

CLIMATE CHANGE

33/2020

Abschätzung der Treibhausgasminderungs- wirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung

Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politiksznarien IX“)

CLIMATE CHANGE 33/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3718 41 002 0

FB000160/ZW,ANL

Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung

Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerarien IX““)

von

Ralph O. Harthan, Julia Repenning, Ruth Blanck, Hannes Böttcher,
Veit Bürger, Vanessa Cook, Lukas Emele, Wolf Kristian Görz,
Klaus Hennenberg, Wolfram Jörß, Sylvie Ludig, Felix Chr. Matthes,
Roman Mendelewitsch, Lorenz Moosmann, Magarethe Scheffler,
Kirsten Wiegmann
Öko-Institut, Berlin

Heike Brugger, Tobias Fleiter, Tim Mandel, Matthias Rehfeldt,
Barbara Schlomann
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI),
Karlsruhe

Jan Steinbach
Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES GmbH),
Karlsruhe

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und
nukleare Sicherheit sowie des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

■/umweltbundesamt.de

🌐/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Borkumstrasse 2
13189 Berlin

Abschlussdatum:

Oktober 2020

Redaktion:

Umweltbundesamt
Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie
Kai Wehmann

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Oktober 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Aktualisiert am 19. März 2021.

Die Autorenschaft wurde um "Barbara Schломann" bei dem Fraunhofer ISI auf dem Deckblatt sowie auf der Titelseite ergänzt.

Kurzbeschreibung: Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung

Die Bundesregierung hat am 9. Oktober 2019 das Klimaschutzprogramm 2030 beschlossen, um die Klimaziele für das Jahr 2030 zu erreichen. Am 18. Dezember 2019 beschloss der Vermittlungsausschuss zwischen Bundestag und Bundesrat einige Ergänzungen bzw. Änderungen am Klimaschutzprogramm 2030. Am 15. Januar 2020 einigten sich die Bundesregierung und die Ministerpräsidenten der vom Kohleausstieg betroffenen Länder auf einen Stilllegungspfad für Kohlekraftwerke. Am 29. Januar 2020 verabschiedete die Bundesregierung den Entwurf zum Kohleausstiegsgesetz.

Im Rahmen dieses Projektes wird eine Gesamtabstschätzung der Treibhausgasminderungswirkung der Einzelmaßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 (Stand Januar 2020) vorgenommen. Die Auswirkungen der Corona-Pandemie und die konjunkturpolitischen Maßnahmen der Bundesregierung sind nicht in der Schätzung berücksichtigt. Die Methodik entspricht dem Projektionsbericht 2019. Die Ergebnisse werden in der Systematik des Klimaschutzplans 2050 dargestellt.

Basis der Abschätzung sind die Parametrisierungen der Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030, wie vom Bundeskabinett am 9. Oktober 2019 und vom Vermittlungsausschuss am 18. Dezember 2019 beschlossen. Weitere Annahmen wurden mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und dem Umweltbundesamt abgestimmt.

Dieser Bericht umfasst zwei Szenarien:

- a) REF: Referenzszenario zum Klimaschutzprogramm 2030 mit zum Teil aktualisierten Daten und Annahmen gegenüber dem Projektionsbericht 2019.
- b) KSPr (Jan 2020): Gesamtabstschätzung des Klimaschutzprogramms 2030 (Stand 29. Januar 2020).

Für die gesamten Treibhausgasemissionen (ohne Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft und internationalen Luft- und Seeverkehr) wird im Referenzszenario (REF) im Vergleich zu 1990 bis 2030 eine Minderung von 41,2 % erreicht, bis 2035 von 44,1 %. Für das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) ergibt sich bis 2030 eine Minderung von 51,0 % und bis 2035 von 59,6 %.

Insgesamt gilt zu berücksichtigen, dass die Abschätzung der Minderungswirkung bis zum Jahr 2030 mit großen Unsicherheiten behaftet ist und kein Anspruch auf eine exakte Vorhersage bestehen kann. Die vorliegende Studie beschreibt ein mögliches, wahrscheinliches Szenario der Emissionsentwicklung in Deutschland.

Abstract: Greenhouse gas reduction effects of the Climate Action Programme 2030

On 9 October 2019, the German government approved the Climate Action Programme 2030, which strives to ensure that the 2030 climate targets are met. On 18 December 2019, the mediation committee between the Federal Parliament and the Federal Council adopted additions and amendments to the Climate Action Programme 2030. On 15 January 2020, the government and the minister presidents of the federal states affected by the coal phase-out agreed on a decommissioning schedule for coal power plants. On 29 January 2020, the German government adopted the draft Coal Phase-out Act.

In this project, the overall greenhouse gas mitigation effects of the individual measures of the Climate Action Programme 2030 (status of implementation as of January 2020) is estimated. The effects of the Covid-19 pandemic and the government's economic stimulus measures are not

included in the estimate. The methodology corresponds to the German Projection Report 2019. The results are presented according to the structure of the Climate Action Plan 2050.

The assessment is based on the determination of parameters for the measures included in the Climate Action Programme 2030 as adopted by the German cabinet on 9 October 2019 and the mediation committee on 18 December 2019. Further assumptions were agreed with the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety and the German Environment Agency.

This report comprises two scenarios:

- a) REF: Reference scenario of the Climate Action Programme 2030 with partly updated data and assumptions in comparison to the Projection Report 2019.
- b) KSPr (Jan 2020): Comprehensive assessment of the Climate Action Programme 2030 (as of 29 January 2020).

For total greenhouse gas emissions (excluding land use, land-use change and forestry as well as international aviation and maritime transport) in the reference scenario (REF), the reduction compared to 1990 amounts to 41.2 % by 2030 and to 44.1 % by 2035. In the scenario Climate Action Programme 2030 (KSPr (Jan 2020)), a total reduction of 51.0 % by 2030 and of 59.6 % by 2035 is estimated.

Overall, it has to be taken into consideration that the assessment of the mitigation effects up to 2030 involves large uncertainties and does not claim to represent an exact prediction. The present study describes a possible, likely scenario of the emissions development in Germany.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	7
Abbildungsverzeichnis.....	14
Tabellenverzeichnis.....	18
Abkürzungsverzeichnis.....	26
Zusammenfassung.....	29
Summary.....	36
1 Einleitung.....	43
2 Methodischer Ansatz.....	47
2.1 Definition und Abgrenzung der Sektoren.....	47
2.2 Methodischer Ansatz für die Emissionsprojektion.....	50
3 Rahmendaten und -annahmen.....	57
3.1 Demographische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten.....	57
3.1.1 Demographische Entwicklung.....	57
3.1.2 Gesamtwirtschaftliche Entwicklung.....	59
3.2 Entwicklung der Primärenergiepreise.....	61
3.2.1 Preisprojektionen für Rohöl, Steinkohle und Erdgas.....	61
3.2.2 Preisprojektion Braunkohle.....	64
3.3 Entwicklung der Preise für Treibhausgas-Emissionszertifikate.....	65
3.4 Entwicklung der CO ₂ -Preise für Wärme und Verkehr.....	66
3.5 EEG-Umlagesenkung.....	68
3.6 Entwicklung der Endverbraucherpreise für Strom.....	69
4 Projektionen Sektor Energiewirtschaft.....	71
4.1 Stromerzeugung und gekoppelte Wärmeerzeugung.....	71
4.1.1 Methodik.....	71
4.1.2 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung.....	73
4.1.3 Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	76
4.1.4 Ergebnisse Referenzszenario.....	77
4.1.5 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020).....	83
4.1.6 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020).....	86
4.1.7 Vergleich der Szenarien.....	95
4.2 Übrige Energiewirtschaft.....	96
4.2.1 Methodik.....	96
4.2.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	96

