Walzenmühlen (inkl. Separator) führt zu einer Senkung des Stromverbrauchs und damit auch zu einer Einsparung von Emissionen /EOLB-03 08/, /BOH-01 07/	*Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 11 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/, /FFE-22 17/, /BLESL-01 13/, /MKULNV-01 13/ - Anwendungsfaktor: 58 % /IER-03 14/
Ersatz Transportsysteme (Rohmaterial-aufbereitung)	Durch den Ersatz von pneumatischen Transportsystemen durch mechanische Systeme kann Strom eingespart und damit Emissionen vermindert werden /EOLB-03 08/.	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 3 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 57 % /IER-03 14/
Homogenisierung mittels Schwerkraft (Rohmaterial-aufbereitung)	Das Homogenisieren kann dadurch erfolgen, dass das Rohmehl durch Luft fluidisiert und anschließend mechanisch umgewälzt bzw. im Kreislauf gefördert wird. Alternativ dazu bieten sich sog. Schwerkraftmischer an. Obwohl diese nicht dieselbe Effektivität bzgl. der Vermengung / Homogenisierung des Rohmaterials erreichen, rechtfertigen die signifikanten Energieeinsparungen den Einsatz von Schwerkraftmischern. Hierbei strömt das Rohmaterial von oben entlang eines oder mehrerer Innenrohe durch einen Kegel in Richtung Entnahmeöffnung. Eine Umwälzung des Materials im Durchlauf erfolgt im engeren Sinne nicht. Das Material vermischt sich beim Vereinigen am Siloauslauf. /EOLB-03 08/	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 3 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 62 % /IER-03 14/
Wärmerück-gewinnung (ORC) (Brennen)	Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/ Hier wird Abwärme aus dem Drehrohrofen verwendet.	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 9 kWh / t Zement /BLESL-01 13/, /CAM 01 13/, /IER-03 14/, /FEA-01 16/, /EOLB-03 08/ - Anwendungsfaktor: 42 % /IER-03 14/

Optimierte Prozessteuerung (Brennen)	Die Maßnahme optimierte Prozesssteuerung beschreibt jegliche Anstrengungen, den Energieverbrauch und die Produktqualität durch Steuerung des Prozesses zu optimieren. Dazu zählen unter anderem automatisierte Systeme, welche mittels Sensoren und Simulationen Echtzeitinformationen bereitstellen und auswerten und somit eine Beeinflussung des Prozesses zu jeder Zeit ermöglichen. /EOLB-03 08/	*Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 2 kWh / t Zement - Spez. Einsparpotenzial Wärme (Zement: Brennstoff): 32 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 20 % /IER-03 14/
Retrofit Vorcalcinatoren (Brennen)	Durch die Optimierung von Vorcalcinatoren bei bereits bestehenden Zyklonvorwärmern wird eine Brennstoffreduktion erreicht, da durch den Vorcalcinator ein gleichmäßigerer Ofenbetrieb und somit effizienterer Betrieb ermöglicht wird. Durch die steigende Ofenkapazität ergibt sich außerdem eine Energieeffizienzsteigerung. /IER-03 14/, /VDZ-01 08/	*Maximales technisches Potenzial: 600 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 119 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 65 % /IER-03 14/
Ersatz Lepol-Öfen (Brennen)	Lepol-Öfen (= Ofenanlagen mit Rostvorwärmern) werden ersetzt durch das heutzutage übliche Ofendesign, bestehend aus Zyklonvorwärmeröfen mit Vorcalcinator. Lepol-Öfen haben verfahrensbedingt einen höheren thermischen Energieverbrauch. Allerdings ist ein Umbau zumeist technisch nicht möglich /VDZ-01 08/.	*Maximales technisches Potenzial: 200 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 5 kWh / t Zement - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 250 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 2 % /IER-03 14/
Ersatz Drehkühler/ Satellitenkühler (Zementmahlen inkl. Klinkerkühlung)	Neben ihrer höheren Effizienz bieten Rostkühler noch weitere Vorteile. So lassen sich damit geringere Klinkerendtemperaturen erreichen. Durch Rostkühler entsteht keine Kühlerabluft, wodurch die Notwendigkeit einer Entstaubung entfällt. Außerdem haben Rostkühler geringere Abstrahlverluste. Darüber hinaus lassen sich Rostkühler bestens in das heute übliche Ofendesign, bestehend aus Zyklonvorwärmeröfen mit Calcinator und Tertiärluftleitung, einbinden. /VDZ-01 08/ Allerdings steigt der Stromverbrauch dabei leicht an. /EOLB-03 08/	*Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: -3 kWh / t Zement /EOLB-03 08/ - Spez. Einsparpotenzial Wärme:65 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/, /EOLB-03 08/ - Anwendungsfaktor: 16 % /IER-03 14/
Modernisierung Rostkühler (Zementmahlen inkl. Klinkerkühlung)	Durch eine Modernisierung bestehender Rostkühler können zusätzliche Energieeinsparungen realisiert werden. Unter anderem konnten durch die fortschreitende Rostkühlertechnik in den letzten Jahren deutliche Verbesserungen der thermischen Effizienz der gesamten Ofenanlagen erreicht werden. /VDZ-01 08/	*Maximales technisches Potenzial: <10 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 7 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/, /MKULNV-01 13/ - Anwendungsfaktor: 16 % /IER-03 14/

Retrofit von Zyklonen (Brennen)	Zyklonen sind ein zentrales Element für das in Deutschland gängige Ofendesign zur Vorwärmung des Materials. Die Maßnahme stellt den Ersatz bestehender Zyklonen durch neuere mit geringerem Druckverlust dar. Dadurch reduziert sich folglich der Stromverbrauch der Ofenabgas-Ventilatoren. /EOLB-03 08/	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 3 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 57 % /IER-03 14/
Ersatz Kugelmühlen (Zementmahlen inkl. Klinkerkühlung)	Der Ersatz von Kugelmühlen durch wesentlich energieeffizientere vertikale Walzenmühlen (inkl. Separator) führt zu einer Senkung des Stromverbrauchs und damit auch einer Einsparung von Emissionen /EOLB-03 08/, /VDZ-01 08/, /BOH-01 07/	*Maximales technisches Potenzial: 300 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom:26 kWh / t Zement /FFE-22 17/, /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 56 % /IER-03 14/
Retrofit hocheffiziente Separatoren (Zementmahlen inkl. Klinkerkühlung)	Separatoren/ Fliehkraftabscheider/ Sichter werden eingesetzt, um gemahlenen Zement als Feingut abzuscheiden. Zu schwere oder große Teile hingegen gelangen zurück in die Mühlen. Durch den Einsatz von Hochleistungssichtern bzw. hocheffizienten Fliehkraftabscheidern kann der Energieverbrauch für die Sichtung gesenkt werden. /VDZ-01 08/	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 4 kWh / t Zement /IER-03 14/, /FEA-01 16/ - Anwendungsfaktor: 61 % /IER-03 14/
Verbessertes Mahlmedium für die Kugelmühlen (Rohmaterial-aufbereitung und Zementmahlen inkl. Klinkerkühlung)	Das Mahlmedium ist das bestimmende Charakteristikum für die Kugelmühlen und nutzt sich mit der Zeit ab. Durch verbesserte und verschleißresistente Werkstoffe der Mahlkörper kann der Energieverbrauch reduziert werden. /EOLB-03 08/	Antinomische Wechselwirkung mit Ersatz Kugelmühle /IER-03 14/
Veränderung der Zement-zusammen-setzung (Allgemein)	Bedeutende Potenziale werden in der Zementindustrie in der Zementzusammensetzung gesehen. Durch das Ersetzen von Zementklinker durch Zusatzstoffe/ Nebenbestandteile (engl. supplementary materials) können sowohl prozess- als auch energiebedingte CO_2-Emissionen gesenkt werden. Darüber hinaus können alternative Bindemittel den Energieverbrauch der Zementherstellung vermindern. In Deutschland kommen hierbei derzeit beispielsweise Hüttensand, Kalkstein, Flugasche und Puzzolane oder gebrannte Ölschiefer zum Einsatz. /VDZ-02 15/, /FFE-39 17/	Betrifft allerdings die Modifikation des Produkts und wird deswegen hier nicht behandelt.

Tabelle 4-6: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Kalkherstellung

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Effizienteres Ofendesign	Durch den Ersatz bestehender Öfen durch den heutzutage effizientesten Ofentypen des Gleichstrom-Gegenstrom-Regenerativ-Ofen (GGR) lassen sich bedeutenden Energie- und damit Emissionsverminderung realisieren. Dieser wird derzeit in Deutschland in ca. 25 % der Anlagen eingesetzt. Die Maßnahme bezieht sich darauf alle bestehenden Ofentypen durch den modernsten Ofentyp zu ersetzen. /IER-05 14, /UBA-03 17/	Maximales technisches Potenzial: <400 kt CO_2/a Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Wärme: 221 kWh/t Kalk basierend auf /IER-05 14, /UBA-03 17/ Anwendungsquote: 75 % basierend auf /UBA-03 17/
Ersatz bestehender Mühlen (Kalkmahlen)	Der Ersatz bestehender Mühlen (weit verbreitet sind Kugelmühlen) durch wesentlich energieeffizientere vertikale Walzenmühlen oder Horizontal-Sichtrollenmühlen führt zu einer Senkung der verbrauchten Energie und damit auch zu einer Reduzierung von Emissionen. /BMUB-04 16/, /ISI-05 13/	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Strom: 13 kWh/t Kalk basierend auf /BMUB-04 16/ Anwendungsquote: 89 % Annahme basierend auf /IER-03 14/ (Zementmahlen) Das ausgewiesene Potenzial bezieht sich auf gebrannte Kalkerzeugnisse.
Abwärmenutzung zur Stromerzeugung (z.B. ORC)	Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/ Hier wird die Abwärme des Kalkbrennens genutzt.	Antinomische Wechselwirkung mit der Maßnahme „Effizienteres Ofendesign", da bei den GGR-Öfen kein realisierbares Potenzial zur Abwärmenutzung besteht. Bedeutendes Potenzial ähnlich zur Zementherstellung bestünde beispielsweise bei Drehrohröfen.
Abwärmenutzung zur Material-Vorwärmung	Die Wärme, welche beim Kalkbrennen entsteht, kann analog zur Zementherstellung zur Materialvorwärmung genutzt werden. /QUO-01 13/ Hier wird die Abwärme des Kalkbrennens genutzt	Antinomische Wechselwirkung mit der Maßnahme „Effizienteres Ofendesign", da bei den GGR-Öfen kein zusätzliches Potenzial zur internen Abwärmenutzung besteht. Die Einsparungen sind bereits durch das Prinzip des GGR-Ofens berücksichtigt. Bedeutendes Potenzial ähnlich zur Zementherstellung bestünde beispielsweise bei Drehrohröfen.

Tabelle 4-7: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Ziegelherstellung

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Energie-management	Diese Maßnahme erlaubt eine bessere Kontrolle der Energieverbräuche um Effizienzoptionen besser zu finden und sinnvoll zu implementieren /ISI-05 13/	*Maximales technisches Potenzial:* *<100 kt CO_2/a* Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Wärme: 51,4 KWh/t Ziegel basierend auf /ISI 05 13/ Spez. Einsparpotenzial Strom: 0,6 kWh/t Kalk basierend auf /ISI 05 13/ Anwendungsquote: folgt
Optimierte Verbrennungs-führung	Abgestimmte Verbrennungsführung zwischen Ofen- und Trockner mit Stützbrenner. /ISI-05 13/	*Maximales technisches Potenzial:* *<100 kt CO_2/a* Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Wärme: 32,2 kWh/t Kalk basierend auf /ISI 05 13/ Anwendungsquote: 50 % basierend auf /CARB-01 11/
Rohlingtrocknung	Für die Trocknung von Ziegelrohling kann die freiwerdende Verbundwärme aus der Kühlzone des Tunnelofens ausreichen. /ISI-05 13/	*Maximales technisches Potenzial:* *<100 kt CO_2/a* Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Wärme: 15 kWh/t Kalk basierend auf /ISI 05 13/ Anwendungsquote: 30 % basierend auf /CARB-01 11/ und /GROET-01 17/
Abwärmenutzung (ORC)	Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/ Hier wird die Abwärme des Ziegelbrennens genutzt.	*Antinomische Wechselwirkung mit der Maßnahme „Energiemanagement", da bei effizienteren Öfen weniger Abwärmenutzung besteht.*

Tabelle 4-8: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen im Papiergewerbe

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Schwarzlauge-vergasung (Zellstoff-herstellung mittels Sulfatverfahren)	Die Schwarzlauge bei der Zellstoffherstellung wird grundsätzlich getrocknet und zur Energiegewinnung im Laugenkessel verbrannt. Allerdings haben die Laugenverbrennungskessel aufgrund thermodynamischer Beschränkungen einen niedrigen elektrischen Wirkungsgrad von 10-15 %. Eine Alternative zu dieser Nutzungsart stellt die Schwarzlaugevergasung dar. Die Vergasung der Schwarzlauge ermöglicht die Nutzung einer Anlage mit Kraft-Wärme-Kopplung, was bei gleichbleibender Wärmeerzeugung die Stromerzeugung deutlich erhöht. /EOLB-01 09/, /FLEI-01 12/, /EU-04 15/	Maximales technisches Potenzial: 300 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Strom: 478 kWh / t Zellstoff (Erzeugung von Strom) /FLEI-01 12/, /EU-04 15/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FLEI-01 12/
Hochkonsistenz-stoffauflösung (Altpapierstoff)	Durch eine Erhöhung der Stoffdichte von 5-7 % auf 10-20 % kann bei der Stoffauslösung Energie eingespart werden. Dies liegt daran, dass durch den niedrigen Wassergehalt die Reibungskräfte zwischen den Fasern wesentlich höher sind und so ein gutes Auflösen des Gemisches bei geringerem Energieaufwand möglich ist. /CHV-01 10/, /EU-04 15/, /EANRW-01 1/	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Strom: 7 kWh/t Altpapierstoff /EU-04 15/, /EANRW-01 1/, /FLEI-01 12/ - Anwendungsfaktor: 70 % /FLEI-01 12/
Effiziente Siebung (Altpapierstoff)	Bei der Siebung werden aus der Suspension Verunreinigungen und Fremdstoffe im Altpapier beseitigt. Energieeinsparmaßnahmen können sich unter anderem durch eine Erhöhung der Stoffdichte sowie durch die Nutzung von Siebkörben mit höherer Abscheideleistung ergeben. Dadurch kann bei geringerer Drehzahl dieselbe Menge an Altpapierstoff mit gleichbleibender Qualität gesiebt werden. /EU-04 15/, /FLEI-01 12/	Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Strom: 12 kWh/t Altpapierstoff /EU-04 15/, /FLEI-01 12/ - Anwendungsfaktor: 80 % /FLEI-01 12/
Wärmerück-gewinnung Bleiche (Altpapierstoff)	Das Abwasser aus der Bleiche der Altpapierstoffherstellung hat eine erhöhte Temperatur. Diese kann durch Wärmetauscherlösungen beispielweise zum Aufheizen von Frischwasser genutzt werden. /EOLB-01 09/, /FLEI-01 12/	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Wärme (Brennstoff): 8 kWh/t Altpapierstoff /EU-04 15/, /FLEI-01 12/ - Anwendungsfaktor: 80 % /FLEI-01 12/