4.2.3	Ergebnisse Referenzszenario	97
4.2.4	Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	100
4.2.5	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	101
4.2.6	Vergleich der Szenarien	105
4.3	Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	105
4.3.1	Methodik.....	105
4.3.2	Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	106
4.3.3	Ergebnisse Referenzszenario	107
4.3.4	Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	109
4.3.5	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	109
4.3.6	Vergleich der Szenarien	111
4.4	Gesamtergebnisse Energiewirtschaft	111
4.4.1	Referenzszenario	111
4.4.2	Szenario Klimaschutzprogramm 2030	112
4.4.3	Vergleich der Szenarien	113
5	Projektionen Sektor Industrie	115
5.1	Energieverbrauch (ohne KWK).....	115
5.1.1	Methodik.....	115
5.1.2	Rahmendaten.....	120
5.1.3	Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	122
5.1.4	Ergebnisse Referenzszenario	122
5.1.5	Annahmen und Parameter Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020).....	128
5.1.6	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	138
5.1.7	Vergleich der Szenarien	143
5.2	Industriekraftwerke	146
5.2.1	Methodik.....	146
5.2.2	Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	147
5.2.3	Ergebnisse Referenzszenario	147
5.2.4	Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	148
5.2.5	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	148
5.2.6	Vergleich der Szenarien	150
5.3	Industrieprozesse und Produktverwendung (CO ₂ -, CH ₄ - und N ₂ O-Emissionen).....	150
5.3.1	Methodik.....	150
5.3.2	Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	151

5.3.3	Ergebnisse Referenzszenario	151
5.3.4	Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	153
5.3.5	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	153
5.3.6	Vergleich der Szenarien	155
5.4	Industrieprozesse und Produktverwendung (Fluorierte Treibhausgase)	156
5.4.1	Methodik sowie Annahmen und Parameter im Referenzszenario.....	156
5.4.2	Ergebnisse Referenzszenario	156
5.4.3	Annahmen und Parameter sowie Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) und Vergleich der Szenarien	160
5.5	Gesamtergebnisse Industrie	160
5.5.1	Referenzszenario	161
5.5.2	Szenario Klimaschutzprogramm 2030	162
5.5.3	Vergleich der Szenarien	164
6	Projektionen Sektor Gebäude	167
6.1	Übergreifende Rahmendaten	167
6.1.1	Anzahl privater Haushalte.....	167
6.1.2	Wohnfläche und Entwicklung der Nutzfläche in Nichtwohngebäude.....	168
6.2	Wärmebedarf im Gebäudebereich	169
6.2.1	Methodik.....	169
6.2.2	Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	173
6.2.3	Ergebnisse Referenzszenario	174
6.2.4	Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	175
6.2.5	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	184
6.2.6	Einordnung der Unsicherheiten.....	189
6.3	Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung.....	191
6.3.1	Methodik.....	191
6.3.2	Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	193
6.3.3	Ergebnisse Referenzszenario	196
6.3.4	Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	197
6.3.5	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	199
6.4	Geräte und Prozesse im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen.....	200
6.4.1	Methodik.....	200
6.4.2	Annahmen und Parameter Referenzszenario und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020).....	201
6.4.3	Ergebnisse Referenzszenario und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	201

6.5	Gesamtergebnisse Gebäude	203
6.5.1	Referenzszenario	203
6.5.2	Szenario Klimaschutzprogramm 2030	204
6.5.3	Vergleich der Szenarien	205
7	Projektionen Sektor Verkehr	207
7.1	Methodik.....	207
7.1.1	Zielstellung und Vorgehen	207
7.1.2	Anpassung des Referenzszenarios.....	207
7.1.3	Modell TEMPS.....	207
7.2	Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	208
7.2.1	Verkehrsnachfrage Referenzszenario.....	209
7.2.2	Batteriepreisentwicklung.....	211
7.2.3	Effizienzentwicklung neu zugelassener Pkw.....	211
7.2.4	Effizienzentwicklung Lkw und leichte Nutzfahrzeuge	213
7.2.5	Biokraftstoffanteil.....	213
7.3	Ergebnisse Referenzszenario	214
7.4	Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020).....	215
7.4.1	Luftverkehrsabgabe (3.4.3.1).....	217
7.4.2	Mehrwertsteuersenkung Bahn-Fernverkehr (3.4.3.1).....	218
7.4.3	Elektrifizierung Schienenverkehr (3.4.3.2 und 3.4.3.6)	218
7.4.4	Mittelerhöhung GVFG und Regionalisierungsmittel (3.4.3.2)	218
7.4.5	Elektrische Busse im ÖPNV (3.4.3.2).....	219
7.4.6	Ausbau von Radwegen und Fahrradparkmöglichkeiten sowie Verbesserung der Rahmenbedingungen (3.4.3.3)	219
7.4.7	Entwicklung strombasierter Kraftstoffe (3.4.3.4)	220
7.4.8	Unterstützung fortschrittlicher Biokraftstoffe (3.4.3.5)	220
7.4.9	Stärkung des Schienengüterverkehrs: Netzausbau + Kapazitätserhöhung (3.4.3.6).....	223
7.4.10	Modernisierung der Binnenschifffahrt und Nutzung von Landstrom in Häfen (3.4.3.7).....	224
7.4.11	Pkw-Standards für 2025 und 2030 (3.4.3.8)	224
7.4.12	Kaufprämie für elektrische Pkw (3.4.3.8)	225
7.4.13	Dienstwagenbesteuerung (3.4.3.8)	226
7.4.14	Änderung der Kfz-Steuer für Pkw (3.4.3.8).....	227
7.4.15	Tank- und Ladeinfrastruktur ausbauen (3.4.3.9)	227
7.4.16	Lkw-Standards (3.4.3.10)	227

7.4.17	Standards für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) (3.4.3.10)	228
7.4.18	Kaufprämie und Mautbegünstigung von Lkw mit alternativen Antrieben (3.4.3.10)	228
7.4.19	CO ₂ -Spreizung der Lkw-Maut (3.4.3.10)	229
7.4.20	Tank-, und Lade- und Oberleitungsinfrastruktur ausbauen (3.4.3.11).....	229
7.4.21	Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen, innovative Mobilitätsformen ermöglichen (3.4.3.12).....	229
7.4.22	Steuerliche Förderung der Elektromobilität (Jahressteuergesetz 2019) (3.4.3.13)	230
7.4.23	CO ₂ -Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr.....	230
7.4.24	Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler	230
7.5	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	231
7.5.1	Gesamtergebnisse	231
7.5.2	Ergebnisse Einzelinstrumente.....	233
7.5.3	Einordnung der Unsicherheiten.....	236
7.6	Vergleich der Szenarien	237
7.6.1	Verkehrsnachfrage Personenverkehr	237
7.6.2	Verkehrsnachfrage Güterverkehr	238
7.6.3	Pkw.....	239
7.6.4	Lkw und leichte Nutzfahrzeuge	244
7.6.5	Endenergieverbrauch.....	246
7.6.6	Treibhausgasemissionen inklusive internationalem Verkehr.....	247
8	Projektionen Sektor Landwirtschaft.....	249
8.1	Methodik Referenzszenario	249
8.1.1	Landwirtschaftliche Böden, Nutztierhaltung und Sonstiges.....	249
8.1.2	Energieverbräuche der Landwirtschaft	249
8.2	Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	249
8.2.1	Landwirtschaftliche Böden, Nutztierhaltung und Sonstiges.....	249
8.2.2	Energieverbräuche der Landwirtschaft	250
8.2.3	Instrumente im Referenzszenario.....	250
8.3	Ergebnisse Referenzszenario	251
8.4	Methodik Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan2020)	252
8.5	Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030	253
8.5.1	Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen und gezielte Verminderung der Lachgasemissionen Verbesserung der Stickstoffeffizienz	253

8.5.2	Energetische Nutzung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und landwirtschaftlicher Reststoffe in Biogasanlagen.....	254
8.5.3	Ausweitung der ökologisch bewirtschafteten Fläche.....	255
8.5.4	Verringerung der Treibhausgasemissionen in der Tierhaltung	255
8.5.5	Schutz von Moorböden.....	256
8.5.6	Erhöhung der Energieeffizienz in der Landwirtschaft.....	256
8.6	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	257
8.6.1	Ergebnisse Einzelinstrumente.....	259
8.6.2	Einordnung der aktuellen Entwicklung.....	260
8.6.3	Einordnung der Unsicherheiten.....	260
8.7	Vergleich der Szenarien	262
8.8	Gesamtergebnisse Landwirtschaft.....	263
8.8.1	Vergleich der Szenarien	263
9	Projektionen Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges.....	265
9.1	Methodik.....	265
9.2	Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	266
9.3	Ergebnisse Referenzszenario	266
9.4	Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020).....	267
9.5	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	268
9.5.1	Gesamtergebnisse	268
9.5.2	Ergebnisse Einzelinstrumente.....	269
9.5.3	Einordnung der Unsicherheiten.....	269
9.6	Vergleich der Szenarien	270
10	Projektionen Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF).....	272
10.1	Methodik und Annahmen und Parameter Referenzszenario.....	272
10.2	Ergebnisse Referenzszenario	273
10.3	Methodik, Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020).....	276
10.3.1	Humuserhalt und -aufbau im Ackerland.....	276
10.3.2	Erhalt von Dauergrünland.....	277
10.3.3	Schutz von Moorböden einschließlich Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten	277
10.3.4	Erhalt und nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder und Holzverwendung.....	279
10.4	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	280
10.4.1	Gesamtergebnisse	280
10.4.2	Ergebnisse Einzelinstrumente.....	282

10.4.3	Einordnung der Unsicherheiten.....	282
10.5	Vergleich der Szenarien	283
11	Entwicklung Primärenergieverbrauch.....	285
11.1	Methodik.....	285
11.2	Ergebnisse Referenzszenario	286
11.3	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	288
11.4	Energetischer Einsatz von Biomasse.....	289
11.5	Vergleich der Szenarien	292
12	Entwicklung Endenergieverbrauch.....	294
12.1	Methodik.....	294
12.2	Ergebnisse Referenzszenario	295
12.3	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	297
12.4	Vergleich der Szenarien	299
12.5	Exkurs zu synthetischen Energieträgern und der Nationalen Wasserstoffstrategie	300
13	Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen	302
13.1	Ergebnisse Referenzszenario	302
13.2	Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)	304
13.3	Vergleich der Szenarien	306
	Literaturverzeichnis.....	311
A	Anhang	319
A.1	Abschätzung der Treibhausgas-Minderung durch Windenergieanlagen an Land.....	319
A.2	Instrumententypen	320

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035	29
Abbildung 2:	Treibhausgasemissionen im ESR-Sektor.....	32
Abbildung 3:	Modellübersicht zur Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen	51
Abbildung 4:	Aktuelle Bevölkerungsprojektionen im Vergleich	57
Abbildung 5:	Vergleich verschiedener Projektionen des Bruttoinlandsprodukts.....	61
Abbildung 6:	Energieträgerpreise und Vergleich EU-Guidelines und gewählte Preise	62
Abbildung 7:	Vergleich verschiedener Ölpreisprojektionen.....	64
Abbildung 8:	Begriffsklärung KWK-Wärme und Fernwärme	73
Abbildung 9:	Nutzungsgrade von Bestandskraftwerken (Kondensations-Kraftwerke und Kondensations-Scheiben der KWK-Anlagen) nach Inbetriebnahmejahr	75
Abbildung 10:	Bruttostromverbrauch im Referenzszenario (REF), 1990-2035	78
Abbildung 11:	Bruttostromerzeugung im Referenzszenario (REF), 1990-2035	80
Abbildung 12:	Installierte elektrische Leistung (netto) im Referenzszenario (REF), 2020-2035	82
Abbildung 13:	Bruttostromverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2008-2035	86
Abbildung 14:	Bruttostromerzeugung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2008-2035	89
Abbildung 15:	Installierte elektrische Leistung (netto) im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 KSPr (Jan 2020), 2020-2035	91
Abbildung 16:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	97
Abbildung 17:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035	102
Abbildung 18:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	109
Abbildung 19:	Überblick des Modells FORECAST-Industry	117
Abbildung 20:	Entwicklung Endenergiebedarf im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))	139
Abbildung 21:	Entwicklung des Energieträgermix im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))	140

Abbildung 22:	Endenergiebedarf von Referenzszenario (REF) und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) sowie Differenz der beiden Szenarien.....	144
Abbildung 23:	Entwicklung von Energieträgergruppen im Referenzszenario (REF) und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)).....	146
Abbildung 24:	Entwicklung der Emissionen von F-Gasen im Referenzszenario (REF) nach Quellgruppen, 2005-2035.....	156
Abbildung 25:	Entwicklung der Emissionen von F-Gasen im Referenzszenario (REF) nach Gasgruppen	159
Abbildung 26:	Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab.....	170
Abbildung 27:	Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/EE-Lab	171
Abbildung 28:	Spezifische Investitionen für Effizienzmaßnahmen differenziert nach Effizienzstandards und Referenzgebäude im Modell Invert/EE-Lab	172
Abbildung 29:	Entwicklung Endenergieverbrauch Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD im Referenzszenario (REF).....	174
Abbildung 30:	Entwicklung EE-Wärme im Referenzszenario (REF) (ohne EE in der Fernwärme) [TWh].....	175
Abbildung 31:	Entwicklung Endenergieverbrauch Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))	185
Abbildung 32:	Endenergieverbrauch EE-Wärme im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) (ohne EE in der Fernwärme) [TWh]	186
Abbildung 33:	Kenntnisse über die Energiepreise zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung aus Sicht der Investoren-Agenten.	190
Abbildung 34:	Modellüberblick FORECAST-Residential (Geräte-Modul).....	193
Abbildung 35:	Entwicklung der durchschnittlichen CO ₂ -Emissionen von Pkw-Neuzulassungen im Zeitraum 2010-2030 im Referenzszenario (REF) (NEFZ, WLTP, real).....	213
Abbildung 36:	Annahmen zum Biokraftstoffanteil im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))	221
Abbildung 37:	Differenzierung der EE im Verkehr nach RED II – Vorgaben für 2030.....	221
Abbildung 38:	EE-Anteile im Verkehr 2030 im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) (real und mit Multiplikatoren nach RED II).....	223
Abbildung 39:	Entwicklung der durchschnittlichen CO ₂ -Emissionen von Pkw-Neuzulassungen im Zeitraum 2010-2030 mit CO ₂ -Standards bis 2030 (NEFZ, WLTP, real)	225

Abbildung 40:	Entwicklung der THG-Emissionen im Verkehrssektor 2010-2030	233
Abbildung 41:	THG-Minderungsbeitrag der Instrumentenbündel im Verkehr im Jahr 2025	234
Abbildung 42:	THG-Minderungsbeitrag der Instrumentenbündel im Verkehr im Jahr 2030	235
Abbildung 43:	Verkehrsnachfrage im Personenverkehr 2030 in Referenzszenario (REF) und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)).....	238
Abbildung 44:	Verkehrsnachfrage im Güterverkehr 2030 in Referenzszenario (REF) und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)).....	239
Abbildung 45:	CO ₂ -Emissionen neu zugelassener Pkw (nach WLTP) in Deutschland, 2018-2030.....	240
Abbildung 46:	Anteile der Antriebsarten an den Pkw-Neuzulassungen.....	241
Abbildung 47:	TCO für einen im Jahr 2025 neu zugelassenen Kompaktklasse- Pkw	242
Abbildung 48:	TCO für einen im Jahr 2030 neu zugelassenen Kompaktklasse- Pkw	243
Abbildung 49:	Pkw-Bestand 2030 im Referenzszenario (REF) und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020))	244
Abbildung 50:	Antriebsanteile der Neuzulassungen von Lkw >7,5t und Last- und Sattelzügen im Jahr 2023 im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020))	245
Abbildung 51:	Entwicklung der Effizienz des Bestands an Last- und Sattelzügen im Referenzszenario (REF) und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020))	246
Abbildung 52:	Endenergieverbrauch 2030 im Referenzszenario (REF) und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)).....	247
Abbildung 53:	Vergleich der THG-Emissionen im LULUCF-Sektor für das Referenzszenario (REF) und das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020))	283
Abbildung 54:	Primärenergieverbrauch im Referenzszenario (REF), 2008-2035	286
Abbildung 55:	Primärenergieverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 2008-2035	288
Abbildung 56:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Referenzszenario (REF), 2008-2035	295
Abbildung 57:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 2008-2035 ...	297
Abbildung 58:	Treibhausgasemissionen im ESR-Sektor.....	308