Optimierung Deinking-Verfahren (Altpapierstoff)	Die Flotation stellt einen der energieintensivsten Prozessschritte des Deinkings in der Altpapieraufbereitung dar. Durch eine bessere Regulierung der Pumpen sowie eine reduzierte Flussgeschwindigkeit der Suspension lassen sich Energieeinsparungen realisieren. /FLEI-01 12/	Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Strom: 14 kWh/t Altpapierstoff /FLEI-01 12/, - Anwendungsfaktor: 100 % /FLEI-01 12/
Effiziente Disperger (Altpapierstoff)	Dispergieren ist ein Schritt der Nachbearbeitung der aufbereiteten Altpapierfasern mit dem Ziel, die einzelnen Fasern zu trennen, Fremdpartikel zu zerkleinern und die Faseroberflächen zu reinigen. /CHV-01 13/ Durch ein Umrüsten alter Disperger auf moderne Technik (z. B. Hochzahngarnituren) können bedeutende Einsparungspotenziale von bis zu 20 % realisiert werden. /FLEI-01 12/	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Strom: 6 kWh/t Altpapierstoff /FLEI-01 12/ - Anwendungsfaktor: 70 % /FLEI-01 12/
Effizientere Refiner (Papiermaschine)	Bei ungünstigen Betriebsbedingungen können die Leerlaufverluste für 30-50 % des Energieverbrauchs der Refiner verantwortlich sein. Abhilfe schaffen können einerseits der Einsatz neuer effizienterer Refiner oder eine Optimierung der Betriebsweise bestehender Refiner. /EU-04 15/ Ein Beispiel für ein neues Refinerkonzept stellt der sog. Papillon-Refiner dar, durch welchen sich die Leerlaufverluste laut Hersteller um bis zu 40 % reduzieren lassen /AND-01 16/. Durch die sinkenden Leerlaufverluste lassen sich signifikante Energieeinsparungen realisieren. /EU-04 15/	Maximales technisches Potenzial: 400 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Strom: 33 kWh/t Papier /FLEI-01 12/, /EU-04 15/ - Anwendungsfaktor: 95 % /FLEI-01 12/
Optimierung Refiner (Papiermaschine)		Maximales technisches Potenzial: 200 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Strom: 21 kWh/t Papier /FLEI-01 12/ - Anwendungsfaktor: 70 % /FLEI-01 12/
Chemische Fasermodifikation (Papiermaschine)	Entgegen dem konventionellen Ansatz, nach welchem eine erhöhte Bindefähigkeit der Fasern überwiegend durch mechanische Mahlung ermöglicht wird, kann dies auch durch chemische Behandlung der Fasern (=Fasermodifikation) erfolgen. Ein solcher Ansatz wirkt den Nachteilen der mechanischen Verfahren (u.a. hoher Energieverbrauch zur Entwässerung) entgegen. /EJWW-02 10/, /EU-04 15/, /FLEI-01 12/	Maximales technisches Potenzial: 800 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Strom: 46 kWh/t Papier /FLEI-01 12/ - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 51 kWh/t Papier /FLEI-01 12/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FLEI-01 12/

Dampfblaskasten (Papiermaschine)	Die Entwässerungsleistung in der Nasspresspartie hängt von der Viskosität des Wassers ab. Steigt die Temperatur des Wassers, so sinkt dessen Viskosität und die Entwässerungsleistung im Bereich der Presse steigt. Die Temperaturerhöhung wird durch Einsatz des Dampfblaskastens geschaffen (Bedampfen der Papierbahn). Je höher der Trockengehalt der Papierbahn nach der Presspartie ist, desto weniger (thermische) Energie ist zur Trocknung notwendig. /FLEI-01 12/, /VOI-01 12/, /CHV-02 09/	Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 50 kWh/t Papier /FLEI-01 12/, /EU-04 15/ - Anwendungsfaktor: 36 % /FLEI-01 12/
Einsatz von Schuhpressen (Papiermaschine)	Die Schuhpresse ist ein Modul für die (Nass-) Pressenpartie. Durch die spezielle Form der Schuhpresse und eine Verlängerung der Niplänge in der Papiermaschine können eine intensivere Entwässerung und damit eine Steigerung des Trockengehalts der Papierbahn vor dem Eintritt in die Trockenpartie erreicht werden. Da vor allem die thermische Trocknung mit einem hohen Energieaufwand verbunden ist, können dadurch Energie- und Emissionsminderungen realisiert werden. /CHV-01 15/, /BLESL-01 13/, /FLEI-01 12/	Maximales technisches Potenzial: 300 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 152 kWh/t Papier /FLEI-01 12/, /EU-04 15/ - Anwendungsfaktor: 43 % /FLEI-01 12/
Neue Trocknungs-verfahren (Papiermaschine)	Da die Trockenpartie den energetisch aufwendigsten Prozessschritt der Papiermaschine darstellt, bietet sich hier grundsätzlich ein großes Einsparungspotenzial. In der Literatur werden zahlreiche verschiedene Konzepte diskutiert, welche energetisch effizientere Trocknung versprechen. Dazu zählen unter anderem die Impulstrocknung, die Dampf-/ Pralltrocknung sowie die Kondensationsband-Trocknung. /FLEI-0 12/ Allerdings werden diese neuen Trocknungsverfahren auch teilweise unterschiedlich bewertet.	Maximales technisches Potenzial: 800 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 183 kWh/t Papier /FLEI-01 12/, /EU-04 15/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FLEI-01 12/
Wärmerück-gewinnung / Abwärmenutzung (Papiermaschine)	Wärmerückgewinnung sowie die Nutzung von Abwärme ist in der Papierindustrie bereits sehr weit fortgeschritten. Große Einsparungspotenziale werden hierbei vor allem im Bereich der Abwärme von den Refinern und des Mahlens sowie in der Trockenpartie realisiert. Nichtsdestotrotz bestehen zusätzliche Potenziale vor allem bei der Nutzung von Niedertemperaturwärme sowie dem Dampfsystem. /FLEI-01 12/	Maximales technisches Potenzial: 700 kt CO_2/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 298 kWh/t Papier /FLEI-01 12/ - Anwendungsfaktor: 50 % /FLEI-01 12/

Tabelle 4-9: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Holzstoffherstellung

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Wärmerück-gewinnung (TMP, GW)	Ein Großteil der Energie, die beim TMP-Verfahren eingesetzt wird kann in Form von Dampf oder Heißwasser wiedergewonnen werden. In neueren Anlagen ist dies allerdings bereits Standard, was zu einer geringen Anwendungsquote führt. Nichtsdestotrotz bestehen weitere Potenziale zum Beispiel in der Nutzung der Temperatur des Abwassers aus der Bleiche. /FLEI-01 12/, /EOLB-01 09/, /EU-04 15/ Diese Wärme kann beispielsweise in integrierten Papierfabriken zur Trocknung in der Papiermaschine genutzt werden.	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Wärme: 965 kWh/t Faserstoff /FLEI-01 12/ Anwendungsquote: 8 % /FLEI-01 12/
Hocheffizientes Mahlen (GW)	Es existieren verschiedene Konzepte, die darauf abzielen die benötigte mechanische Energie zu reduzieren. Eine Möglichkeit stellt der Ersatz der Stein- oder Keramikmaterialien in der Mahlung durch metallene Oberflächen dar. /FLE- 01 12/	Maximales technisches Potenzial: <300 kt CO_2/a Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Strom: 720 kWh/t Faserstoff /FLEI-01 12/ Anwendungsquote: 70 %, da 70 % der in Deutschland hergestellten Holzstoffs mittels dem GW-Verfahren hergestellt werden und die Maßnahme davon bei allen Anlagen angewandt werden kann /FLEI-01 12/
Enzymatische Vorbehandlung (CTMP, engl. Chemi-thermo-mechanical pulping) (TMP)	Durch die Vorbehandlung der Holzspäne/Hackschnitzel mit Enzymen (wie z. B. Cellulase) sinkt die benötigte Bearbeitungszeit. Diese Einsparung an mechanischer Energie zur Holzverarbeitung wird im zweiten Refiner realisiert. /EU-04 15/, /FLEI-01 12/	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Strom: 517 kWh/t Faserstoff /EU 04 15/, /FLEI-01 12/, /EOLB-01 09/ Anwendungsquote: 30 %, da 30 % der in Deutschland hergestellten Holzstoffs mittels dem TMP-Verfahren hergestellt werden und die Maßnahme davon bei allen Anlagen angewandt werden kann /FLEI-01 12/

Effiziente Refiner (z.B. RTS), Vorverdichter und Verwendung von Hobelspänen (TMP)	Es existieren verschiedene Technologien, um die Refiner-Effizienz zu erhöhen. Ein Beispiel ist der RTS-Refiner von Andritz, welcher ein thermomechanisches Holzaufschlussverfahren darstellt. Dieser ist durch eine geringere Verweildauer (engl. lower retention time = R), höhere Temperaturen (engl. higher temperature = T) sowie höhere Refiner Geschwindigkeiten (engl. higher refinder speed = S) charakterisiert.	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Strom: 431 kWh/t Faserstoff /FLEI-01 12/, /EOLB-01 09/ Anwendungsquote: 28 %, da 30 % der in Deutschland hergestellten Holzstoffs mittels dem TMP-Verfahren hergestellt werden und die Maßnahme davon noch bei 93 % der Anlagen angewandt werden kann /FLEI-01 12/

Tabelle 4-10: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Hohlglasherstellung

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Gemenge- und Scherben-vorwärmung (Gemenge-bereitung)	Während Gemenge sowie Scherben normalerweise kalt in die Schmelzwanne eingebracht werden, können durch deren Vorwärmung mit Abgasen signifikante Energieeinsparungen realisiert werden. Die Vorwärmungstemperaturen liegen überwiegend im Temperaturbereich von 275-325° C. /JRC-01 13 /	*Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme (Brennstoff): 112 kWh / t Glas /OVE-01 09/,JRC-01 13/, /EOLB-01 08/, /VIN-01 16/ - Anwendungsfaktor: 40 % /OVE-01 09/
Erhöhung Scherbeneinsatz (Gemenge-bereitung)	Aufgrund der bereits vollendeten chemischen Reaktion bei der Glasbildung benötigen Scherben weniger Schmelzenergie als Rohmaterialbestandteile. Außerdem ist die Masse des Gemenges von Scherben um ca. 20 % geringer als für Rohmaterial. Ein erhöhter Scherbenanteil geht daher mit einer Energieeinsparung einher. Als Faustformel wird in der Literatur häufig angegeben, dass die Schmelzenergie in der Wanne pro 10 % erhöhtem Scherbenanteil um 2 % reduziert werden kann. /JRC-01 13/	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 56 kWh / t Glas /EOLB-01 08/ - Anwendungsfaktor: 90 % - Annahme basierend auf /JRC-01 13/, dass der Scherbenanteil im Mittel und aufgrund begrenzter Scherbenverfügbarkeit (Qualität und Farbe) bei 60 % liegt und auf 80 % gesteigert werden kann /BVG 01 14/

Abwärmenutzung zur Stromerzeugung / Wärmerück-gewinnung (ORC) (Schmelzen)	Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/ Hier wird Abwärme aus dem Verbrennungsgas verwendet. Das ORC Potenzial hängt stark von dem verfügbaren Temperaturniveau ab. Durch den Einsatz eines zentralen Rekuperators am Brenner sinken die Abgastemperaturen von ca. 1400 °C auf 980 °C. Durch den Einsatz eines zentralen Regenerators am Brenner sinken die Abgastemperaturen von 1400 °C auf ca. 430 °C grad ab. /ISI-08 13/, /GLIN-01 16/	*Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 28 kWh / t Glas /GLIN-01 16/ - Anwendungsfaktor: 100 % /GLIN-01 16/
Substitution der Rohmaterialien (Einsparung im Schmelzprozess)	Durch die Substitution bestimmter Rohmaterialien der Glasschmelze kann die zum Schmelzen notwendige Energie gesenkt werden. Dies kann beispielsweise durch den Wechsel des Aluminiumoxid-Trägers hin zu Pyrophyllit, welches eine geringere Schmelzenthalpie besitzt, erfolgen. /MEE-01 13/, /SHA-01 16/	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 24 kWh/t Glas /MEE-01 13/ unter Annahme von 80 % Scherbenanteil (aufbauend auf der Erhöhung des Scherbeneinsatzes) - Anwendungsfaktor: 20 %
Optimiertes Brennerdesign (Oxy-fuel) (Schmelzen)	Grundsätzlich existieren in der Glasindustrie zwei verschiedene Verbrennungstechnologien. Neben fossil befeuerten (v.a. Erdgas) Anlagen mit Luftverbrennung wird beim Oxy-fuel-Verfahren (fast) reiner Sauerstoff bei der Verbrennung eingesetzt. Außerdem gibt es auch Elektroglasschmelzen, welche allerdings überwiegend in der Spezialglasindustrie existieren. Auch Mischformen, wie der kombinierte Einsatz fossiler Brennstoffe und elektrische Energie, sind möglich (fossil befeuert mit elektrischem „Boosting"). /JRC-01 13/, /HVG-01 07/ Das ausgewiesene Potenzial bezieht sich auf den Ersatz fossiler Brennersysteme mit Luftverbrennung durch Oxy-fuel-Systeme. Zusätzlicher Stromverbrauch, welcher zur Sauerstofferzeugung verwendet wird, muss berücksichtigt werden.	*Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Wärme: 270 kWh/t Glas, Annahme basierend auf /JRC-01 13/, /EOLB-01 08/, /APC-01 17/ - Spez. Einsparpotenzial Strom (Stromverbrauch für Sauerstofferzeugung): -29 kWh/t Glas, Annahme basierend auf /SUE-01 09/ - Anwendungsfaktor: 90 %, Annahme basierend auf /JRC-01 13/

Tabelle 4-11: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Flachglasherstellung

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Gemenge- und Scherben-vorwärmung (Gemenge-bereitung)	Während Gemenge sowie Scherben normalerweise kalt in die Schmelzwanne eingebracht werden, können durch deren Vorwärmung mit Abgasen signifikante Energieeinsparungen realisiert werden. Die Vorwärmungstemperaturen liegen überwiegend im Temperaturbereich von 275-325 °C. /JRC-01 13 /	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a - Spez. Einsparpotenzial Strom: 15 kWh/t Glas /JRC 01 13/, /EOLB 01 08/ (Annahme, dass 15 % der Glasschmelzen für Flachglas in Deutschland elektrisches Boosting einsetzen) Spez. Einsparpotenzial Wärme: 112 kWh/t Glas /OVE-01 09/, /JRC-01 13/, /EOLB-01 08/, /VIN-01 16/ Anwendungsquote: 100 % basierend auf /EOLB-01 08/
Erhöhung Scherbeneinsatz (Gemenge-bereitung)	Aufgrund der bereits vollendeten chemischen Reaktion bei der Glasbildung benötigen Scherben weniger Schmelzenergie als Rohmaterialbestandteile. Außerdem ist die Masse des Gemenges von Scherben um ca. 20 % geringer als diese für Rohmaterial ist. Ein erhöhter Scherbenanteil geht daher mit einer Energieeinsparung einher. Als Faustformel wird in der Literatur häufig angegeben, dass die Schmelzenergie in der Wanne pro 10 % erhöhtem Scherbenanteil um 2 % reduziert werden kann. /JRC-01 13 /	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Wärme: 30 kWh/t Glas /EOLB-01 08/ (Annahme basierend auf /JRC-01 13/, dass der Scherbenanteil bei 40 % liegt und auf 50 % gesteigert werden kann) Anwendungsquote: 100 %
Abwärmenutzung zur Strom-erzeugung / Wärmerück-gewinnung (ORC) (Schmelzen)	Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/ Hier wird Abwärme aus der Glasschmelze verwendet. Das ORC-Potenzial hängt stark von den eingesetzten Brennern ab. Durch den Einsatz rekuperativer Brenner sinken die Abgas-temperaturen von ca. 1.300 °C auf ca. 980 °C. Durch den Einsatz regenerativer Brenner sogar auf ca. 540-320 °C. /ISI-08 13/, /GLIN-01 16/	Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Strom: 84 kWh/t Glas /CAM-01 13/ Anwendungsquote: 100 % basierend auf /FIRE-01 14/

Substitution der Rohmaterialien (Gemenge-bereitung)	Durch die Substitution bestimmter Rohmaterialien der Glasschmelze kann die zur Schmelze notwendige Energie gesenkt werden. Dies kann beispielsweise durch den Ersatz von Aluminiumoxid durch Pyrophyllit, welches eine geringere Schmelzenthalpie besitzt, erfolgen. /MEE-01 13/, /SHA-01 16/	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Wärme: 75 kWh/t Glas Annahme basierend auf /MEE-01 13/, /SHA-01 16/ Anwendungsquote: 50 % basierend auf /JRC-01 13/ Annahme: Scherbenanteil liegt durch Erhöhung Scherbeneinsatz bei 50 %, damit können noch 50 % der Primärrohmaterialien substituiert werden
Optimiertes Brennerdesign (Oxy-fuel) (Schmelzen)	Grundsätzlich existieren in der Glasindustrie drei verschiedene Brennerdesigns. Neben rekuperativen und regenerativen fossil befeuerten (v.a. Erdgas) Anlagen mit Luftverbrennung, wird beim Oxy-fuel-Verfahren reiner Sauerstoff bei der Verbrennung eingesetzt. Außerdem gibt es auch Elektroglasschmelzen, welche allerdings überwiegend in der Spezialglasindustrie existieren. Auch Mischformen wie der kombinierte Einsatz fossiler Brennstoffe und Strom sind möglich (entweder fossil befeuert und mit elektrischem „Boosting“ oder umgekehrt). /JRC-01 13/, /HVG-01 07/ Oxy-Fuel-Brenner sind in der Flachglasindustrie nicht weit verbreitet /JRC-01 13/. In Deutschland werden keine Oxy-Fuel-Brenner eingesetzt. Das ausgewiesene Potenzial bezieht sich auf den Ersatz fossiler Brennersysteme mit Luftverbrennung durch Oxy-fuel-Systeme. Zusätzlicher Stromverbrauch, welcher zur Sauerstofferzeugung verwendet wird, muss berücksichtigt werden.	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a Herleitung: Spez. Einsparpotenzial Strom: -29 kWh/t Glas für die Sauerstofferzeugung, Annahme basierend auf /SUE-01 09/ Spez. Einsparpotenzial Wärme: 280 kWh/t Glas, Annahme basierend auf /JRC-01 13/, /EOLB-01 08/, /APC-01 17/ Anwendungsquote: 100%