Figure 1:	Greenhouse gas emissions in the Climate Action Programme 2030 scenario (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035	36
Figure 2:	Greenhouse gas emissions in ESR sector	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) im Vergleich zu den Zielen des Bundes-Klimaschutzgesetzes in Mio. t CO ₂ e	30
Tabelle 2:	Vergleich der Szenarienergebnisse für das Jahr 2030 mit den Klimaschutzzielen im Bundes-Klimaschutzgesetz in Mio. t CO ₂ e	31
Tabelle 3:	Wirkung der Einzelmaßnahmen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) gegenüber dem Referenzszenario (REF).....	33
Tabelle 4:	Sektorziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes	44
Tabelle 5:	Vorläufige Zielwerte aus der EU-Klimaschutzverordnung (Effort Sharing Regulation)	45
Tabelle 6:	Zuordnung von CRF-Kategorien zu KSP-2050- und PB-2019-Sektoren	49
Tabelle 7:	Zusammensetzung der Treibhausgas-Emissionen der im Klimaschutzplan aufgeführten Sektoren (Mio. t CO ₂ e im Jahr 2016).....	50
Tabelle 8:	Kapitelübersicht zu Einzelinstrumentenbewertung	53
Tabelle 9:	Projizierte Wachstumsraten der Bevölkerung in %.....	59
Tabelle 10:	Durchschnittliche, jährliche Wachstumsraten des Bruttoinlandsproduktes für Deutschland in verschiedenen Projektionen	60
Tabelle 11:	Energiepreis-Projektionen* für Rohöl, Erdgas und Steinkohle, 2017–2035.....	63
Tabelle 12:	Kostenannahmen der Braunkohleförderung	65
Tabelle 13:	Preise für ETS-Zertifikate in € ₂₀₁₆ /EUA.....	66
Tabelle 14:	CO ₂ -Preise für Verkehr und Wärme	67
Tabelle 15:	Annahmen zur Entwicklung der mittleren Endverbraucher-Strompreise je Sektor im Referenzszenario (REF) [Eurocent ₂₀₁₆ /kWh].....	69
Tabelle 16:	Annahmen zur Entwicklung der mittleren Endverbraucher-Strompreise je Sektor im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) [Eurocent ₂₀₁₆ /kWh].....	70
Tabelle 17:	Technische Lebensdauern der Bestandskraftwerke	74
Tabelle 18:	Parameter der KWK-Scheiben	76
Tabelle 19:	Installierte Leistung erneuerbarer Energien im Referenzszenario (REF), 2016-2035.....	77
Tabelle 20:	Bruttostromverbrauch im Referenzszenario (REF), 1990-2035	79
Tabelle 21:	Bruttostromerzeugung im Referenzszenario (REF), 1990-2035	81

Tabelle 22:	Installierte elektrische Leistung (netto) nach Energieträgern im Referenzszenario (REF), 2020-2035.....	82
Tabelle 23:	Installierte Leistung von Stein- und Braunkohlekraftwerken im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2016-2038.....	83
Tabelle 24:	Installierte Leistung erneuerbarer Energien im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2016-2035.....	85
Tabelle 25:	Kumulierter Zubau von Erdgas-KWK-Anlagen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2025-2035.....	85
Tabelle 26:	Bruttostromverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2008-2035.....	87
Tabelle 27:	Bruttostromerzeugung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2008-2035.....	90
Tabelle 28:	Installierte elektrische Netto-Nennleistung nach Energieträgern im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2020-2035.....	92
Tabelle 29:	Annahmen für die Bewertung der Einzelmaßnahmen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)).....	92
Tabelle 30:	Bewertung der Einzelmaßnahmen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)).....	94
Tabelle 31:	Ausbau im Bereich netzgebundener Wärme im Referenzszenario (REF).....	97
Tabelle 32:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Referenzszenario (REF), 2016-2035.....	98
Tabelle 33:	Installierte Leistung an neuen EE-Wärmeerzeugern im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2020-2035.....	101
Tabelle 34:	Wärmebereitstellung durch neue EE-Wärmeerzeuger im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2020-2035.....	101
Tabelle 35:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2016-2035.....	103
Tabelle 36:	Relevante Quellgruppen für diffuse Emissionen aus Brennstoffen sowie in der Modellierung verwendete Aktivitätsraten.....	106
Tabelle 37:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	108
Tabelle 38:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035.....	110
Tabelle 39:	Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	112

Tabelle 40:	Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035 ...	113
Tabelle 41:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Sektor Energiewirtschaft zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien	114
Tabelle 42:	Branchenstruktur von FORECAST-Industry (angelehnt an AGEB)	117
Tabelle 43:	Übersicht der Maßnahmen in den Sektoren Industrie und GHD: Methodik und Annahmen zu Überschneidungen und Mitnahmeeffekten	119
Tabelle 44:	Entwicklung der Bruttowertschöpfung der Industrie je Wirtschaftszweig (Mrd. € ₂₀₁₀)	120
Tabelle 45:	Produktionsmengen ausgewählter Produkte.....	121
Tabelle 46:	Übersicht der Maßnahmen in den Sektoren Industrie und GHD im Referenzszenario (REF).....	123
Tabelle 47:	Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im Referenzszenario (REF) - Stromeinsparungen.....	125
Tabelle 48:	Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im Referenzszenario (REF) – Einsparungen von Brennstoffen und CO ₂ -Emissionen	126
Tabelle 49:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Sektor Industrie (ohne Industriekraftwerke) zwischen 1990 und 2035 im Referenzszenario (REF).....	127
Tabelle 50:	Übersicht der Maßnahmen im Industriesektor im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) und ihre Zuordnung zur Maßnahmenbündeln	128
Tabelle 51:	Bündelung von Maßnahmen für die Quantifizierung im Industriesektor	130
Tabelle 52:	Kennwerte für die Quantifizierung des Programmbündels für die Markteinführung CO ₂ -armer Verfahren	135
Tabelle 53:	Zusammensetzung des Stromverbrauchs im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) (PJ Strom).....	140
Tabelle 54:	Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) - Stromeinsparungen ggü. Referenzszenario.....	142
Tabelle 55:	Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) – Einsparungen von Brennstoffen und CO ₂ -Emissionen ggü. Referenzszenario (REF).....	142
Tabelle 56:	Strom- und Wasserstoffnutzung im Technologiebereich Industrieöfen in Referenzszenario (REF) und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))	145

Tabelle 57:	Parameter der Industriekraftwerke im Referenzszenario (REF), 2016-2035.....	147
Tabelle 58:	Brennstoffeinsätze der Industriekraftwerke im Referenzszenario (REF), 2016-2035.....	147
Tabelle 59:	Parameter der Industriekraftwerke im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 2016-2035 ...	148
Tabelle 60:	Brennstoffeinsätze der Industriekraftwerke im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 2016-2035 ...	149
Tabelle 61:	Entwicklung der CO ₂ -, CH ₄ - und N ₂ O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	152
Tabelle 62:	Entwicklung der CO ₂ -, CH ₄ - und N ₂ O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 1990-2035 ...	154
Tabelle 63:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen (fluorierte Treibhausgase) im Referenzszenario (REF), 2005-2035 nach Quellgruppen.....	158
Tabelle 64:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen (fluorierte Treibhausgase) aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Referenzszenario (REF) zwischen 1990 und 2035 nach Gasgruppen.....	160
Tabelle 65:	Treibhausgasemissionen der Industrie im Referenzszenario (REF), 1990-2035	161
Tabelle 66:	Treibhausgasemissionen der Industrie im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 1990-2035 ...	163
Tabelle 67:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Sektor Industrie zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien	165
Tabelle 68:	Vergleich der Anzahl privater Haushalte verschiedener Quellen	168
Tabelle 69:	Angenommenen Entwicklung der Wohnflächen bis zum Jahr 2035.....	169
Tabelle 70:	Vergleich Brennstoffverbräuche Referenzszenario (REF) und Projektionsbericht 2019	175
Tabelle 71:	(Zusätzliche) Einsparungen fossiler Brennstoffe pro Jahr durch das Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)) gegenüber dem Referenzszenario (REF) (ohne Wirkungen auf Umwandlungssektor)	187
Tabelle 72:	(Zusätzliche) Emissionsminderung durch Einsparung fossiler Brennstoffe pro Jahr durch das Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)) gegenüber dem Referenzszenario (REF)	188
Tabelle 73:	(Zusätzliche) Einsparungen bei der sektoralen Stromnachfrage durch das Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)) gegenüber dem Referenzszenario (REF)	188

Tabelle 74:	Erwartete Entwicklung des Bestands an elektrischen Geräten in privaten Haushalten	194
Tabelle 75:	Erwartete Entwicklung des spezifischen Verbrauchs elektrischer Geräte in privaten Haushalten im Referenzszenario (REF).....	196
Tabelle 76:	Entwicklung des Stromverbrauchs privater Haushalte 2010–2035 im Referenzszenario (REF).....	197
Tabelle 77:	Erwartete Entwicklung des spezifischen Verbrauchs elektrischer Geräte in privaten Haushalten im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))	198
Tabelle 78:	Entwicklung des Stromverbrauchs privater Haushalte 2010–2035 im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))	199
Tabelle 79:	Wirkung der strombezogenen Maßnahmen im Sektor private Haushalte im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)).....	200
Tabelle 80:	Wirkung der Maßnahmen im Sektor GHD in beiden Szenarien - Stromeinsparungen	201
Tabelle 81:	Wirkung der Maßnahmen im Sektor GHD im MMS – Einsparungen von Brennstoffen und CO ₂ e-Emissionen	202
Tabelle 82:	Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	204
Tabelle 83:	Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035 ...	204
Tabelle 84:	Vergleich der Sektorziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes und der berechneten Emissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) im Sektor Gebäude	205
Tabelle 85:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Sektor Gebäude zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien	205
Tabelle 86:	Verkehrsnachfrage Personenverkehr im Referenzszenario (REF) in Mrd. pkm	210
Tabelle 87:	Verkehrsnachfrage Güterverkehr im Referenzszenario (REF) in Mrd. tkm	211
Tabelle 88:	Verkehrsnachfrage Seeverkehr im Referenzszenario (REF) in Mrd. tkm	211
Tabelle 89:	Annahmen für die Entwicklung der Batteriesystemkosten....	211
Tabelle 90:	Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	215
Tabelle 91:	Instrumente des Klimaschutzprogramms 2030 im Sektor Verkehr	216
Tabelle 92:	Zusätzliche Mittel für den öffentlichen Personennahverkehr	218

Tabelle 93:	Zusätzliche Fördermittel für den Radverkehr (Mio. €).....	219
Tabelle 94:	Kaufprämie für elektrische Pkw (Bundesanteil)	225
Tabelle 95:	Haushaltsmittel für Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben (Mio. €)	229
Tabelle 96:	Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035 ...	231
Tabelle 97:	Treibhausgasminderung im Verkehrssektor im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035 ...	232
Tabelle 98:	THG-Minderungsbeitrag der Instrumentenbündel im Verkehrssektor in der Übersicht (direkte THG- Emissionsreduktion im Verkehr, ohne Vorketten der Stromerzeugung)	234
Tabelle 99:	THG-Minderungsbeitrag der Einzelinstrumente	235
Tabelle 100:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Verkehrssektor (inklusive internationalem Verkehr) zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien	247
Tabelle 101:	Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	252
Tabelle 102:	Entwicklung der Tierbestände 2016-2035.....	257
Tabelle 103:	Entwicklung ausgewählter Aktivitätsdaten für landwirtschaftliche Böden in kt N/Jahr	257
Tabelle 104:	Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035 ...	259
Tabelle 105:	Minderungsbeitrag der Einzelinstrumente (Übersicht) ggü. dem Referenzszenario (REF).....	260
Tabelle 106:	Minderungsbeitrag der Maßnahmen in den beiden Szenarien	262
Tabelle 107:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Sektor Landwirtschaft zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien	263
Tabelle 108:	Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen im Abfallsektor	266
Tabelle 109:	Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstiges im Referenzszenario (REF), 1990-2035	267
Tabelle 110:	Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstiges im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035	268
Tabelle 111:	Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen im Abfallsektor	269
Tabelle 112:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen des Sektors Abfallwirtschaft zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien	270

Tabelle 113:	Entwicklung der Aktivitätsdaten des LULUCF-Sektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	274
Tabelle 114:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	274
Tabelle 115:	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des LULUCF-Sektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	275
Tabelle 116:	Entwicklung der CH ₄ -Emissionen des LULUCF-Sektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	275
Tabelle 117:	Entwicklung der N ₂ O-Emissionen des LULUCF-Sektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035.....	276
Tabelle 118:	Entwicklung der Aktivitätsdaten des LULUCF-Sektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP _r (Jan 2020)), 1990-2035.....	280
Tabelle 119:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP _r (Jan 2020)), 1990-2035.....	280
Tabelle 120:	Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des LULUCF-Sektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP _r (Jan 2020)), 1990-2035.....	281
Tabelle 121:	Entwicklung der CH ₄ -Emissionen des LULUCF-Sektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP _r (Jan 2020)), 1990-2035.....	281
Tabelle 122:	Entwicklung der N ₂ O-Emissionen des LULUCF-Sektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP _r (Jan 2020)), 1990-2035.....	282
Tabelle 123:	Minderung der Treibhausgasemissionen durch die Maßnahmen in Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP _r (Jan 2020)) im LULUCF-Sektor, 2020-2035	282
Tabelle 124:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen des LULUCF-Sektors zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien	284
Tabelle 125:	Primärenergieverbrauch im Referenzszenario (REF), 2008-2035	287
Tabelle 126:	Primärenergieverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP _r (Jan 2020)), 2008-2035	289
Tabelle 127:	Energetischer Einsatz von Biomasse im Basisjahr 2016	290
Tabelle 128:	Energetischer Einsatz von Biomasse im Referenzszenario (REF), Jahr 2030	290
Tabelle 129:	Energetischer Einsatz von Biomasse im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP _r (Jan 2020)), Jahr 2030.....	291
Tabelle 130:	Vergleich der Zuordnung der CRF-Sektoren 1.A.2 bis 1.A.5 und der Endenergie-Sektoren in der Energiebilanzstruktur.....	294
Tabelle 131:	Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im Referenzszenario (REF), 2016-2035.....	296

Tabelle 132:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Referenzszenario (REF), 2016-2035	296
Tabelle 133:	Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 2016-2035 ...	298
Tabelle 134:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 2016-2035 ...	298
Tabelle 135:	Nachfrage nach und Bereitstellung von synthetischen Brennstoffen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr 2030 (Jan 2020))	300
Tabelle 136:	Treibhausgasemissionen im Referenzszenario (REF), 1990-2035	302
Tabelle 137:	Emissionsentwicklung im stationären Emissionshandel und im ESR-Sektor im Referenzszenario (REF), 1990-2035	303
Tabelle 138:	Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 1990-2035	304
Tabelle 139:	Emissionsentwicklung im stationären Emissionshandel und im ESR-Sektor im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 1990-2035	305
Tabelle 140:	Vergleich der Szenarienergebnisse für das Jahr 2030 mit den Klimaschutzzielen im Bundes-Klimaschutzgesetz in Mio. t CO ₂ e	307
Tabelle 141:	Vergleich der Szenarienergebnisse mit den Klimaschutzzielen für den ESR-Bereich	307
Tabelle 142:	Entwicklung der gesamten Treibhausgas-Emissionen (ohne LULUCF und internationalen Verkehr) zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien	309
Tabelle 143:	Klassifikation der Instrumententypen	320
Table 1:	Greenhouse gas emissions in the Climate Action Programme 2030 scenario (KSPPr (Jan 2020)) compared to the targets of the Federal Climate Change Act in Mt CO ₂ e	37
Table 2:	Comparison of scenario results for 2030 and the climate targets in Federal Climate Change Act in Mt CO ₂ e	38
Table 3:	Effects of measures in the Climate Action Programme 2030 (Jan 2020) scenario compared to the Reference Scenario (REF)	39