Tabelle 4-12: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Primäraluminiumherstellung

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Magnetische Kompensation (Elektrolyse)	Die sehr hohe Stromstärke, welche bei der Schmelzflusselektrolyse angelegt wird, erzeugt starke Magnetfelder (Gleichstromfeld). Diese haben unter anderem einen störenden Einfluss auf das Betriebsverhalten der Elektrolysezelle, was zu einem steigenden Energieverbrauch führt. Ziel der magnetischen Kompensation ist es, durch ein entsprechendes Gegenfeld, den Einfluss des Prozessstroms möglichst zu neutralisieren. /FFE-34 17/, /JRC-01 15/	*Maximales technisches Potenzial: 300 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 1.070 kWh / t Primäraluminium /FFE-34 17/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FFE-34 17/
Wärmerück-gewinnung (ORC) - (Elektrolyse)	Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/ Hier werden die Abgas- und Seitenwand-Abwärme aus der Elektrolysewanne genutzt. Annahme: Das ausgewiesene Potenzial stellt den Energieanteil dar, welcher nicht gleichzeitig für interne Anwendungen wie Aluminiumoxid- oder Anodenvorwärmung benötigt wird bzw. danach noch zur Verfügung steht. Restliche Wärmequellen, wie Aluminium-Kühlwasser oder Kompressorenwärme, werden zur Deckung des internen Wärmebedarfs verwendet (z. B. Speisewasservorwärmung oder Raumwärmeerzeugung).	*Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 286 kWh / t Primäraluminium, Annahme basierend auf /NOWI-01 12/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FFE-34 17/
Wärmerück-gewinnung (ORC) – (Anodenbacken / Barrenkühlung)	Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/ Hier wird die Abgasabwärme des Anodenbrennens genutzt. Die Anoden werden, obwohl anderswo hergestellt, teilweise noch in den Aluminiumhütten fertig gebrannt /FFE-34 17/. Außerdem wird die Abwärme der Aluminiumbarren-Abkühlung berücksichtigt.	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 51 kWh / t Primäraluminium, Annahme basierend auf /NOWI-01 12/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FFE-34 17/

Optimierte Prozesssteuerung (durch Messtechnik) (Elektrolyse)	Die optimierte Prozesssteuerung umfasst ein Prozess- und Führungskonzept basierend auf moderner Messtechnik (sog. super-heat Messgeräte). Dadurch kann die Temperatur im Inneren der Elektrolysewanne in Echtzeit gemessen und geregelt werden. Hierdurch ergeben sich geringere Energieverbräuche. /FFE 34 17/	*Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Strom: 713 kWh / t Primäraluminium /FFE-34 17/ - Anwendungsfaktor: 37 % /FFE-34 17/
Bipolare Elektrolysezellen (Elektrolyse)	Gemeinsamer Einsatz von Inertanoden und benetzbaren Kathoden innerhalb der Elektrolysezelle. Inertanoden: Im Gegensatz zu den heutzutage verwendeten Anoden werden Inertanoden nicht verbraucht und eine CO_2-Verminderung durch den wegfallenden Anodenherstellungsprozess realisiert. (Forschung seit 1970) /WIE-01 15/ Benetzbare Kathoden: Durch benetzbare Kathoden kann der Anoden-Kathoden-Abstand und somit der Energieverbrauch der Elektrolyse verringert werden. (Forschung seit 1970) /KLIEN-01 14/	*Umsetzung im industriellen Maßstab sehr unwahrscheinlich /FFE 34 17/, lediglich als radikale Prozessverbesserung durch die Forschung möglich, daher kein technisches Einsparungspotenzial ausgewiesen*
Carbothermischer Herstellungs-prozess (Elektrolyse)	Stromsenkung der Aluminiumelektrolyse; Prozess noch im Entwicklungsstadium /KLIEN-01 14/	*Entwicklungsstadium /KLIEN-01 14/*
Flexibilisierung der Produktion (Elektrolyse)	Aufgrund des hohen Stromverbrauchs bietet die Primäraluminium-Elektrolyse großes Potenzial zur CO_2-Verminderung mittels Flexibilisierung. Die CO_2-Verminderung ergibt sich dadurch, dass der Energieverbrauch in Zeiten hoher Einspeisung von Erneuerbarer Energien erfolgt (hierzu muss allerdings die Emissionsberechnung dynamisch sein). Durch die Flexibilisierung entstehen bedeutende virtuelle Speicherkapazitäten. /FFE 34 17/ Allerdings finden Flexibilisierungsoptionen in der vorliegenden Studie keine Berücksichtigung als CO_2-Verminderungsmaßnahme.	*n.a.*

Tabelle 4-13: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Ammoniakherstellung

Kurzbezeichnung des Maßnahmenbündels	Beschreibung der Einzelmaßnahmen	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit des Maßnahmenbündels
Allgemeine Maßnahmen /IER-04 05/, /IIP-01 18/, /EU-04 07/	- höhere Prozessintegration bessere Prozesssteuerung und –wartung	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 2,22 GJ / Tonne Ammoniak - Anwendungsfaktor: 20 %
Kleine Verbesserungen des Reformers /ISI-05 13/, /IER-04 05/, /EU-04 07/	- Erweitertes Vorwärmen der Rohstoffe - Vorwärmen Verbrennungsluft - Verringerung des Dampf-Kohlenstoff-Verhältnisses - Neuausrichtung der Konvektionsrohrschlange und Hinzufügen von neuen Wärmetauscherflächen - Dampf zu C Verhältnis verringern, Strahlung erhöhen	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 1,4 GJ / Tonne Ammoniak - Anwendungsfaktor: 20 %
Große Verbesserungen des Reformers /IER-04 05/, /IIP-01 18/, /EU-04 07/	- Gasturbine der 2. Generation - Modifizierung der Brenner im Ofen - Pre-reforming in Kombination mit einem geeigneten Dampfeinsparprojekt/ Adiabatischer pre-reformer - Substitution von Kohle- durch Erdgasturbinen - Abgaswärmerückgewinnung	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 4 GJ / Tonne Ammoniak - Anwendungsfaktor: 10 %
Verbesserung der Synthese /IER-04 05/, /IIP-01 18/, /EU-04 07/, /ISI-05 13/	- Verwendung kleinerer Katalysatorenpartikel in der Ammoniak Synthese - Niederdruck Katalysator - Flüssig-Stickstoffwäscher im letzten Aufbereitungsschritt - Indirekte Kühlung des Reaktors in der Ammoniak Synthese - Wasserstoff-Rückgewinnung am Synthesegas - Rückgewinnung des NH3 aus dem Prozesskondensat, z. B. durch Stripping - Verwendung von Turboverdichtern in Verbindung mit Dampfturbinen - Bessere Konfiguration des Ammoniak Synthese Reaktors - Verbesserte Katalysatoren	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 1 GJ / Tonne Ammoniak - Anwendungsfaktor: 25 %

Verbesserte CO_2-Abscheidung /IIP-01 18/, /EU-04 07/	- Energieeinsparungen durch Verwendung fortschrittlicher Lösungsmittel, Druckwechselabsorption oder verbesserter Membranen	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 0,90 GJ / Tonne Ammoniak - Anwendungsfaktor: 30 %

Tabelle 4-14: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen im Steamcrackingprozess

Kurzbezeichnung des Maßnahmenbündels	Beschreibung der Einzelmaßnahmen	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit des Maßnahmenbündels
Allgemeine Maßnahmen /REN-01 14/, /CURRAS-01 10/	- Wärmerückgewinnung - Prozesssteuerung und Sensoren	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 0,39 GJ / t Ethylen - Anwendungsfaktor: 20 %
Verbesserung des Steam Crackers /REN-01 14/, /CURRAS-01 10/, /REN-01 06/	Pyrolyse Sektion: - Fortgeschrittenes Ofenmaterial - Verringerung von Koksentstehung und Erhöhung des Wärmeaustauschs - verbesserte Beschichtungen und Formen von Rohren und Spulen können als Katalysatoren wirken und die Ethylenausbeute erhöhen - Integration einer Gasturbine	*Maximales technisches Potenzial: 400 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 1,14 GJ / t Ethylen - Anwendungsfaktor: 40 %
Fortgeschrittene Destillationskolonnen /REN-01 14/, /CURRAS-01 10/, /REN-01 06/	- Wärmeintegrierte Destillationskolonnen mit Wärmepumpe	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 0,40 GJ / t Ethylen - Anwendungsfaktor: 20 %

Tabelle 4-15: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Chlorherstellung

Kurzbezeichnung des Maßnahmenbündels	Beschreibung der Einzelmaßnahmen	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit des Maßnahmenbündels
Wechsel von Amalgan-Verfahren zu Membranverfahren /ISI-05 13/	Substitution des Amalganverfahrens durch das Membranverfahren	*Maximales technisches Potenzial: 500 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 3,54 GJ / t Chlor - Anwendungsfaktor: 100 %
Wärmerückgewinnung /ISI-05 13/, /CURRAS-01 10/	Wärmerückgewinnung	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 0,12 GJ / t Chlor - Anwendungsfaktor: 20 %
Bessere Prozesssteuerung /ISI-05 13/, /CURRAS-01 10/	Installation moderner Prozessleitsyteme	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 0,35 GJ / t Chlor - Anwendungsfaktor: 20 %
Membran-Elektrolyse auf Basis der Sauerstoffverzehrkathode /ISI-05 13/, /CURRAS-01 10/, /JRC-03 14/	Umrüstung von Membran-Anlagen auf Sauerstoff-Verzehrkathoden-Technologie	*Maximales technisches Potenzial: 300 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 2,97 GJ / t Chlor - Anwendungsfaktor: 25 %
Wechsel von Diaphragma-Verfahren zu Membran-Verfahren /ISI-05 13/	Umrüstung der Diaphragma-Anlagen zu Membran-Anlagen	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 0,3 GJ / t Chlor - Anwendungsfaktor: 100 %

Verbessertes Membran-Verfahren /ISI-05 13/	Umrüstung bestehender Membran-Anlagen auf die neuere Membrangeneration	*Maximales technisches Potenzial: 300 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 0,65 GJ / t Chlor - Anwendungsfaktor: 100 %

Tabelle 4-16: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Methanolherstellung

Kurzbezeichnung des Maßnahmenbündels	Beschreibung der Einzelmaßnahmen	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit des Maßnahmenbündels
Allgemeine Maßnahmen /IER-04 05/, /IIP-01 18/, /EU-04 07/	Ziel der allgemeinen Maßnahmen ist eine höhere Prozessintegration, bessere Prozesssteuerung und Wartungen	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 2,22 GJ / Tonne Methanol - Anwendungsfaktor: 20 %
Kleine Verbesserungen des Reformers /ISI-05 13/, /IER-04 05/, /EU-04 07/	- Erweitertes Vorwärmen der Rohstoffe (Kohlenwasserstoffe) - Vorwärmen der Verbrennungsluft - Verringerung des Dampf/Kohlenstoff-Verhältnisses, - Neuausrichtung der Konvektionsrohrschlange und Hinzufügen von neuen Wärmetauscherflächen - Dampf zu C Verhältnis verringern, Strahlung erhöhen	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 1,4 GJ / Tonne Methanol - Anwendungsfaktor: 20 %
Große Verbesserungen des Reformers /IER-04 05/, /IIP-01 18/, /EU-04 07/	- Gasturbine der 2. Generation einbauen - Modifizierung der Brenner im Ofen - Pre-reforming in Kombination mit einem geeigneten Dampfeinsparprojekt / Adiabatischer pre-reformer - Substitution Kohle- durch Erdgasturbine Abgaswärmerückgewinnung	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 4 GJ / Tonne Methanol - Anwendungsfaktor: 10 %
Verbesserte CO_2-Abscheidung /IIP-01 18/, /EU-04 07/	Energieeinsparungen durch Nutzung fortschrittlicher Membranen, Lösungsmittel oder durch Druckwechselabsorption	*Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2/a* *Herleitung:* - Spez. Einsparpotenzial Energie: 0,90 GJ / Tonne Methanol - Anwendungsfaktor: 30 %

Tabelle 4-17: Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Effizienzmaßnahmen in der Polyethylenherstellung

Kurzbezeichnung des Maßnahmenbündels	Beschreibung der Einzelmaßnahmen	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit des Maßnahmenbündels
Reaktor mit Statikmischer /CURRAS-01 10/, /UBP-01 03/	Statische Mischreaktoren erhöhen den Wärme- und Stoffaustausch während der Polymerisation, indem sie die Durchmischung bei unterschiedlichen Strömungsverhältnissen verbessern.	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2-Äq/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Strom: 1.070 kWh / t Polyethylen - Anwendungsfaktor: 22 %
Allgemeine Maßnahmen /ISI-05 13/, /CURRAS-01 10/	Beinhaltet unter anderem eine bessere Prozesssteuerung - Moderne Prozessleitsyteme	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2-Äq/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Strom: 286 kWh / t Polyethylen - Anwendungsfaktor: 20 %
Wärmerückgewinnung /CURRAS-01 10/	Verbesserte Wärmerückgewinnung	Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO_2-Äq/a Herleitung: - Spez. Einsparpotenzial Energie: 51 kWh / t Polyethylen - Anwendungsfaktor: 20 %

Tabelle 4-18 Herleitung des maximalen technischen CO_2-Verminderungspotenzials und der Zukunftsfähigkeit der prozessspezifischen Verfahrensroutenwechsel, Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel und CO_2-Abscheidung

Kurzbezeichnung des Maßnahmenbündels	Beschreibung der Einzelmaßnahmen	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit des Maßnahmenbündels
Verfahrensroutenwechsel Primär- zu Sekundärstahl	Die Substitution der Hochofen- durch die Sekundärstahlroute ermöglicht die Vermeidung von energie- und prozessbedingten Emissionen. Details zu den Verfahrensrouten können /OTTO-01 17/ und /BCG-01 13/ entnommen werden. Eine vollständige Substitution ist aufgrund unzureichender Schrottverfügbarkeit (auch bis 2050) nicht möglich.	Maximales technisches Potenzial: 17 Mt CO_2-Äq/a (energiebedingte- und prozessbedingte Emissionen) Herleitung /OTTO-01 17/, /BCG-01 13/, /UBA-02 17/, /WVS-01 16/: - Annahme: Strom und synthetisches Methan werden emissionsfrei zur Verfügung gestellt - Spez. Einsparpotenzial Strom: -0,34 MWh/$t_{Rohstahl}$ - Spez. Einsparpotenzial Brennstoffe: 4,7 MWh/$t_{Rohstahl}$ - Spez. Einsparpotenzial proz. Emissionen: 0,48 t CO_2/ $t_{Rohstahl}$ - Anwendungsfaktor (Annahme): 50 % der gesamten Stahlproduktionsmenge 2015 wird bis 2050 durch die Sekundärroute bereitgestellt
Verfahrensroutenwechsel Primär- zu Direktreduktionsstahl	Die Substitution der Hochofen- durch die Direktreduktionsroute ermöglicht die Vermeidung von energie- und prozessbedingten Emissionen. Details zu den Verfahrensrouten können /OTTO-01 17/ und /BCG-01 13/ entnommen werden.	Maximales technisches Potenzial: 61 kt CO_2-Äq/a (energiebedingte- und prozessbedingte Emissionen) Herleitung /OTTO-01 17/, /BCG-01 13/, /UBA-02 17/, /WVS-01 16/, /BUW-02 14/: - Annahme: Strom und synthetisches Methan werden emissionsfrei zur Verfügung gestellt - Spez. Einsparpotenzial Strom: -0,5 MWh/$t_{Rohstahl}$ - Spez. Einsparpotenzial Brennstoffe: 0,8 MWh/$t_{Rohstahl}$ - Spez. Einsparpotenzial proz. Emissionen: 0,43 t CO_2/ $t_{Rohstahl}$ - Anwendungsfaktor (Annahme): 100 % der Primärstahlproduktion 2015 bis 2050