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AGEE-Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik
APEE	Anreizprogramm Energieeffizienz
BEG	Bundesförderung Effiziente Gebäude
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BesAR	Besondere Ausgleichsregelung
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle)
BHKW	Blockheizkraftwerke
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CNG	Erdgas (compressed natural gas)
CRF	Common Reporting Format
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
DOC	Degradable Organic Carbon
DRI	Direct Reduction Iron
DüV	Düngeverordnung
EBW	Energieberatung für Wohngebäude
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EffSTRA	Energieeffizienzstrategie
EFRE	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
EIA	Energy Information Administration
EKF	Energie- und Klimafonds
ELER	Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
EMS	Energiemanagementsystem
EnEV	Energieeinsparverordnung

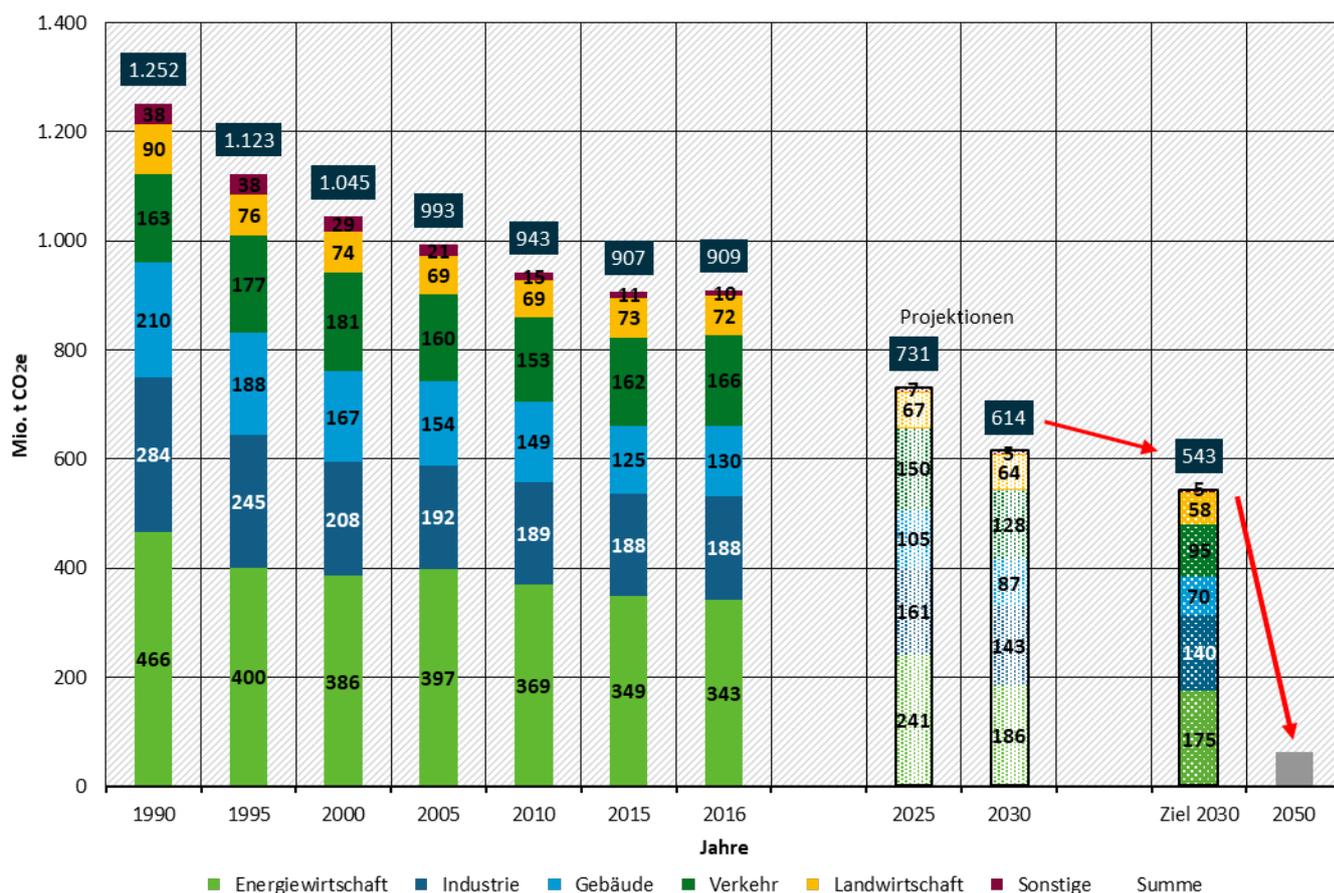
Abkürzung	Bedeutung
ESanMV	Energetische Sanierungsmaßnahmen-Verordnung
ESD	Effort Sharing Decision
ESR	Effort Sharing Regulation
ETS	Emissions Trading Scheme
EUA	European Union Allowance
FCEV	Brennstoffzellen-Fahrzeug (fuel cell electric vehicle)
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GVFG	Gemeindefinanzierungsgesetz
HFKW	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
HZO	Heizungsoptimierungsprogramm
ICCT	International Council on Clean Transportation
IEA	International Energy Agency
IKW	Industriekraftwerk
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KSP	Klimaschutzplan
KSPr (Jan 2020)	Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Stand Januar 2020)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
KWSB	Kommission „Wachstum, Strukturwandel, Beschäftigung“
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LPG	Flüssiggas (liquefied petrol gas)
LuftVStG	Luftverkehrssteuergesetz
LULUCF	Land use, land-use change and forestry (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)
MAC	Mobil air conditioning (Mobile Klimaanlage)
MAP	Marktanreizprogramm
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MMR	Monitoring Mechanism Regulation
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
MWMS	Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario
NECP	National Energy and Climate Plan (Nationaler Energie- und Klimaplan)

Abkürzung	Bedeutung
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus (Prüfverfahren für CO ₂ -Emissionen von Pkw bis September 2017)
NEZB	Niedrigstenergiegebäudestandard
nEHS	Nationales Emissionshandelssystem
NF ₃	Stickstofftrifluorid
NMVO	Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan
NPM	Nationale Plattform Mobilität
NTC	Net Transfer Capacity
ODS	Ozone-depleting substances (ozonschädigende Substanzen)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PB	Projektionsbericht
PEV	Primärenergieverbrauch
PHEV	Hybridfahrzeug mit Möglichkeit zur externen Batterieladung (plug-in hybrid electric vehicle)
PtJ	Projektträger Jülich
REF	Referenzszenario
StatBA	Statistisches Bundesamt
StBauF	Städtebauförderung
SteinkohleFinG	Steinkohlefinanzierungsgesetz
TCO	Anschaffungs- und Betriebskosten aus Nutzersicht (total cost of ownership)
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt
WEG	Wohneigentumsgesetz
WEHAM	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung
WLTP	Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure (Prüfverfahren für CO ₂ -Emissionen von Pkw ab September 2017)
ZSE	Zentrales System Emissionen

Zusammenfassung

Abbildung 1 stellt die projizierte Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Umsetzungsstand Januar 2020) im Zeitverlauf dar. Daraus wird ersichtlich, dass auf Basis des aktuellen Klimaschutzprogramms die Klimaschutzziele für 2030 nicht eingehalten werden. Bis 2030 wird eine Minderung von ca. 51 % erreicht. Damit wird das Gesamt-minderungsziel aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz um 70,7 Mio. t CO₂e verfehlt.¹ Besonders groß sind die Zielverfehlungen in den Sektoren Verkehr und Gebäude², gefolgt von der Energiewirtschaft.³

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP (Jan 2020)), 1990-2035



Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

¹ Grundsätzlich gilt zu berücksichtigen, dass die Abschätzung der Minderungswirkung eines politischen Programms im Bereich der Klimaschutzpolitik immer mit großen Unsicherheiten verbunden ist, da Annahmen über volkswirtschaftliche Rahmenbedingungen und zur Umsetzung der Maßnahmen getroffen werden müssen. Es kann sich nicht um eine exakte Prognose, sondern lediglich um die Beschreibung eines möglichen und nach derzeitigen Kenntnissen, wahrscheinlichen Szenarios, handeln. Die entsprechenden Unsicherheiten sind also bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

² Vgl. Tabelle 84.

³ Die Treibhausgasemissionen im Klimaschutzprogramm 2030 wurde auf Grundlage des Umsetzungsstandes im Januar 2020 geschätzt. Die Auswirkungen der Corona-Pandemie und die Auswirkungen der konjunkturpolitischen Maßnahmen sind hier nicht berücksichtigt.

Tabelle 1 vergleicht die Treibhausgasemissionen der einzelnen Sektoren im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) mit den jeweiligen Zielwerten des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Die Darstellung zeigt, dass die emissionsintensiven Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude und Verkehr bereits im Jahr 2025 zum Teil deutlich die Ziele verfehlen.

In der Energiewirtschaft beträgt die Zielverfehlung trotz Reduktion der am Markt befindlichen Braun- und Steinkohlekapazitäten und der Einhaltung der angestrebten Ausbauziele erneuerbarer Energien rund 11 Mio. t CO_{2e} im Jahr 2030. Die Zielverfehlung im Gebäudesektor und im Verkehrssektor steigt zwischen 2025 und 2030 an (im Jahr 2025 beträgt diese 11 Mio. t CO_{2e} bzw. 27 Mio. t CO_{2e}, im Jahr 2030 beträgt sie 17 Mio. t CO_{2e} bzw. 33 Mio. t CO_{2e}). Damit wird deutlich, dass nach der vorliegenden Schätzung trotz der Einführung einer CO₂-Bepreisung durch das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) die beschlossenen Klimaschutzmaßnahmen in diesen beiden Sektoren nicht ausreichen werden, um die jeweiligen Ziele zu erfüllen.

Tabelle 1: Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) im Vergleich zu den Zielen des Bundes-Klimaschutzgesetzes in Mio. t CO_{2e}

	2025			2030		
	Ziel ⁴	KSPr (Jan 2020)	Differenz	Ziel	KSPr (Jan 2020)	Differenz
Energiewirtschaft	Nicht festgelegt			175,0	186,1	11,1
Industrie	163,0	160,7	-2,3	140,0	143,4	3,4
Gebäude	94,0	105,4	11,4	70,0	86,8	16,8
Verkehr	123,0	150,0	27,0	95,0	128,4	33,4
Landwirtschaft	64,0	67,1	3,1	58,0	64,1	6,1
Abfallwirtschaft und Sonstiges	7,0	6,6	-0,4	5,0	4,9	-0,1
Gesamt	Nicht festgelegt			543,0	613,7	70,7
LULUCF		9,5		0,0	16,3	

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, (Bundesregierung 2019b)

Fett markierte Zahlen stellen eine Zielverfehlung dar, *kursiv* markierte Zahlen eine Übererfüllung der Ziele.

Tabelle 2 vergleicht die Ergebnisse des Referenzszenarios und des Szenarios Klimaschutzprogramm 2030 mit den jeweiligen Sektorzielen für das Jahr 2030.

In der Energiewirtschaft sind die Minderungen der Treibhausgasemissionen vor allem auf die Reduktion der installierten Leistung von Braun- und Steinkohle am Markt zurückzuführen. Der weitere Ausbau der erneuerbaren Energien⁵ ist ein weiterer wichtiger Treiber der Emissionsreduktion. Gegenüber der Referenzentwicklung werden durch das Klimaschutzprogramm 2030 im Jahr 2030 83 Mio. t CO_{2e} eingespart.

⁴ Für das Jahr 2025 wurde im Bundes-Klimaschutzgesetz keine zulässige Jahresemissionsmenge für die Energiewirtschaft festgelegt. Damit kann auch das Gesamtziel für dieses Jahr nicht ausgewiesen werden.

⁵ Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Zielverfehlung auch höher ausfallen kann, sofern das geplante Ziel des Ausbaus erneuerbarer Energien nicht erreicht wird. Siehe Anhang A.1 für eine entsprechende Einschätzung.

In der Industrie werden die Treibhausgasminderungen durch Effizienzmaßnahmen, Brennstoffwechsel, Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft, CO₂-arme Produktionsverfahren und CO₂-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung sowie die Einführung des CO₂-Preises im Nicht-ETS-Bereich bestimmt. Gegenüber der Referenzentwicklung werden durch das Klimaschutzprogramm 2030 im Jahr 2030 9 Mio. t CO₂e eingespart.

Im Bereich Gebäude sinken die Treibhausgasemissionen durch das Klimaschutzprogramm 2030 um 4 Mio. t CO₂e gegenüber der Referenzentwicklung. Hier wirkt ein Bündel von Maßnahmen, die vor allem auf eine Verbesserung der Förderung im Bereich Energieeffizienz und erneuerbare Wärme abzielen, sowie die Einführung des CO₂-Preises.

Im Verkehrssektor ist der größte Treiber für die Minderung die (auf EU-Ebene bereits beschlossene) Fortschreibung der CO₂-Standards von Pkw, leichten Nutzfahrzeugen und Lkw, an zweiter Stelle folgt der beschlossene CO₂-Preis. Gegenüber der Referenzentwicklung werden im Verkehrssektor durch das Klimaschutzprogramm 2030 im Jahr 2030 insgesamt 22 Mio. t CO₂e eingespart.⁶

Im Sektor Landwirtschaft prägen sinkende Stickstoffüberschüsse sowie die Förderung des Ökolandbaus die Treibhausgasminderungen. Gegenüber der Referenzentwicklung werden durch das Klimaschutzprogramm 2030 im Jahr 2030 4 Mio. t CO₂e eingespart.

Im Sektor Abfallwirtschaft werden die Treibhausgasemissionen durch das Klimaschutzprogramm 2030 um 1 Mio. t CO₂e reduziert, vor allem durch die Ausweitung der Deponiebelüftung und die Optimierung der Gasfassung. Damit erreicht der Bereich das Sektorziel.

Im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) werden die Treibhausgasemissionen durch das Klimapaket um 3 Mio. t CO₂e durch Maßnahmen zum Humuserhalt und zum Schutz von Moorböden gegenüber der Referenzentwicklung gemindert.

Tabelle 2: Vergleich der Szenarienergebnisse für das Jahr 2030 mit den Klimaschutzziele im Bundes-Klimaschutzgesetz in Mio. t CO₂e

Sektor	Sektorziele ⁷	Geschätzte Treibhausgasemissionen 2030		
		Referenzentwicklung	KSPr (Jan 2020)	Zusätzliche Einsparung ggü. Referenzentwicklung
Mio. t CO ₂ e				
Energiewirtschaft	175,0	269,0	186,1	82,9
Industrie	140,0	152,4	143,4	9,0
Gebäude	70,0	91,2	86,8	4,4
Verkehr ⁸	95,0	150,3	128,4	21,9

⁶ Die Fortschreibung der CO₂-Standards ist nicht im eigentlichen Sinne Bestandteil des Klimaschutzprogramms 2030. Zwecks Konsistenz mit der Referenzentwicklung der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) wurden die Pkw-Standards jedoch ebenfalls nicht in die Referenzentwicklung aufgenommen. Im Abschnitt 7.5 werden sie diskutiert und es findet eine quantitative Auswertung der Referenzentwicklung mit Pkw-Standards statt.

⁷ Laut dem Entwurf des Bundes-Klimaschutzgesetzes (Bundesregierung 2019b), Anlage 2 zu § 4, entsprechen die zulässigen Jahremissionsmengen dem unteren Rand der Sektorziele für 2030. Für den LULUCF-Sektor werden im Bundes-Klimaschutzgesetz keine Sektorziele ausgewiesen. Laut Klimaschutzplan 2050 soll im LULUCF-Sektor die Senkenleistung jedoch bis 2030 erhalten bleiben. Das Bundes-Klimaschutzgesetz weist ebenfalls auf Maßnahmen zum Erhalt der Nettosenke hin (§9 (1)). Aus diesen Vorgaben ergibt sich eine Nettoemission für den Sektor von höchstens 0 Mio. t CO₂e.