Verfahrensroutenwechsel Hohlglas	Substitution der fossil befeuerten Hohlglasschmelze durch eine vollelektrische Schmelzeinheit (VES). Geringere Kapazitäten der VES ggü. des fossilen Schmelzaggregates werden nicht als technisches Hemmnis gewertet. Es wird angenommen, dass mit Zeithorizont 2050 sämtliche Glasqualitäten auch elektrisch hergestellt werden können. /FFE-18 19/	Maximales technisches Potenzial: 2 Mt CO_2-Äq/a (energiebedingte- und prozessbedingte Emissionen) Herleitung /EOLB-01 08/, /BVG-01 15/, /AGEB-01 16/, /ISI-05 13/: - Annahme: Strom und synthetisches Methan werden emissionsfrei zur Verfügung gestellt - Spez. Einsparpotenzial Strom: -0,9 MWh/$t_{Hohlglas}$ - Spez. Einsparpotenzial Brennstoffe: 1,6 MWh/ $t_{Hohlglas}$ - Anwendungsfaktor (Annahme): 100 % der Hohlglasproduktion
Verfahrensroutenwechsel Flachglas	Substitution der fossil befeuerten Flachglasschmelze durch eine vollelektrische Schmelzeinheit (VES). Geringere Kapazitäten der VES ggü. des fossilen Schmelzaggregates werden nicht als technisches Hemmnis gewertet. Es wird angenommen, dass mit Zeithorizont 2050 sämtliche Glasqualitäten auch elektrisch hergestellt werden können. /FFE-18 19/	Maximales technisches Potenzial: 1,6 Mt CO_2-Äq/a (energiebedingte- und prozessbedingte Emissionen) Herleitung /EOLB-01 08/, /BVG-02 15/, /AGEB-01 16/, /ISI-05 13/, /UBA-03 16/, /OVE-01 19, /IETD-03 17/, /USL-01 17/: - Annahme: Strom und synthetisches Methan werden emissionsfrei zur Verfügung gestellt - Annahme: keine Reduktion prozessbedingter Emissionen - Spez. Einsparpotenzial Strom: -0,5 MWh/$t_{Flachglas}$ - Spez. Einsparpotenzial Brennstoffe: 1,8 MWh/$t_{Flachglas}$ - Anwendungsfaktor (Annahme): 100 % der Flachglasproduktion
Post-combustion CO_2-Abscheidung Stahl /DENA-05 17/	Das CO_2 im Abgasstrom des Drehrohrofens wird durch eine Rauchgaswäsche abgetrennt. Hierzu wird das Abgas im Gegenstromverfahren mit einem Waschmittel in Berührung gebracht welches das CO_2 absorbiert. Das CO_2 im Waschmittel wird im Anschluss durch einen thermischen Desorptionsprozess abgetrennt und steht als konzentrierte Strom zur Verfügung.	Maximales technisches Potenzial: 20 Mt CO_2-Äq/a (energiebedingte- und prozessbedingte Emissionen) Herleitung: - Abscheiderate: 31 % - Spez. Einsparpotenzial Strom: -0,048 $t_{Rohstahl}$ - Spez. Einsparpotenzial Brennstoffe: -0,59 $t_{Rohstahl}$ - Anwendungsfaktor: 100 %

Post-combustion CO_2-Abscheidung Zement /DENA-05 17/	Das CO_2 im Abgasstrom des Hochofens wird durch eine Rauchgaswäsche abgetrennt. Hierzu wird das Abgas im Gegenstromverfahren mit einem Waschmittel in Berührung gebracht welches das CO_2 absorbiert. Das CO_2 im Waschmittel wird im Anschluss durch einen thermischen Desorptionsprozess abgetrennt und steht als konzentrierte Strom zur Verfügung.	Maximales technisches Potenzial: 17 Mt CO_2-Äq/a (energiebedingte- und prozessbedingte Emissionen) Herleitung: - Abscheiderate: 80 % - Spez. Einsparpotenzial Strom: -0,008 t_{Zement} - Spez. Einsparpotenzial Brennstoffe: -0,24 t_{Zement} - Anwendungsfaktor: 100 %
Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel Zement /FFE-21 18/	Es erfolgt der Austausch des Brenners am Drehrohrofen, sodass Erdgas verfeuert werden kann (Erdgas- oder multi-fuel Brenner). Die Substitution erfolgt vor dem Hintergrund, dass in Zukunft synthetisches Methan im Drehrohrofen eingesetzt werden kann.	Maximales technisches Potenzial: 10 Mt CO_2-Äq/a (energiebedingte Emissionen) Herleitung: - Substitution fossiler Energieträger durch synthetisches Methan - Anwendungsfaktor: 20 %
Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel Kalk /FFE-21 18/	Es erfolgt der Austausch des Brenners am Schachtofen, sodass Erdgas verfeuert werden kann (Erdgas- oder multi-fuel Brenner). Die Substitution erfolgt vor dem Hintergrund, dass in Zukunft synthetisches Methan im Drehrohrofen eingesetzt werden kann.	Maximales technisches Potenzial: 3 Mt CO_2-Äq/a (energiebedingte Emissionen) Herleitung: - Substitution fossiler Energieträger durch synthetisches Methan - Anwendungsfaktor: 65 %

4.3 Technoökonomische Parameter

	Referenzszenario				FuEl95			
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Milch	13.934	13.686	13.672	13.654	13.934	13.686	13.672	13.654
Papier	22.743	23.028	23.080	23.668	22.743	23.028	23.080	23.668
Zellstoff	1.299	1.053	884	761	1.299	1.053	884	761
Altpapier	15.467	16.215	16.525	17.380	15.467	16.215	16.525	17.380
Steamcracking	12.588	13.527	14.698	15.874	12.588	13.527	14.698	15.874
Polyethylen	3.070	3.299	3.626	4.008	3.070	3.299	3.626	4.008
Methanol	941	941	941	941	941	941	941	941
Ammoniak	3.255	3.172	3.153	3.142	3.255	3.172	3.153	3.142
Chlor	4.703	4.848	4.857	4.849	4.703	4.848	4.857	4.849
Hochglas	4.391	4.535	4.675	4.845	4.391	3.207	1.133	-
Flachglas	1.819	1.878	1.936	2.007	1.819	1.147	-	-
Elektrohohlglas	-	-	-	-	-	1.328	3.542	4.845
Elektroflachglas	-	-	-	-	-	731	1.936	2.007
Zement	31.104	30.175	29.541	28.916	31.104	30.175	29.541	28.916
Ziegel	10.936	10.609	10.291	9.891	10.936	10.609	10.291	9.891
Kalk	6.605	6.513	6.512	6.482	6.605	6.513	6.512	6.482
Primärstahl	26.249	23.456	21.438	20.008	26.249	15.847	1.430	-
Sekundährstahl	13.693	13.285	12.964	12.780	13.693	17.089	22.968	22.784
H2-Stahl	-	-	-	-	-	3.804	10.004	10.004
Primäraluminium	439	381	349	323	439	381	349	323
Primärkupfer	397	397	397	397	397	397	397	397
Sekundärkupfer	281	281	281	281	281	281	281	281

Abbildung 4-1: Produktionsmengen der hinterlegten energie- und emissionsintensiven Prozesse in der Industrie /BMUB-06 15/

4.3.1 Querschnittstechnologien

Die Maßnahmen und deren Potenziale zur CO_2-Verminderung wurden aus Primärdaten der FfE abgeleitet. Ihnen zugrunde liegen ca. 150 Energieaudits und ca. 2500 Einzelmaßnahmen, die innerhalb der vergangen 10 Jahre erhoben wurden. Die Anzahl der Betriebe wurde basierend auf /DESTATIS-21 16/ hergeleitet.

Tabelle 4-19: Effizienzmaßnahmen, Jahre 2015-2050

	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	Investition Differenz	Anzahl Betrieb	Anwen-dungs-faktor
	a	MWh/ (Betriebxa)	€/Betrieb	Stück	AWF
Tausch Hochdruckentladungslampen gegen LED	10	21	7.400	45.406	0,16
Tausch Leuchtstoffröhren gegen LED	10	64	105.100	45.406	0,58
Beleuchtung – Steuerungstechnische Optimierung	15	63	18.600	45.406	0,7

Druckluft – WRG	15	187	16.900	18.974	0,36
Absenkung des Druckniveaus	15	14	400	45.406	0,53
Behebung von Druckluftleckagen	1	18	1.300	45.406	0,99
Austausch einer einfachen Steuerung für Kompressoren gegen eine intelligente Steuerung für Kompressoren	10	45	3.000	18.974	0,48
Effizientere Druckluftkompressoren	15	82	17.200	18.974	0,41
Elektrische Antriebe (alle nichtgenannten) – Steuerungstechnische Optimierung (inkl. FU)	15	204	16.400	45.406	0,49
Servervirtualisierung	15	67	4.500	45.406	0,71
Effizientere EDV-Geräte	5	10	10.200	45.406	0,38
Effizientere Kompressionskältemaschine (inkl. freie Kühlung, ggf. mit FU)	15	114	28.400	9.664	0,54
Kälte - WRG	15	136	24.500	9.664	0,33
Optimierte Kälteverteilung	15	188	2.300	9.664	0,73
Lüftung – Steuerungstechnische Optimierung	25	77	3.100	29.198	0,43
Lüftung – effizientere Antriebe	15	57	1.900	29.198	0,52
Lüftung – effizientere Kraftübertragung	5	19	300	29.198	0,57

Lüftung – WRG	25	531	50.300	4.618	0,27
Kompletterneuerung Lüftungsanlage	15	104	37.500	29.198	0,28
Dämmung Wärmeverteilung	20	144	5.500	4.618	0,22
Effizientere fossiler Wärmeerzeuger	25	136	72.400	45.406	0,54
WRG NT-Wärmeerzeugung	20	631	94.700	4.618	0,57

Tabelle 4-20: Niedertemperatur-Energieträgerwechsel, Jahre 2015-2050

		Komplettaustausch von fossilen Wärme-erzeugern gegen eine Hackschnitzel-anlage für NT-Wärme <240 °C	Komplettaustausch von fossilen Wärme-erzeugern gegen Elektroden-kessel für NT-Wärme 100°C bis 240 °C	Komplettaustausch eines fossilen Wärme-erzeugers gegen eine Wärme-pumpe für NT-Prozesswärme <100°C	Komplettaustausch eines fossilen Wärme-erzeugers gegen eine Wärmepumpe für Rw&WW
Energieträger Referenz	-	Brennstoff, fossil	Brennstoff, fossil	Brennstoff, fossil	Brennstoff, fossil
Energieträger Premium	-	Strom	Strom	Strom	Strom
Lebensdauer Referenz	a	25	25	25	25
Lebensdauer Premium	a	20	20	20	20
Nutzungsgrad Referenz	-	0,97	0,97	0,97	0,97
Nutzungsgrad Premium	-	0,9	1	3,5	3,5
Investition Referenz	€/Betrieb	264.000	95.000	133.000	16.000
Investition Premium	€/Betrieb	590.000	250.000	260.000	38.000
Anzahl Betriebe	Stück	45.406	3.671	8.138	45.406
Wärmebedarf im Ist-Szenario (2015)	MWh_th/ Betrieb*a	2.000	7.690	7.690	850
Leistung	kW	1.000	1.500	1.000	200
AWF	%	86			

4.3.2 Prozesse - Effizienzmaßnahmen

4.3.2.1 Metallerzeugung

Tabelle 4-21: Prozess: Hochofen, Maßnahme: Opti. Wärmetausch. Winderhitzer

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	Kt
Quelle			/WVS-02 17/	/FFE-36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	30	36	2.913	0,1	29.133
2020		30	36	2.625	0,1	26.249
2030		30	36	2.346	0,1	23.456
2040		30	36	2.144	0,1	21.438
2050		30	36	2.001	0,1	20.008

Tabelle 4-22: Prozess: Hochofen, Maßnahme: TopGasRecycling

	Energie-träger	Lebensd auer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsme nge	Anwendun gsfaktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/BCG 01 13/	/FFE 36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	15	556	15.732	0,54	29.133
2020		15	556	14.174	0,54	26.249
2030		15	556	12.666	0,54	23.456
2040		15	556	11.577	0,54	21.438
2050		15	556	10.804	0,54	20.008

Tabelle 4-23: Prozess: Hochofen, Maßnahme: Opti. Sinter-Pellet-Ratio

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/BCG-01 13/	/FFE-36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	20	333	29.133	1,0	29.133
2020		20	333	26.249	1,0	26.249
2030		20	333	23.456	1,0	23.456
2040		20	333	21.438	1,0	21.438
2050		20	333	20.008	1,0	20.008

Tabelle 4-24: Prozess: Hochofen, Maßnahme: H2-reiche Reduktionsmittel

	Energieträger	Lebensdauer	spezifische Einsparung Strom	spezifische Einsparung Brennstoffe	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/EAEID-01 13/, /BCG-01 13/		/FFE-36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	20	19	164	29.133	1,0	29.133
2020		20	19	164	26.249	1,0	26.249
2030		20	19	164	23.456	1,0	23.456
2040		20	19	164	21.438	1,0	21.438
2050		20	19	164	20.008	1,0	20.008

Tabelle 4-25: Prozess: Hochofen, Maßnahme: Konvertergasrecycling

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/MOYA-01 13/, /VILL-01 12/, /BCG-01 13/	/FFE-36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	10	139	11.653	0,4	29.133
2020		10	139	10.500	0,4	26.249
2030		10	139	9.382	0,4	23.456
2040		10	139	8.575	0,4	21.438
2050		10	139	8.003	0,4	20.008

Tabelle 4-26: Prozess: Hochofen, Maßnahme: Abwärmeverstromung Konverter

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FFE-36 17/	/FFE-36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	15	22	8.740	0,3	29.133
2020		15	22	7.875	0,3	26.249
2030		15	22	7.037	0,3	23.456
2040		15	22	6.431	0,3	21.438
2050		15	22	6.002	0,3	20.008

Tabelle 4-27: Prozess: EAF, Maßnahme: Abwärmeverstromung

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/TUR-01 16/, /CAM-01 13/, /FFE-36 17/	/FFE-36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	30	22	12.176	0,9	13.235
2020		30	22	12.598	0,9	13.693
2030		30	22	12.222	0,9	13.285
2040		30	22	11.927	0,9	12.964
2050		30	22	11.758	0,9	12.780

Tabelle 4-28: Prozess: EAF, Maßnahme: Aufrüstung Pfannenfeuer

	Energie-träger	Lebensdauer	spezifische Einsparung Strom	spezifische Einsparung Brennstoffe	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FFE-36 17/, /LSW-01 15/		/FFE-36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	20	-0,24	1,21	6.618	0,50	13.235
2020		20	-0,24	1,21	6.847	0,50	13.693
2030		20	-0,24	1,21	6.643	0,50	13.285
2040		20	-0,24	1,21	6.482	0,50	12.964
2050		20	-0,24	1,21	6.390	0,50	12.780

Tabelle 4-29: Prozess: EAF, Maßnahme: Schrottvorwärmung Abwärme

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/MOYA-01 13/, /VILL-01 12/, /EAEID-01 13/	/FFE-36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	10	81	13235	1,00	13.235
2020		10	81	13693	1,00	13.693
2030		10	81	13285	1,00	13.285
2040		10	81	12964	1,00	12.964
2050		10	81	12780	1,00	12.780

Tabelle 4-30: Prozess: EAF, Maßnahme: Prozessopti.

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/BCG-01 13/	/FFE-36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	20	46	10588	0,8	13.235
2020		20	46	10954,4	0,8	13.693
2030		20	46	10628	0,8	13.285
2040		20	46	10371,2	0,8	12.964
2050		20	46	10224	0,8	12.780

4.3.2.2 Verarbeitung v. St. u. Er. (Zement)

Tabelle 4-31: Prozess: Rohmaterialaufbereitung, Maßnahme: Ersatz Kugelmühlen

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-03 14/, /FEA-01 16/, /FFE-22 17/, /BLESL-01 13/, /MKULNV-01 13/	/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	20	11	18506,64	0,58	31.908
2020		20	11	18040,32	0,58	31.104
2030		20	11	17501,5	0,58	30.175
2040		20	11	17133,78	0,58	29.541
2050		20	11	16771,28	0,58	28.916

Tabelle 4-32: Prozess: Rohmaterialaufbereitung, Maßnahme: Ersatz Transportsysteme

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-03 14/, /FEA-01 16/	/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	20	3	18187,56	0,57	31.908
2020		20	3	17729,28	0,57	31.104
2030		20	3	17199,75	0,57	30.175
2040		20	3	16838,37	0,57	29.541
2050		20	3	16482,12	0,57	28.916

Tabelle 4-33: Prozess: Rohmaterialaufbereitung, Maßnahme: Schwerkraft-Homogenisierung

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-03 14/, /FEA-01 16/	/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	25	3	19782,96	0,62	31.908
2020		25	3	19284,48	0,62	31.104
2030		25	3	18708,5	0,62	30.175
2040		25	3	18315,42	0,62	29.541
2050		25	3	17927,92	0,62	28.916

Tabelle 4-34: Prozess: Brennen, Maßnahme: Abwärme Drehrohrofen

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/BLESL-01 13/, /CAM 01 13/, /IER-03 14/, /FEA-01 16/, /EOLB-03 08/	/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	20	9	13.401	0,42	31.908
2020		20	9	13.064	0,42	31.104
2030		20	9	12.674	0,42	30.175
2040		20	9	12.407	0,42	29.541
2050		20	9	12.145	0,42	28.916

Tabelle 4-35: Prozess: Brennen, Maßnahme: Opti. Prozesssteuerung

	Energieträger	Lebensdauer	spezifische Einsparung Strom	spezifische Einsparung Brennstoffe	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-03 14/, /FEA-01 16/		/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	10	2	32,2	6381,60	0,20	31.908
2020		10	2	32,2	6220,80	0,20	31.104
2030		10	2	32,2	6035,00	0,20	30.175
2040		10	2	32,2	5908,20	0,20	29.541
2050		10	2	32,2	5783,20	0,20	28.916

Tabelle 4-36: Prozess: Brennen, Maßnahme: Retrofit Precalcinatoren

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-03 14/, /FEA-01 16/	/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	40	119,4	20.740	0,65	31.908
2020		40	119,4	20.218	0,65	31.104
2030		40	119,4	19.614	0,65	30.175
2040		40	119,4	19.202	0,65	29.541
2050		40	119,4	18.795	0,65	28.916

Tabelle 4-37: Prozess: Brennen, Maßnahme: Ersatz Lepol-Öfen

	Energieträger	Lebensdauer	spezifische Einsparung Strom	spezifische Einsparung Brennstoffe	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-03 14/, /FEA-01 16/		/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	40	5	250	638,16	0,02	31.908
2020		40	5	250	622,08	0,02	31.104
2030		40	5	250	603,50	0,02	30.175
2040		40	5	250	590,82	0,02	29.541
2050		40	5	250	578,32	0,02	28.916

Tabelle 4-38: Prozess: Mahlen inkl. Kühlung und Veredelung, Maßnahme: Ersatz Drehkühler

	Energieträger	Lebensdauer	spezifische Einsparung Strom	spezifische Einsparung Brennstoffe	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-03 14/, /FEA-01 16/, /EOLB-03 08/		/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	20	-3	65	5105,28	0,16	31.908
2020		20	-3	65	4976,64	0,16	31.104
2030		20	-3	65	4828,00	0,16	30.175
2040		20	-3	65	4726,56	0,16	29.541
2050		20	-3	65	4626,56	0,16	28.916

Tabelle 4-39: Prozess: Mahlen inkl. Kühlung und Veredelung, Maßnahme: Modernisierung Rostkühler

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-03 14/, /FEA-01 16/, /MKULNV-01 13/	/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	20	7	5.105	0,16	31.908
2020		20	7	4.977	0,16	31.104
2030		20	7	4.828	0,16	30.175
2040		20	7	4.727	0,16	29.541
2050		20	7	4.627	0,16	28.916

Tabelle 4-40: Prozess: Mahlen inkl. Kühlung und Veredelung, Maßnahme: Retrofit Zyklone

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-03 14/, /FEA-01 16/	/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	20	3	18.188	0,57	31.908
2020		20	3	17.729	0,57	31.104
2030		20	3	17.200	0,57	30.175
2040		20	3	16.838	0,57	29.541
2050		20	3	16.482	0,57	28.916

Tabelle 4-41: Prozess: Mahlen inkl. Kühlung und Veredelung, Maßnahme: Ersatz Kugelmühlen (Mahlen)

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FFE-22 17/, /IER-03 14/, /FEA-01 16/	/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	20	26	17.868	0,56	31.908
2020		20	26	17.418	0,56	31.104
2030		20	26	16.898	0,56	30.175
2040		20	26	16.543	0,56	29.541
2050		20	26	16.193	0,56	28.916

Tabelle 4-42: Prozess: Mahlen inkl. Kühlung und Veredelung, Maßnahme: Hocheffiziente Separatoren

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-03 14/, /FEA-01 16/	/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	20	4	19.464	0,61	31.908
2020		20	4	18.973	0,61	31.104
2030		20	4	18.407	0,61	30.175
2040		20	4	18.020	0,61	29.541
2050		20	4	17.639	0,61	28.916

4.3.2.4 Verarbeitung v. St. u. Er.

Tabelle 4-43: Prozess: Kalkherstellung, Maßnahme: Effiz. Ofendesign (Kalk)

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-05 14/, /UBA-03 17/	/UBA-03 17/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	30	221	4.875	0,75	6.500
2020		30	221	4.954	0,75	6.605
2030		30	221	4.885	0,75	6.513
2040		30	221	4.884	0,75	6.512
2050		30	221	4.862	0,75	6.482

Tabelle 4-44: Prozess: Kalkherstellung, Maßnahme: Ersatz Mühlen

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/BMUB-04 16/	/IER-03 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	20	13	5.785	0,89	6.500
2020		20	13	5.878	0,89	6.605
2030		20	13	5.797	0,89	6.513
2040		20	13	5.796	0,89	6.512
2050		20	13	5.769	0,89	6.482

Tabelle 4-45: Prozess: Primäraluminiumherstellung, Maßnahme: Magnetische Kompensation

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FFE-34 17/	/FFE-34 17/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	-1	1.070	541	1	541
2020		-1	1.070	439	1	439
2030		-1	1.070	381	1	381
2040		-1	1.070	349	1	349
2050		-1	1.070	323	1	323

Tabelle 4-46: Prozess: Primäraluminiumherstellung, Maßnahme: Opti. Prozesssteuerung (2)

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FFE-34 17/	/FFE-34 17/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	10	713	200,71	0,371	541
2020		10	713	162,87	0,371	439
2030		10	713	141,35	0,371	381
2040		10	713	129,48	0,371	349
2050		10	713	119,83	0,371	323

Tabelle 4-47: Prozess: Primäraluminiumherstellung, Maßnahme: Abwärme Elektrolysezelle

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/NOWI-01 12/	/FFE-34 17/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	15	286	541	1,0	541
2020		15	286	439	1,0	439
2030		15	286	381	1,0	381
2040		15	286	349	1,0	349
2050		15	286	323	1,0	323

Tabelle 4-48: Prozess: Primäraluminiumherstellung, Maßnahme: Abwärme Anodenkühlung etc.

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/NOWI-01 12/	/FFE-34 17/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	15	51	541	1,0	541
2020		15	51	439	1,0	439
2030		15	51	381	1,0	381
2040		15	51	349	1,0	349
2050		15	51	323	1,0	323

4.3.2.5 Papiergewerbe

Tabelle 4-49: Prozess: Zellstoffherstellung, Maßnahme: Schwarzlaugevergasung

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FLEI-01 12/, /EU-04 15/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	20	478	1341	1,0	1341
2020		20	478	1299	1,0	1299
2030		20	478	1053	1,0	1053
2040		20	478	884	1,0	884
2050		20	478	761	1,0	761

Tabelle 4-50: Prozess: Altpapierstoffherstellung, Maßnahme: Hochkonsistenzstoffauflösung

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/EU-04 15/, /EANRW-01 1/, /FLEI-01 12/	FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	10	7	10571,4	0,7	15102
2020		10	7	10826,9	0,7	15467
2030		10	7	11350,5	0,7	16215
2040		10	7	11567,5	0,7	16525
2050		10	7	12166	0,7	17380

Tabelle 4-51: Prozess: Altpapierstoffherstellung, Maßnahme: Effiziente Siebung

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/EU-04 15/, /FLEI-01 12/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	10	12	12081,6	0,8	15102
2020		10	12	12373,6	0,8	15467
2030		10	12	12972	0,8	16215
2040		10	12	13220	0,8	16525
2050		10	12	13904	0,8	17380

Tabelle 4-52: Prozess: Altpapierstoffherstellung, Maßnahme: Abwärme Bleiche

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/EU-04 15/, /FLEI-01 12/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	20	8	12081,6	0,8	15102
2020		20	8	12373,6	0,8	15467
2030		20	8	12972	0,8	16215
2040		20	8	13220	0,8	16525
2050		20	8	13904	0,8	17380

Tabelle 4-53: Prozess: Altpapierstoffherstellung, Maßnahme: Opti. Deinking Verfahren

	Energieträger	Lebensdauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge	Betriebskostenänderung
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt	€/t
Quelle			/FLEI-01 12/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/	
2015	Strom	10	14	15102	1,0	15102	-0,10
2020		10	14	15467	1,0	15467	-0,10
2030		10	14	16215	1,0	16215	-0,10
2040		10	14	16525	1,0	16525	-0,10
2050		10	14	17380	1,0	17380	-0,10

Tabelle 4-54: Prozess: Altpapierstoffherstellung, Maßnahme: Effiziente Disperger

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FLEI-01 12/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	15	6	10571,4	0,7	15102
2020		15	6	10826,9	0,7	15467
2030		15	6	11350,5	0,7	16215
2040		15	6	11567,5	0,7	16525
2050		15	6	12166	0,7	17380

Tabelle 4-55: Prozess: Papierherstellung, Maßnahme: Effiziente Refiner

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FLEI-01 12/, /EU-04 15/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	10	33	21470,95	0,95	22601
2020		10	33	21605,85	0,95	22743
2030		10	33	21876,6	0,95	23028
2040		10	33	21926	0,95	23080
2050		10	33	22484,6	0,95	23668

Tabelle 4-56: Prozess: Papierherstellung, Maßnahme: Opti. Refiner

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FLEI-01 12/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	5	20,8	15820,7	0,70	22601
2020		5	20,8	15920,1	0,70	22743
2030		5	20,8	16119,6	0,70	23028
2040		5	20,8	16156	0,70	23080
2050		5	20,8	16567,6	0,70	23668

Tabelle 4-57: Prozess: Papierherstellung, Maßnahme: Chemische Fasermodifikation

	Energieträger	Lebensdauer	spezifische Einsparung Strom	spezifische Einsparung Brennstoffe	anwendbare Produktionsmenge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge	Betriebskosten-änderung
Einheit	-	a	kWh/t	kWh/t	kt	-	kt	€/t
Quelle			/FLEI-01 12/		/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/	
2015	Strom & Brennstoffe	20	46	51	22601,00	1,00	22601	3,40
2020		20	46	51	22743,00	1,00	22743	3,40
2030		20	46	51	23028,00	1,00	23028	3,40
2040		20	46	51	23080,00	1,00	23080	3,40
2050		20	46	51	23668,00	1,00	23668	3,40

Tabelle 4-58: Prozess: Papierherstellung, Maßnahme: Einsatz Dampfblaskasten

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FLEI-01 12/, /EU-04 15/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	15	50,0	8136,36	0,36	22601
2020		15	50,0	8187,48	0,36	22743
2030		15	50,0	8290,08	0,36	23028
2040		15	50,0	8308,8	0,36	23080
2050		15	50,0	8520,48	0,36	23668

Tabelle 4-59: Prozess: Papierherstellung, Maßnahme: Einsatz Schuhpressen

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FLEI-01 12/, /EU-04 15/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	20	152,0	9718,43	0,43	22601
2020		20	152,0	9779,49	0,43	22743
2030		20	152,0	9902,04	0,43	23028
2040		20	152,0	9924,4	0,43	23080
2050		20	152,0	10177,24	0,43	23668

Tabelle 4-60: Prozess: Papierherstellung, Maßnahme: Neue Trocknungsverfahren

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FLEI-01 12/, /EU-04 15/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	10	183,0	22601	1,00	22601
2020		10	183,0	22743	1,00	22743
2030		10	183,0	23028	1,00	23028
2040		10	183,0	23080	1,00	23080
2050		10	183,0	23668	1,00	23668

Tabelle 4-61: Prozess: Papierherstellung, Maßnahme: Abwärme Refiner, Trockenpartie

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FLEI-01 12/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	20	298,0	11300,5	0,50	22601
2020		20	298,0	11371,5	0,50	22743
2030		20	298,0	11514	0,50	23028
2040		20	298,0	11540	0,50	23080
2050		20	298,0	11834	0,50	23668

Tabelle 4-62: Prozess: Holzstoffherstellung, Maßnahme: WRG Bleiche Abwasser

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	Kt
Quelle			/FLEI-01 12/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	20	965,0	75,68	0,08	946
2020		20	965,0	71,10	0,08	889
2030		20	965,0	57,61	0,08	720
2040		20	965,0	48,35	0,08	604
2050		20	965,0	41,62	0,08	520

Tabelle 4-63: Prozess: Holzstoffherstellung, Maßnahme: Hocheffizientes Mahlen

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FLEI-01 12/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	-1	720,0	662,2	0,70	946
2020		-1	720,0	622,12	0,70	889
2030		-1	720,0	504,06	0,70	720
2040		-1	720,0	423,02	0,70	604
2050		-1	720,0	364,21	0,70	520

Tabelle 4-64: Prozess: Holzstoffherstellung, Maßnahme: Enzymatische Vorbehandlung

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/EU 04 15/, /FLEI-01 12/, /EOLB-01 09/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	15	517,0	283,8	0,30	946
2020		15	517,0	266,62	0,30	889
2030		15	517,0	216,02	0,30	720
2040		15	517,0	181,30	0,30	604
2050		15	517,0	156,09	0,30	520

Tabelle 4-65: Prozess: Holzstoffherstellung, Maßnahme: Eff. Refiner, Vorverd., Hobelsp

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/FLEI-01 12/, /EOLB-01 09/	/FLEI-01 12/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	15	431,0	265	0,28	946
2020		15	431,0	249	0,28	889
2030		15	431,0	202	0,28	720
2040		15	431,0	169	0,28	604
2050		15	431,0	146	0,28	520

4.3.2.6 Glas und Keramik

Tabelle 4-66: Prozess: Hohlglasherstellung, Maßnahme: Gemenge, Scherbenvorwärmung

	Energie-träger	Lebensdauer	spezifische Einsparung Strom	spezifische Einsparung Brennstoffe	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/OVE-01 09/,JRC-01 13/, /EOLB-01 08/, /VIN-01 16/		/OVE-01 09/		/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	12	45	112	1639,20	0,40	4098
2020		12	45	112	1756,40	0,40	4391
2030		12	45	112	1814,00	0,40	4535
2040		12	45	112	1870,00	0,40	4675
2050		12	45	112	1938,00	0,40	4845

Tabelle 4-67:Prozess: Hohlglasherstellung, Maßnahme: Scherbeneinsatz auf 80%

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/EOLB-01 08/	/JRC 01 13/, /BVG-01 14/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	99	56,0	3688,2	0,90	4098
2020		99	56,0	3951,9	0,90	4391
2030		99	56,0	4081,5	0,90	4535
2040		99	56,0	4207,5	0,90	4675
2050		99	56,0	4360,5	0,90	4845

Tabelle 4-68: Prozess: Hohlglasherstellung, Maßnahme: Abwärme Schmelze

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/GLIN-01 16/	/GLIN-01 16/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	15	28,0	4098	1,00	4098
2020		15	28,0	4391	1,00	4391
2030		15	28,0	4535	1,00	4535
2040		15	28,0	4675	1,00	4675
2050		15	28,0	4845	1,00	4845

Tabelle 4-69: Prozess: Hohlglasherstellung, Maßnahme: Subst. Rohmaterialien

	Energieträger	Lebensdauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge	Betriebskostenänderung
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt	€/t
Quelle			/MEE-01 13/	/MEE-01 13/, /SHA-01 16/, /FFE-36 17/		/BMUB-06 15/	
2015	Brennstoffe	99	24,0	819,6	0,20	4098	3,50
2020		99	24,0	878,2	0,20	4391	3,50
2030		99	24,0	907	0,20	4535	3,50
2040		99	24,0	935	0,20	4675	3,50
2050		99	24,0	969	0,20	4845	3,50

Tabelle 4-70: Prozess: Hohlglasherstellung, Maßnahme: Oxy Fuel Brenner

	Energie-träger	Lebensdauer	spezifische Einsparung Strom	spezifische Einsparung Brennstoffe	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/SUE-01 09/	/JRC-01 13/, /EOLB-01 08/, /APC-01 17/	/JRC-01 13/		/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	12	-29	270	3688,20	0,90	4098
2020		12	-29	270	3951,90	0,90	4391
2030		12	-29	270	4081,50	0,90	4535
2040		12	-29	270	4207,50	0,90	4675
2050		12	-29	270	4360,50	0,90	4845

Tabelle 4-71: Prozess: Flachglasherstellung, Maßnahme: Gemenge, Scherbenvorwärmung FG

	Energieträger	Lebensdauer	spezifische Einsparung Strom	spezifische Einsparung Brennstoffe	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/JRC 01 13/, /EOLB 01 08/	/OVE-01 09/, /JRC-01 13/, /EOLB-01 08/, /VIN-01 16/	/EOLB-01 08/		/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	12	15	112	2143,00	1,00	2.143
2020		12	15	112	1819,00	1,00	1.819
2030		12	15	112	1878,00	1,00	1.878
2040		12	15	112	1936,00	1,00	1.936
2050		12	15	112	2007,00	1,00	2.007

Tabelle 4-72: Prozess: Flachglasherstellung, Maßnahme: Scherbeneinsatz auf 50% FG

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/EOLB-01 08/, /JRC-01 13/	/EOLB-01 08/, /JRC-01 13/, /FFE-36 17/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	99	30,0	2143	1,00	2.143
2020		99	30,0	1819	1,00	1.819
2030		99	30,0	1878	1,00	1.878
2040		99	30,0	1936	1,00	1.936
2050		99	30,0	2007	1,00	2.007

Tabelle 4-73: Prozess: Flachglasherstellung, Maßnahme: Abwärme Schmelze FG

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/CAM-01 13/	/FIRE-01 14/		/BMUB-06 15/
2015	Strom	15	84,0	2143	1,00	2.143
2020		15	84,0	1819	1,00	1.819
2030		15	84,0	1878	1,00	1.878
2040		15	84,0	1936	1,00	1.936
2050		15	84,0	2007	1,00	2.007

Tabelle 4-74: Prozess: Flachglasherstellung, Maßnahme: Subst. Rohmaterialien FG

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/MEE 01 13/, /SHA 01 16/	/JRC-01 13/		/BMUB-06 15/
2015	Brennstoffe	99	75	1072	0,50	2.143
2020		99	75	910	0,50	1.819
2030		99	75	939	0,50	1.878
2040		99	75	968	0,50	1.936
2050		99	75	1004	0,50	2.007

Tabelle 4-75: Prozess: Flachglasherstellung, Maßnahme: Oxy Fuel Brenner FG

	Energieträger	Lebensdauer	spezifische Einsparung Strom	spezifische Einsparung Brennstoffe	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/SUE-01 09/	/JRC-01 13/, /EOLB-01 08/, /APC-01 17/	/JRC 01 13/		/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	12	-29	280	1928,70	1	2.143
2020		12	-29	280	1637,10	1	1.819
2030		12	-29	280	1690,20	1	1.878
2040		12	-29	280	1742,40	1	1.936
2050		12	-29	280	1806,30	1	2.007

4.3.2.7 Grundstoffchemie

Tabelle 4-76: Prozess: Ammoniakherstellung, Maßnahme: Allg. Maßnahmen Ammoniak

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-04 05/, /IIP-01 18/, /EU-04 07/			/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	20	617	474	0	2.370
2020		20	617	651	0	3.255
2030		20	617	634	0	3.172
2040		20	617	631	0	3.153
2050		20	617	628	0	3.142

Tabelle 4-77: Prozess: Ammoniakherstellung, Maßnahme: kleine Verb. Reformer

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/ISI-05 13/, /IER-04 05/, /EU-04 07/			/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	20	389	474	0,20	2.370
2020		20	389	651	0,20	3.255
2030		20	389	634	0,20	3.172
2040		20	389	631	0,20	3.153
2050		20	389	628	0,20	3.142

Tabelle 4-78: Prozess: Ammoniakherstellung, Maßnahme: große Verb. Reformer

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle				/IER-04 05/, /IIP-01 18/, /EU-04 07/		/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	20	1.111	237	0,10	2.370
2020		20	1.111	326	0,10	3.255
2030		20	1.111	317	0,10	3.172
2040		20	1.111	315	0,10	3.153
2050		20	1.111	314	0,10	3.142

Tabelle 4-79: Prozess: Ammoniakherstellung, Maßnahme: Verb. Synthese

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IER-04 05/, /IIP-01 18/, /EU-04 07/, /ISI-05 13/			/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	20	277,8	593	0,25	2.370
2020		20	277,8	814	0,25	3.255
2030		20	277,8	793	0,25	3.172
2040		20	277,8	788	0,25	3.153
2050		20	277,8	786	0,25	3.142

Tabelle 4-80: Prozess: Ammoniakherstellung, Maßnahme: Verb. CO_2 Abscheidung

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/IIP-01 18/, /EU-04 07/			/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	15	250,0	711	0,30	2.370
2020		15	250,0	977	0,30	3.255
2030		15	250,0	952	0,30	3.172
2040		15	250,0	946	0,30	3.153
2050		15	250,0	943	0,30	3.142

Tabelle 4-81: Prozess: Ethylen SteamCracking, Maßnahme: Allg. Maßnahmen SteamCr

	Energie-träger	Lebensdauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt	kt
Quelle			/REN-01 14/, /CURRAS-01 10/			/BMUB-06 15/	/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	10	108,3	2432	0,20	12.160	
2020		10	108,3	2518	0,20	12.588	4.999
2030		10	108,3	2705	0,20	13.527	5.372
2040		10	108,3	2940	0,20	14.698	5.837
2050		10	108,3	3175	0,20	15.874	6.304

Tabelle 4-82: Prozess: Ethylen SteamCracking, Maßnahme: Verb. Steam Cracker

	Energie-träger	Lebensdauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt	kt
Quelle			/REN-01 14/, /CURRAS-01 10/, /REN-01 06/			/BMUB-06 15/	
2015	Strom & Brennstoffe	25	316,7	4864	0,40	12.160	
2020		25	316,7	5035	0,40	12.588	4.999
2030		25	316,7	5411	0,40	13.527	5.372
2040		25	316,7	5879	0,40	14.698	5.837
2050		25	316,7	6350	0,40	15.874	6.304

Tabelle 4-83: Prozess: Ethylen SteamCracking, Maßnahme: Fortgeschr. Destillationsko

	Energie-träger	Lebensdauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt	kt
Quelle			/REN-01 14/, /CURRAS-01 10/, /REN-01 06/			/BMUB-06 15/	
2015	Strom & Brennstoffe	15	111,1	2432	0,20	12.160	
2020		15	111,1	2518	0,20	12.588	4.999
2030		15	111,1	2705	0,20	13.527	5.372
2040		15	111,1	2940	0,20	14.698	5.837
2050		15	111,1	3175	0,20	15.874	6.304

Tabelle 4-84: Prozess: Chlorherstellung, Maßnahme: Membran-statt Amalganverf.

	Energieträger	Lebensdauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt	kt
Quelle			/ISI-05 13/			/BMUB-06 15/	
2015	Strom & Brennstoffe	30	983,3	12160	1,00	12.160	
2020		30	983,3	12588	1,00	12.588	4.999
2030		30	983,3	13527	1,00	13.527	5.372
2040		30	983,3	14698	1,00	14.698	5.837
2050		30	983,3	15874	1,00	15.874	6.304

Tabelle 4-85: Prozess: Chlorherstellung, Maßnahme: WRG

	Energie-träger	Lebensdauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/ISI-05 13/, /CURRAS-01 10/			/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	30	33,3	773	0,20	3.867
2020		30	33,3	941	0,20	4.703
2030		30	33,3	970	0,20	4.848
2040		30	33,3	971	0,20	4.857
2050		30	33,3	970	0,20	4.849

Tabelle 4-86: Prozess: Chlorherstellung, Maßnahme: Verb. Prozesssteuerung

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/ISI-05 13/, /CURRAS-01 10/			/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	30	97,2	773	0,20	3.867
2020		30	97,2	941	0,20	4.703
2030		30	97,2	970	0,20	4.848
2040		30	97,2	971	0,20	4.857
2050		30	97,2	970	0,20	4.849

Tabelle 4-87: Prozess: Chlorherstellung, Maßnahme: Umrüstung Membran-Elektroly

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/ISI-05 13/, /CURRAS-01 10/, /JRC-03 14/			/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	30	825,0	561	0,25	2.243
2020		30	825,0	890	0,25	3.559
2030		30	825,0	1212	0,25	4.848
2040		30	825,0	1214	0,25	4.857
2050		30	825,0	1212	0,25	4.849

Tabelle 4-88: Prozess: Chlorherstellung, Maßnahme: Membran-statt Diaphragmaver

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/ISI-05 13/			/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	30	83,3	928	1,00	928
2020		30	83,3	1.144	1,00	1.144
2030		30	83,3	0	1,00	0
2040		30	83,3	0	1,00	0
2050		30	83,3	0	1,00	0

Tabelle 4-89: Prozess: Chlorherstellung, Maßnahme: Verb. Membranverf.

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/ISI-05 13/			/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	30	180,6	2.243	1,00	2.243
2020		30	180,6	3.559	1,00	3.559
2030		30	180,6	4.848	1,00	4.848
2040		30	180,6	4.857	1,00	4.857
2050		30	180,6	4.849	1,00	4.849

Tabelle 4-90: Prozess: Methanol, Jahre 2015-2050

	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle		/IER-04 05/, /IIP-01 18/, /EU-04 07/, /ISI-05 13			/BMUB-06 15/
Maßnahme: Allg. Maßnahmen Metha.	20	616,7	188	0,20	941
Maßnahme: kl. Verb. Reformer Metha.	20	388,9	188	0,20	941
Maßnahme: gr. Verb. Reformer Metha.	20	1.111,1	94	0,10	941
Maßnahme: Verb. CO_2-Absch. Metha.	15	250,0	282	0,30	941

Tabelle 4-91: Prozess: Polyethylen, Maßnahme: Reaktor mit Statikmischer

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/CURRAS-01 10/, /UBP-01 03/			/BMUB-06 15/
2015	Strom	10	1.070,0	637	0,22	2.894
2020		10	1.070,0	675	0,22	3.070
2030		10	1.070,0	726	0,22	3.299
2040		10	1.070,0	798	0,22	3.626
2050		10	1.070,0	882	0,22	4.008

Tabelle 4-92: Prozess: Polyethylen, Maßnahme: Allg. Maßnahmen Polyeth.

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/ISI-05 13/, /CURRAS-01 10/			/BMUB-06 15/
2015	Strom	10	286,0	579	0,20	2.894
2020		10	286,0	614	0,20	3.070
2030		10	286,0	660	0,20	3.299
2040		10	286,0	725	0,20	3.626
2050		10	286,0	802	0,20	4.008

Tabelle 4-93: Prozess: Polyethylen, Maßnahme: WRG Polyethylen

	Energie-träger	Lebens-dauer	spezifische Einsparung	anwendbare Produktions-menge	Anwendungs-faktor	Produktionsmenge
Einheit	-	a	kWh/t	kt	-	kt
Quelle			/CURRAS-01 10/			/BMUB-06 15/
2015	Strom & Brennstoffe	10	51,0	579	0,20	2.894
2020		10	51,0	614	0,20	3.070
2030		10	51,0	660	0,20	3.299
2040		10	51,0	725	0,20	3.626
2050		10	51,0	802	0,20	4.008

4.3.3 Prozesse – Verfahrensroutenwechsel, Energieträgerwechsel mit Technologiewechsel und CO_2-Abscheidung

Tabelle 4-94: Verfahrensroutenwechsel - Modellierungsannahmen

		Verfahrens-routenwechsel Primär- zu Sekundärstahl	Verfahrens-routenwechsel Primär- zu Direktreduktionsstahl	Verfahrens-routenwechsel Hohlglas	Verfahrens-routenwechsel Flachglas
Stromverbrauch Referenz	kWh/t	0,1664	0,1664	299	651
Stromverbrauch Maßnahme	kWh/t	1178	714	1200	1200
Brennstoff-verbrauch Referenz	kWh/t	4778	4778	1562	1785
Brennstoff-verbrauch Maßnahme	kWh/t	539	4000	0	0
Lebensdauer Referenz	a	20	20	20	20
Lebensdauer Maßnahme	a	20	20	20	15
Investition Referenz	€/t	1290	1290	55	274
Fixe Betriebskosten Referenz	€/t*a	388	388	-	-
Investition Maßnahme	€/t	1400	3150	731	731
Fixe Betriebskosten Maßnahme	€/t*a	463	450	-	-
Anwendbare Produktionsmenge 2015	kt	8037	29133	4098	2.143

5 Literatur

ACA-04 15 Sauer, Dirk Uwe et al.: Energiespeicher - Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050". Aachen: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2015.

AEE-02 13 Studienvergleich: Entwicklung der Volllaststunden von Kraftwerken in Deutschland. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien, 2013.

AEE-03 14 Mühlenhoff, Jörg; Kajimura, Ryotaro; Boenigk, Nils; Ziegler, David; Witt, Janet: Holzenergie in Deutschland - Status Quo und Potenziale in: Renews Spezial. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e. V., 2014.

AGEB-01 16 Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2014. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2016.

AGFW-01 16 AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (AGFW): . Frankfurt am Main: AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (AGFW), 2016.

AGORA-02 15 Mayer, Johannes N. et al.: Current and Future Cost of Photovoltaics - Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Berlin: Agora Energiewende, 2015.

AGORA-03 17 Matthes, Felix Christian; Heinemann, Christoph; Ludig, Sylvie; Cook, Vanessa: Erneuerbare vs. fossile Stromsysteme: ein Kostenvergleich - Stromwelten 2050 – Analyse von Erneuerbaren, kohle- und gasbasierten Elektrizitätssystemen. Berlin: Agora Energiewende, 2017.

AND-01 16 Successful start-up of ANDRITZ Papillon refiner at Sofidel, UK in: https://www.andritz.com/group/gr-news/gr-news-detail.htm?id=40778 (Abruf: 09.06.2017) Archived by WebCite® at: http://www.webcitation.org/6r7K9p45Q. Graz: Andritz AG, 2016.

APC-01 17 Huang, Richard et al.: Oxy-fuel glass melting trends in Asia. Detroit, Michigan, USA: Air Products and Chemicals, Inc, 2017.

ASUE-01 02 Gaswärmepumpen. Kaiserslauten: Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), 2002.

ASUE-01 14 BHKW-Kenndaten 2014/2015 - Module, Anbieter, Kosten. Berlin: ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., 2014.

BCG-01 13 Wörtler, Martin et al.: Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050 - Technical and economic analysis of the sector's CO2 abatement potential. Boston: The Boston Consulting Group (BCG), Steel Institute (VDEh), 2013.

BDH-01 15 Gesamtbestand zentrale Wärmeerzeuger 2014. Köln: Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V., 2015.

BERTA-01 18 Berta, Nino: E-Mail - Kosten und Energieeinsatz für Direct Air Capture Verfahren; Interview, geführt von Arnold, Maximilian; Zürich: Climeworks AG, 2018.

BFRW-01 17 Memmler, Michael et al.: AGEE-Stat Fachgespräch: Fortentwicklung der Solarthermiestatistik und der Bilanzierung von Wärme aus Solarthermieanlagen. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2017.

BGR-02 10 Gerling, Peter: Wo kann CO2 gespeichert werden. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2010.

BHL-01 13 Hornung, Mirko; Isikveren, Askin T.; Cole, Mara; Sizmann, Andreas: CE-Liner - Case Study for eMobility in Air Transportation. München: Bauhaus Luftfahrt e.V., 2013.

BLESL-01 13 Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie in: Springer Verlag. Berlin Heidelberg: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2013.

BMUB-06 15 Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth et al.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V., 2015.

BMUB-04 16 Wallmeier, Werner; Wasner, Per: Innovative energieeffiziente Branntkalk-Mahlanlage: Horizontal-Schichtrollenmühle - BMUB Umweltinnovationsprogramm. Heidelberg: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016

BMVI-02 16 Radke, Sabine (DIW): Verkehr in Zahlen 2016/2017. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2016.

BMWI-01 14 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.

BNETZA-03 18 Genehmigung des Szenariorahmens für die Netzentwicklungsplanung 2019-2030. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), 2018.

BOH-01 07 Bohnet, Matthias: Mechanische Verfahrenstechnik. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.

BUW-02 14 Weigel, Max: Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren - Einschätzung der möglichen Rolle von Wasserstoff als Reduktionsmittel. Wuppertal: Bergischen Universität Wuppertal, 2014.

BVG-01 14 Glas - Ein Werkstoff mit vielen Talenten. Düsseldorf: Bundesverband Glasindustrie e.V, 2014.

BVG-01 15 Produktion von Glas und Glaswaren nach Branchensektoren: 2014 und 2015. Düsseldorf: Bundesverband Glasindustrie e.V., 2015.

BVG-02 15 JAHRESBERICHT 2015. Düsseldorf: Bundesverband Glasindustrie e.V., 2015.

CAM-01 13 Campana, F. et. al.: ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings in: Energy Conversion and Management 76 (2013). Amsterdam: Elsevier, 2013.

CAMB-01 17 Cambridge Econometrics: Low-Carbon Cars in Germany - Technical Report. Cambridge: Cambridge Econometrics, 2017.

CAR-02 18 CARMEN e.V.: Wärmegestehungskosten - Biogene Festbrennstoffe - Biomasseheizwerke - Wirtschaftlichkeit. In: https://www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/biomasseheizwerke/wirtschaftlichkeit/474-waermegestehungskosten. (Abruf am 2018-06); (Archived by WebCite® at http://www.webcitation.org/70l42i8yd); Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V. - Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V., 2018.

CARB-01 11 Industrial Energy Efficiency Accelerator - Guide to the brick sector. London: Carbon Trust, 2011.

CHV-02 09 Optimieren durch Zusatzaggregate in: Papier + Technik (Ausgabe: 02/2009) verfügbar unter: http://www.papierundtechnik.de/pt/live/fachartikel/detail/45.html (Abruf: 01.06.2017). Heidelberg: Dr.Curt Haefner-Verlag, 2009.

CHV-01 10 Der Hochkonsistenz-Pulper in: Papier + Technik (Ausgabe: 09/2010) verfügbar unter: http://www.papierundtechnik.de/pt/live/archiv/artikel/detail/32396531.html (Abruf: 01.06.2017). Heidelberg: Dr.Curt Haefner-Verlag, 2010.

CHV-01 13 Dispergieren in: Papier + Technik (Ausgabe: 01/2013) verfügbar unter: http://www.papierundtechnik.de/pt/live/archiv/artikel/detail/33285468.html (Abruf: 01.06.2017). Heidelberg: Dr.Curt Haefner-Verlag, 2013.

CHV-01 15 Die Schuhpresse in: Papier + Technik (Ausgabe: 08/2015) verfügbar unter: http://www.papierundtechnik.de/pt/live/archiv/artikel/detail/34119951.html (Abruf: 01.06.2017). Heidelberg: Dr.Curt Haefner-Verlag, 2015.

CIE-01 16 Wadud, Zia; MacKenzie, Don; Leiby, Paul: Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles in: Transportation Research. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2016.

CORR-01 13 Corradini, Roger: Regional differenzierte Solarthermie-Potenziale für Gebäude mit einer Wohneinheit. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum. Herausgegeben durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), München 2013 – ISBN 978-3-941802-26-1; ISBN-A 10.978.3941802/261.

CURRAS-01 10 Currás, Tabaré Arroyo: Barriers to investment in energy saving technologies - Case study for the energy intensive chemical industry in the Netherlands. Utrecht: Faculty of Geoscience, Universiteit Utrecht, 2010.

CYP-01 10 Cypra, Sonja: Auswirkungen von Energieeffizienzzertifikaten auf Investitionsentscheidungen im Wohnungsbau . Dissertation. Eingereicht an der Fakultät für

Wirtschaftswissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe; herausgegeben durch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Karlsruhe, 2010.

DEB-01 03 Jagnow, Kati; Wolff, Dieter: Überblick Heizkessel in: Der Energieberater. Köln: Verlag Deutscher Wirtschaftsdienst, 2003.

DEHLI-01 10 Dehli, Martin: Wie energiesparend sind moderne Heizkessel? Münster: Büro für techn.-wiss. Kommunikation, 2010.

DENA-05 17 dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Zwischenfazit Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2017.

DENA-01 18 Bründerlinger, Thomas et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. Berlin: dena, 2018.

DENA-02 18 Kruse, Jürgen et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil B. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, 2018.

DESTATIS-14 11 Eisenbahnverkehr 2011; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2011.

DESTATIS-17 12 Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt 2011; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2012 (überarbeitet: 2012).

DESTATIS-18 12 Luftverkehr auf ausgewählten Flugplätzen 2011; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2012.

DESTATIS-21 16 Beschäftigte, Umsatz und Investitionen der Unternehmen und Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden - Fachserie 4, Reihe 4.2.1, 2015: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewe

rbe/Strukturdaten/BeschaeftigteUmsatzInvestitionen2040421157004.pdf?__blob=publicationFile; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis), 2016 (überarbeitet: 2017).

DEU-01 08 Barth, Uwe et al.: Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung - Technikfolgenabschätzung (TA), CO2-Abscheidung und -Lagerung bei Kraftwerken, Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung". Berlin: Deutscher Bundestag, 2008.

DIET-01 18 Dietrich, Ralph-Uwe et al.: Erzeugung alternativer flüssiger Kraftstoffe im zukünftigen Energiesystem. In: Chemie Ingenieur Technik Vol. 90, No 1-2, 179-192. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018.

DIN-01 16 DIN 4108 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung Vornorm in Gebäuden in: DIN. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V, 2016.

DIW-07 13 Current and Prospective Costs of Electricity Generation until 2050 - Data Documentation 68. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), 2013.

DIW-02 16 Brenke, Karl: Home Offices: Plenty of Untapped Potential. Berlin: DIW Berlin - Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V., 2016.

DLR-04 12 Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Datenanhang II zum Schlussbericht. Stuttgart, Kassel, Teltow: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2012.

DOELL-01 18 Doelling, Robert: Pelletsilo: Flexible Lösungen für Pelletlager. In: https://www.energie-experten.org/heizung/pelletheizung/pelletlager/pelletsilo.html. (Abruf am 2018-08-01); (Archived by WebCite® at http://www.webcitation.org/71LDOLRWT); Hamburg: energie-experten.org, 2018.

EAEID-01 13 Morrow III, William R.; Hasanbeigi, Ali; Sathaye, Jayant; Tengfang, Xu: Assessment of energy efficiency improvement and CO2 emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries in: Journal of Cleaner Production. Amsterdam: Elsevier, 2013.

ECOFYS-02 11 de Jager, David et al.: Financing Renewable Energy in the European Energy Market.: Ecofys, 2011.

ECOINV-01 14 The ecoinvent database, Version 3.0 in: http://www.ecoinvent.org/. Zürich: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2014.

EJWW-02 10 Erhard, Klaus; Arndt, Tiemo; Miletzky, Frank: Einsparung von Prozessenergie und Steuerung von Papiereigenschaften durch gezielte chemische Fasermodifizierung in: European Journal of Wood and Wood Products (August 2010, Volume 68, Issue 3). Berlin: Springer-Verlag, 2010.

EOLB-01 08 Worrell, Ernst; Galitsky, Christina; Masanet, Eric; Graus, Wina: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry - An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, Kalifornien: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Lab, 2008.

EOLB-03 08 Worrell, Ernst; Galitsky, Christina: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making - An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, Kalifornien: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Lab, 2008.

EOLB-01 09 Kramer, Klaas Jan; Masanet, Eric; Tengfang, Xu; Worrell, Ernst: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry - An

ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, Kalifornien: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Lab, 2009.

EOLB-01 10 Worrell, Ernst et al.: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry - An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, Kalifornien: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Lab, 2010.

EU-04 07 Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers. Brüssel: Europäische Kommission, 2007.

EU-04 15 Suhr, Michael u.a. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. Luxembourg: Europäische Komission, 2015.

EWI-01 14 Techno-ökonomische Kennwerte für den Forschungsverbund - Systemanalyse Energiespeicher. Köln: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), 2014.

EWI-01 17 Lindenberger, Dietmar PD Dr.; Graf, Frank Dr.: Die Rolle von Power-to-Gas im Kontext der Energiewende - Abschlussbericht. Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2017.

FCHJU-01 14 Bertuccioli, Luca; Chan, Alvin; Hart, David; Lehner, Franz; Madden, Ben; Standen, Eleanor: Study on development of water electrolysis in the EU - Final Report. Lausanne, CH: E4tech Sàrl, 2014.

FEA-01 16 Patel, Martin K.; Zuberi, M. Jibran S.: Bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO2 emission reduction potentials in the Swiss cement industry in: Journal of Cleaner Production. Amsterdam: Elsevier, 2016.

FFE-04 12 Schmid, Tobias; Beer, Michael; Corradini, Roger: Energiemodell der Wohngebäude in: BWK Bd. 64 (2012) Nr. 1/2. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2012.

FFE-13 17 Rasch, M.; Regett, A.; Pichlmaier, S.; Conrad, J.; Greif, S.; Guminski, A.; Rouyrre, E.; Orthofer, C.; Zipperle, T.: Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz - Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems in: BWK Ausgabe 03/2017, S. 38-42. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2017.

FFE-145 17 Estermann, Thomas et al.: Kurzstudie Power-to-X - Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB. München: FfE, 2017.

FFE-21 17 Corradini, Roger; Konetschny, Claudia; Schmid, Tobias: FREM - Ein regionalisiertes Energiesystemmodell in: et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen Heft 1/2 2017. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2017.

FFE-22 17 Anoynmer Manager im Bereich Umweltschutz eines weltweit führenden Zementherstellers (Standort Deutschland): Experteninterview am 18.04.2017 - CO2-Verminderung in der Zementherstellung. München: FfE GmbH, 2017.

FFE-34 17 Hauck, Heribert (Trimet Aluminium SE): Experteninterview am 10.03.2017 - CO2-Verminderung bei der Herstellung von Primäraluminium. München: FfE GmbH, 2017.

FFE-36 17 Sprecher, Marten (Stahlinstitut VDEh): Experteninterview am 02.03.2017 - CO2-Verminderung in der Stahlindustrie. München: FfE GmbH, 2017.

FFE-39 17 Lemke, Jost (thyssenkrupp Industrial Solutions): Experteninterview am 20.04.2017 - CO2-Verminderung in der Industrie. München: FfE GmbH, 2017.

FFE-45 17 Köppl, Simon; Samweber, Florian; Bruckmeier, Andreas; Böing, Felix; Hinterstocker, Michael; Kleinertz, Britta; Konetschny, Claudia; Müller, Mathias; Schmid, Tobias;

Zeiselmair, Andreas: Projekt MONA 2030: Grundlage für die Bewertung von Netzoptimierenden Maßnahmen - Teilbericht Basisdaten. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2017.

FFE-21 18 Kleinertz, Britta et al.: CO2-Verminderungskosten von Gasen - Projekt in Auftrag von EnBW Energie Baden-Württemberg AG. In: https://www.ffe.de/themen-und-methoden/ressourcen-und-klimaschutz/764-co2-verminderungskosten-von-gasen-entwicklung-statischer-co2-verminderungskostenkurven. (Abruf am 2018-07-17); (Archived by WebCite® at http://www.webcitation.org/70yXTyspa); München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2018.

FFE-58 18 Bayer, Caspar et al.: Der Einfluss von Prognoseunsicherheiten auf CO2-Verminderungskosten im Pkw-Bereich. In: et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen 11/2018. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2018.

FFE-18 19 Veitengruber, Frank et al.: Potenzialanalyse zur Hybridisierung von Prozessen in der Grundstoffindustrie. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2019.

FHSWF-01 10 Kail, Christoph et al.: Die Brennstoff-Frage - Energieversorgungslösungen für Industrie und Kommunen. Meschede: FH Südwestfalen, 2010.

FIRE-01 14 Forni, Daniele; Di Santo, Dario; Campana, Francesco: Innovative system for electricity generation from waste heat recovery - Peer-reviewed paper in: eceee 2014 Industrial Summer Study: Retool for a competitive and sustainable industry, Panel 4. Undertaking high impact actions: The role of technology and systems optimisation. Rome: FIRE – Italian Federation for Rational Use of Energy, Italy, 2014.

FLEI-01 12 Fleiter, Tobias; Fehrenbach, Daniel; Worrell, Ernst; Eichhammer, Wolfgang: Energy efficiency in the German pulp and paper industry - A model-based assessment of saving potentials in: Energy. Amsterdam: Elsevier, 2012.

FNR-06 16 Leitaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2016.

FNR-06 17 Basis Daten Bioenergie Deutschland 2017. Gülzow-Prüzen: Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2017.

FRAHM-01 18 Frahm, Torben: Pelletheizung Preise für Komponenten & Komplettpakete. In: https://www.heizungsfinder.de/pelletheizung/preise. (Abruf am 2018-08-01); (Archived by WebCite® at http://www.webcitation.org/71LDTq9U9); Hamburg: DAA Deutsche Auftragsagentur GmbH, 2018.

GIER-01 13 energy [r]evolution - a sustainable Netherlands energy outlook. Netherlands: Greenpeace International, European Renewable Energy Council (EREC), 2013.

GLIN-01 16 Roos, Christian; Lubitz, Guenter: Alternative concepts for energy efficient container glass melting - A Global Review of Glassmaking in: Glass International (April 2016 - Vol. 39 No. 4). Redhill, UK: Quartz Business Media Ltd, 2016.

GROET-01 17 Grötsch, Markus: Interview - CO2-Verminderung bei der Herstellung von Ziegel; Interview, geführt von Wiener, Manuel und Gruber, Anna; Bogen: Wienerberger Deutschland Service GmbH, 2017.

GUENT-01 18 Günther, Stefan: Kosten einer Pelletheizung - mit Förderung und Amortisation. In: https://www.energieheld.de/heizung/pelletheizung/kosten. (Abruf am 2018-08-01); (Archived by WebCite® at https://www.webcitation.org/71LDSqloR); Hannover: Energieheld GmbH, 2018.

GWS-01 15 Lehr, Ulrike et al.: Beschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland: Ausbau und Betrieb, heute und morgen. Berlin: Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung (GWS), 2015.

HERBE-01 17 Herbert, René: Neue Trends bei Nachtspeicherheizungen. In: SWM Magdeburg Energiesparseminar; Oschersleben: Die ENERGIEagentur, 2017.

HLH-01 09 Pfannstiel, Dieter: Energieeinsparung und Komfortverbesserung - Einsatz von elektronischen Einzelraumtemperaturregelungen oder Hausautomationssystemen - Teil 1 in: HLH Bd. 60 1-2009. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2009.

HSW-01 11 Wolff, Dieter; Jagnow, Kati: Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung. Wolfenbüttel: Ostfalia Hochschule Wolfenbüttel, 2011.

HVG-01 07 Gitzhofer , Karlheinz: BAT determination in selected industrial fields as a contribution to the fulfilment of the climate protection targets and further immission control legal requirements - Partial Project 02: German contribution to the Review of the Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry. Offenbach am Main: Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V. (HVG) , 2007.

IAEW-01 12 Höflich, Bernd; Noster, Rafael; Peinl, Hannes; Richard, Phillip; Völker, Jakob; Echternacht, David; Grote, Fabian; Schäfer, Andreas; Schuster, Henning: Integration der erneuerbaren Energien in den deutschen/europäischen STrommarkt - Integration EE. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2012.

IASS-03 16 Naims, Henriette: Economics of carbon dioxide capture and utilization—a supply and demand perspective. Berlin: Springer, 2016.

IBP-03 13 Kersken, Matthias; Sinnesbichler, Herbert: SIMULATIONSSTUDIE ZUM ENERGIEEINSPAR- POTENTIAL EINER HEIZUNGSREGELUNG MIT ABWESENHEITSERKENNUNG UND WETTERPROGNOSE. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2013.

IER-04 05 Rafiqul, Islam et al.: Energy efficiency improvements in ammonia production - Perspectives and uncertainties. Stuttgart: Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER), University of Stuttgart, 2005.

IER-03 14 Brunke, Jean-Christian; Blesl, Markus: Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs in: Journal of Cleaner Production. Amsterdam: Elsevier, 2014.

IER-05 14 Kuder, Ralf: Energieeffizienz in der Industrie - Modellgestützte Analyse des effizienten Energieeinsatzes in der EU-27 mit Fokus auf den Industriesektor. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2014.

IETD-03 17 Glass - Benchmarks in: The Industrial Efficiency Technology Database (IETD) verfügbar unter: http://ietd.iipnetwork.org/content/glass#benchmarks (Abruf: 02.06.2017) Archived by WebCite® at: http://www.webcitation.org/6qwf1y8Qs. Washington, D.C. (USA): Institute for Industrial Productivity, 2017.

IIP-01 18 The Institute for Industrial Productivity: Ammonia. In: http://ietd.iipnetwork.org/content/ammonia#technology-resources. (Abruf am 2018-05-17); (Archived by WebCite® at http://www.webcitation.org/6zUD4WSUv); Paris: The Institute for Industrial Productivity, Industrial Efficiency Database, 2018.

IRENA-01 13 Biomass Co-firing in Coal Power Plants - Insights for policy makers in: Technology-Policy Brief E21. IRENA, 2013.

IRENA-01 17 Ralon, Pablo et al.: Electricity storage and renewables - Costs and Markets to 2030. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency (IRENA), 2017.

ISE-03 10 Russ, Christel et al.: Feldmessung Wärmepumpen im Gebäudebestand. Freiburg: Fraunhofer - Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 2010.

ISE-07 14 Günther, Danny; Miara, Marek et al.: WP Monitor - Feldmessung von Wärmepumpenanlagen. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 2014.

ISE-01 15 Wirth, Harry: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 2015.

ISE-01 15 Mayer, Johannes: Zukünftige Kosten der Photovoltaik bis 2050 - Langfristszenarien zu Marktentwicklung, Systempreisen und Stromgestehungskosten. In: Vortrag bei Agora Energiewende; Berlin: Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme, 2015.

ISE-02 15 Was kostet die Energiewende? - Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Freiburg: Fraunhofer Institut für Solare Energiesystem (ISE), 2015.

ISEA-01 15 Mochövel, Janina et al.: Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern. Aachen: Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), 2015.

ISI-01 10 Wietschel, Martin; Bünger, Ulrich: Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO2-freie Endenergieträger - Endbericht. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2010.

ISI-05 13 Fleiter, Tobias; Schlomann, Barbara; Eichhammer, Wolfgang: Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotentiale, Hemmnisse und Instrumente in: ISI Schriftenreihe "Innovationspotentiale". Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2013.

ISI-08 13 Hirzel, Simon; Sontag, Benjamin; Rohde, Clemens: Industrielle Abwärmenutzung - Kurzstudie. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013.

ISI-18 15 Thielmann, Axel et al.: Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2015.

ISI-02 16 Rohde, Clemens: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2015 mit Aktualisierung der Anwendungsbilanzen der Jahre 2009 bis 2012. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2016.

ISI-09 17 Thielmann, Axel et al.: Energiespeicher-Roadmap (Update 2017) - Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2017.

ISI-11 17 Wietschel, Martin et al.: Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw - Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (Fraunhofer ISI), 2017.

IWES-01 15 Gerhardt, Norman et al.: Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr - Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung. Berlin: Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, 2015.

IWES-01 17 Pfenning, Maximilian; Gerhardt, Norman et al.: Mittel- und Langfristige Potenziale von PTL- und H2- Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen - Teilbericht im Rahmen des Projektes: Klimawirksamkeit Elektromobilität - Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Kassel: Fraunhofer IWES, 2017.

IWU-02 15 Hinz, Eberhard: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), 2015.

JET-02 16 Jetter, Fabian; Bosch, Stephan: Energiewende auf dem Dach - Siedlungsstrukturelle Informationen als Grundlage zur Berechnung des Solarpotenzials auf Wohngebäuden. In: Kartographische Nachrichten. Bonn: Gesellschaft für Kartographie und Geomatik (DGfK e.V.), 2016.

JRC-01 13 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.

JRC-03 14 Brinkmann, Thomas; Santonja, Germán Giner; Schorcht, Frauke; Roudier, Serge; Sancho, Luis Delgado: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali. Sevilla: Joint Research Centre of the European Commission , 2014.

JRC-04 14 Edwards, Robert et al.: Well-to-Tank Report Version 4.a - JEC Well-to-Wheels Anaylsis in: Well-to-Wheels Anaylsis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Ispra, Italy: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, 2014.

JRC-01 15 Moya, J.A et al..: Energy Efficiency and GHG Emissions: Prospective Scenarios for the Aluminium Industry. Bruxelles: Europäische Komission, 2015.

KBA-03 16 Besitzumschreibungen und Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2016

KLIEN-01 14 Roadmap Industrie F&E-Fahrplan Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie - Energieeffizienz in der Nichteisenmetall-Industrie. Wien: Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung, 2014.

LBST-01 16 Bünger, Ulrich Dr.; Landinger, Hubert; Weindorf, Werner; Wurster, Reinhold; Zerhusen, Jan; Zittel, Werner Dr.: Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in Lkw im Fernverkehr - Abschlussbericht. München: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2016.

LBST-02 16 Schmidt, Patrick; Zittel, Werner; Weindorf, Werner; Rashka, Tetyana: Renewables in Transport 2050 - Empowering a Sustainable Mobility Future With Zero Emission Fuels From Renewable Electricity. Frankfurt am Main: FVV- Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V., 2016.

LSW-01 15 Projektdokumentation 2014 - Modernisierung Pfannen- und Verteilerfeuer. Meitingen: Lech-Stahlwerke GmbH, 2015.

LUT-102 16 Fasihi, Mahdi et al.: Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. Lappeenranta (Finland): Lappeenranta University of Technology, 2016.

LUT-01 17 Fasihi, Mahdi; Bogdaniv, Dimitrii; Beyer Christian: Long-Term Hydrocarbon Trade Options for the Maghreb Region and Europe - Renewable Energy Based Synthetic

Fuels for a Net Zero Emissions World in: Sustainability 2017. Laapeenranta, Finnland: School of Energy Systems, Lappeenranta University of Technology, 2017.

MEE-01 13 Meechoowas, Ekarat; Tapasa, Kanit; Jitwatcharakomol, Tepiwan: Alternative Soda-lime Glass Batch to Reduce Energy Consumption in: Key Engineering Materials Vol. 545 (2013). Zurich, Switzerland: Trans Tech Publications, 2013.

MFG-01 17 Schade, Wolfgang et al.: Zukünftige PKW-Nutzerkosten in Deutschland - Endbericht für Verbraucherzentrale Bundesverband e.V. Karlsruhe: M-Five GmbH Mobility, 2017.

MKA-01 14 Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang; Wiese, Andreas: Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2014.

MKULNV-01 13 Branchenpapier Verarbeitung v. Steinen und Erden (insb. Zement) in: Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2013.

MOYA-01 13 Moya, José Antonio; Pardo, Nicolás: The potential for improvements in energy efficiency and CO2 emissions in the EU27 iron and steel industry under different payback periods in: Journal of Cleaner Production. Amsterdam: Elsevier, 2013.

NOWI-01 12 Nowicki, Cassandre; Gosselin, Louis: An Overview of Opportunities for Waste Heat Recovery and Thermal Integration in the Primary Aluminum Industry in: JOM - The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS) (Volume 64, Issue 8). New York, USA: Springer US, 2012.

ÖKO-03 12 Liu, Ran; Gröger, Jens: PROSA Programmierbare Heizkörperthermostate - Studie im Rahmen des Projekts „Top 100 – Umweltzeichen für klimarelevante Produkte". Freiburg: Öko-Institut e.V., 2012.

ÖKO-02 16 Zimmer, Wiebke Dr.; Blanck, Ruth; Bergmann, Thomas; Mottschall, Moritz: Renewbility III - Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Berlin: Öko-Institut e. V., 2016.

ÖKO-03 18 Kühnel, Sven et al.: Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr - Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Berlin: Öko-Institut e.V., 2018.

OTTO-01 17 Otto, Alexander; Robinius, Martin; Grube, Thomas; Schiebahn, Sebastian; Praktiknjo, Aaron; Stolten, Detlef: Power-to-Steel - Reducing CO2 through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry in: Energies (4), 2017, S. 451. Basel: MDPI, 2017.

OVE-01 09 Overgaag, Martijn; Harmsen, Robert; Schmitz, Andreas: Industry & refineries sector - Sectoral Emission Reduction Potentials and Economic Costs for Climate Change (SERPEC-CC). Utrecht, NL: Ecofys, 2009.

PDM-01 16 Gamba, Martina et al.: Power-to-Gas Hydrogen: techno-economic assessment of processes towards a multi-purpose energy carrier. Torino, Italy: Politecnico di Torino, 2016.

QUO-01 13 Quoilin, Sylvain et al.: Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems in: Renewable & Sustainable Energy Reviews (Volume 22, Pages 168-186). Amsterdam: Elsevier, 2013.

RAU-01 14 Rauch, Theresa : Rohrisolierung: Preise, Kosten und Ersparnis in: http://www.webcitation.org/6oq0ApVOF. Berlin: co2online gGmbH, 2014.

REC-01 16 Recknagel, Hermann; Sprenger, Eberhard; Schramek, Ernst-Rudolf: Recknagel - Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 78. Ausgabe 2017/2018 - einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. München: Karl-Joseph Albers, 2016.

REC-01 17 Albers, Karl-Josef Prof. Dr.-Ing.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik - einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. München: Deutscher Industrieverlag GmbH, 2017.

REN-01 06 Ren, Tao et al.: Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. Utrecht: Department of Science, Technology and Society, Faculty of Chemistry, Utrecht University, 2006.

REN-01 14 Ren, Tao et al.: Energy efficiency and innovative emerging technologies for olefin production. Utrecht: Department of Science, Technology and Society, Faculty of Chemistry, Utrecht University, 2014.

RLI-01 13 Breyer, Christian et al.: Vergleich und Optimierung von zentral und dezentral orientierten Ausbaupfaden zu einer Stromversorgung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin: Reiner Lemoine Institut gGmbH, 2013.

SCH-02 09 Schmidt, Rolf: Raumhygiene und Energiesparen durch Wohnungslüftung. Sinn, 2009

SHA-01 16 Shalygina, O. V. et al.: Increasing the Energy Efficiency of Container-Glass Production by Using Mineral Raw Materials in: Glass and Ceramics (2016, Volume 73, Issue 5). Heidelberg: Springer International Publishing AG, 2016.

SUE-01 09 Pfeifer, Herbert et. al.: Energieeffizienz und Minderung des CO2 -Ausstoßes durch Sauerstoffverbrennung - Energy efficiency and drecrease of CO2 by oxyfuel combustion in: Stahl und Eisen 129 (2009). Düsseldorf: Stahleisen GmbH, 2009.

SWT-01 15 Durchlauferhitzer - Schock für Warmduscher in: Stiftung Warentest 01/2015. Berlin: Stiftung Warentest, 2015.

THO-01 15 Fischedick, Manfred; Görner, Klaus; Thomeczek, Margit: CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung - Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.

TREM-01 18 Tremel, Alexander: Electricity-based Fuels. Erlangen: Springer Verlag, 2018.

TUM-06 16 Müller, Marcus et al.: Evaluation of grid-level adaptability for stationary battery energy storage system applications in Europe. München: Technical University of Munich, 2016.

TUR-01 16 Foresti, Alessandro; Archetti, Daniele: Electric Steelmaking with ORC Heat Recovery in Europe and beyond. Brescia BS, Italien: Turboden, 2016.

UBA-09 10 CO2-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Dessau-Roßlau: UBA - Umweltbundesamt, 2010.

UBA-05 12 HINTERGRUND - Ökodesign-Richtlinie Umwälzpumpen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2012.

UBA-03 16 Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016.

UBA-05 16 Knörr, Wolfgang; Heidt, Christoph; Gores, Sabine; Bergk, Fabian: "Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035" (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014) - Endbericht. Heidelberg: Ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2016.

UBA-13 16 Juhrich, Kristina: CO2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2016.

UBA-21 16 Bürger, Veit et al.: Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2016.

UBA-01 17 Kemmler, A. et al.: Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 - 2016 in: Climate Change 01/2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2017.

UBA-02 17 Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2017.

UBA-03 17 Prozessdetails: Steine-ErdenCaO-GGR-Ofen-DE-2020 - Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas) in: http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B86C6457F-ABF7-4F8C-803E-794F6EBCB973%7D. (Abruf: 2017-09-12). (Archived by WebCite® at http://www.webcitation.org/6tQMc9A08). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2017.

UBP-01 03 Thakur, R.K. et al.: Static Mixers in the Process Industries - A Review. Aubière, New Dehli, Troy: Laboratoire de Génie Chimique et Biochimique, Université Blaise Pascal, 2003.

UCB-01 13 Kaup, Christoph; Kampeis, Percy: Studie zum Beitrag und zum Anteil der Wärmerückgewinnung aus zentralen Raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in Nicht-Wohngebäuden. Birkenfeld: Umwelt-Campus Birkenfeld, 2013.

ÜNB-02 18 Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan Strom 2030 (Version 2019) - Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. Berlin, Dortmund, Bayreuth, Stuttgart: 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, 2018.

USL-01 17 Falk, Guido: Vorlesung: Glas-Unterlagen Hohl- und Flachglasherstellung. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, 2017.

VBD-01 04 Renner, Volker; Bialonski, Wolfgang: Technische und wirtschaftliche Konzepte für flußangepasste Binnenschiffe. Duisburg: Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., 2004.

VDE-02 15 Gerhardt, Norman et al.: Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050 - Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2015.

VDI-06 13 VDI 2067 - Energieaufwand für die Erzeugung in: VDI-Richtlinien. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2013.

VDI-05 14 Jensen, Dierk: Effizienzsteigerung im Fermenter. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014.

VDV-01 16 Statistik 2015. Köln: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), 2016.

VDZ-01 08 Zement-Taschenbuch 51. Ausgabe. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2008.

VDZ-02 15 Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2015

VILL-01 12 Villar, Arturo; Arribas, Juan José; Parrondo, Jorge: Waste-to-energy technologies in continuous process industries in: Clean Technologies and Environmental Policy (February 2012, Volume 14, Issue 1). Heidelberg: Springer International Publishing AG, 2012.

VIN-01 16 Dolianitis, Ioannis et al.: Waste heat recovery at the glass industry with the intervention of batch and cullet preheating in: Thermal Science (2016, Vol. 20). Belgrade: Vinča Institute of Nuclear Sciences, 2016.

VIP-01 12 Wermuth, Manfred: Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010) - Schlussbericht. Braunschweig: Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH, 2012.

VOI-01 12 OnQ ModuleSteam - Der innovative Dampfblaskasten. Heidenheim: Voith Paper Holding GmbH & Co. KG, 2012.

WIE-01 15 Wietschel, Martin et al.: Energietechnologien der Zukunft - Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.

WVS-01 16 Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2016. Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2016.

WVS-02 17 Innovative Wärmetauscherlösung für Winderhitzer in: http://effizienz-mit-stahl.de/index.php/prozesse/innovative-waermetauscherloesung-fuer-winderhitzer/ (Abruf: 09.06.2017) Archived by WebCite® at: http://www.webcitation.org/6r5qw9k8q. Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2017.

WVS-03 17 Maximale Energienutzung mit Gichtgaskraftwerk in: http://effizienz-mit-stahl.de/index.php/prozesse/maximale-energienutzung-mit-gichtgaskraftwerk/ (Abruf: 09.06.2017) Archived by WebCite® at: http://www.webcitation.org/6r5r9ZKTK. Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2017.

WVS-04 17 Umstellung bei Pfannenfeuer spart Erdgas in: http://effizienz-mit-stahl.de/index.php/prozesse/umstellung-bei-pfannenfeuer-spart-erdgas/ (Abruf: 09.06.2017) Archived by WebCite® at: http://www.webcitation.org/6r7GhXBr1. Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2017.

ZIV-01 09 Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für 2009. Sankt Augustin: Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband (ZIV), 2009.

ZIV-01 13 Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für 2013. Sankt Augustin: Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband (ZIV), 2013.

ZIV-01 15 Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für 2014. Sankt Augustin: Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks Zentralinnungsverband (ZIV), 2015.

ZIV-01 16 Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für 2016. Sankt Augustin: Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband (ZIV), 2016.