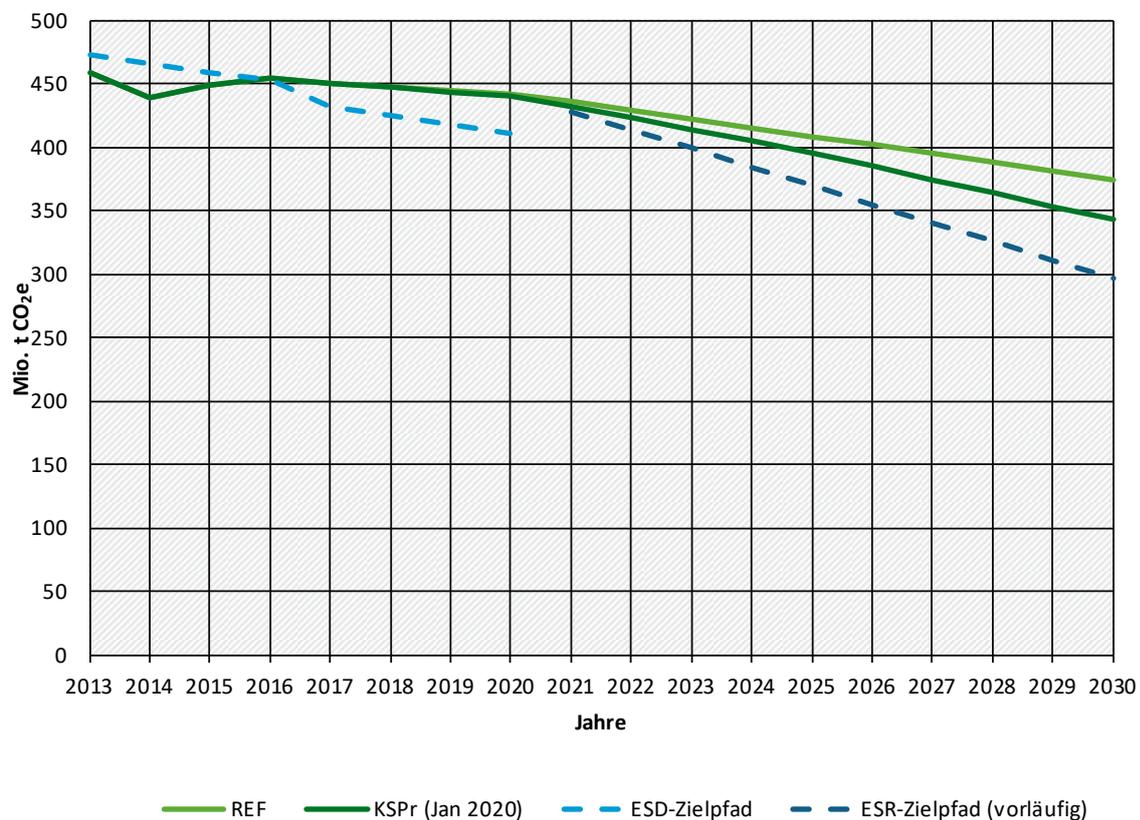
⁸ Siehe Fußnote 6.

Sektor	Sektorziele ⁷	Geschätzte Treibhausgasemissionen 2030		
		2013	2016	2030
Landwirtschaft	58,0	67,8	64,1	3,7
Abfallwirtschaft und Sonstiges	5,0	5,8	4,9	0,9
Gesamt	543,0	736,5	613,7	122,8
LULUCF	0,0	19,0	16,3	2,7

Quelle: Berechnungen Öko-Institut. Der LULUCF-Sektor wird nach der EU-Verordnung 2018/841 (LULUCF-Verordnung) separat betrachtet.

Mit Blick auf die Ziele im Rahmen der EU-Klimaschutzverordnung (ESR) zeigt sich, dass der Zielpfad mit dem Klimaschutzprogramm 2030 nicht erreicht wird (Abbildung 2). Zu Beginn der Dekade (2020) ergibt sich, noch unter der bis 2020 geltenden Effort Sharing Decision (ESD), eine Zielverfehlung von insgesamt 30 Mio. t CO₂e. Im Verlauf der Dekade wächst die Zielverfehlung deutlich an und erreicht im Jahr 2030 46 Mio. t CO₂e.

Abbildung 2: Treibhausgasemissionen im ESR-Sektor



Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Berechnungen Öko-Institut basierend auf den Emissionen der Sektoren, die im Rahmen der Effort Sharing Decision (ESD) für 2016, 2017 und 2018 erfasst werden, siehe auch (Öko-Institut 2019).

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel des Klimaschutzprogramms 2030, die in den Sektoren untersucht wurden und deren Minderungswirkung.

Tabelle 3: Wirkung der Einzelmaßnahmen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) gegenüber dem Referenzszenario (REF)

Sektor	Einzelmaßnahmen	2025	2030	2035
		Mio. t CO ₂		
Energiewirtschaft	Schrittweise Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung auf Basis der Empfehlungen der Kommission WSB	52	78	114
	Ausbau der EE auf 65 % Anteil am Bruttostromverbrauch bis 2030	21	17	26
	Weiterentwicklung und umfassende Modernisierung der KWK	-2	-2	-1
	Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umstellen	0	2	3
Industrie	1: Maßnahmenbündel: Förderung der Energieeffizienz	1,0	2,0	2,8
	2: Maßnahmenbündel: Förderung der Materialeffizienz	0,4	1,1	1,7
	3: Maßnahmenbündel: Markteinführung CO ₂ -armer Herstellungsverfahren*	2,1	4,7	8,1
	4: Maßnahmenbündel: CO ₂ -Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr	0,3	1,2	2,4
Gebäude	Steuerliche Förderung Gebäudesanierung (inkl. „Türöffner-Effekt“ der CO ₂ -Bepreisung)	0,1	0,4	0,8
	Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG), inkl. Ölkesselverbot (und inkl. „Türöffner-Effekt“ der CO ₂ -Bepreisung)	0,2	1,1	2,2
	Serielle Sanierung	0,0	0,0	0,0
	Energetische Stadtsanierung	Keine Wirkungsabschätzung		
	Energieberatung	0,0	0,0	0,0
	Vorbildfunktion Bundesgebäude	0,0	0,0	0,1

Sektor	Einzelmaßnahmen	2025	2030	2035
		Mio. t CO ₂		
	Weiterentwicklung des energetischen Standards	0,0	0,0	0,0
	Städtebauförderung (StBauF)	Keine Wirkungsabschätzung		
	Innovationsprogramm Zukunft Bau	0,0	0,0	0,0
	EffSTRA	0,0	0,0	0,0
	CO ₂ -Bepreisung (ohne „Türöffner-Effekte“)	0,0	0,4	1,4
	Änderungen Wohngeld und Mietrecht	Keine Wirkungsabschätzung		
Verkehr	EU-CO ₂ -Standards für Pkw, LNF, Lkw	1,8	8,3	15,7
	CO ₂ -Preis und Entfernungspauschale	2,8	6,1	8,6
	Kaufprämie E-Pkw und Kfz-Steuer	1,8	1,4	0,6
	Elektrifizierung Schiene, Busse, Lkw	0,4	1,0	1,0
	Förderung Schiene + ÖV + Rad	0,6	0,6	0,6
	Förderung Schienengüterverkehr	0,9	1,8	1,7
	CO ₂ -arme Kraftstoffe	1,2	2,7	6,7
Landwirtschaft	Senkung der Stickstoffüberschüsse und -emissionen einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen und gezielte Verminderung von Lachgasemissionen	0,0	0,5	0,5
	Energetische Nutzung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und landwirtschaftlicher Reststoffe in Biogasanlagen	0,6	1,6	1,6
	Ausweitung der ökologisch bewirtschafteten Fläche	0,5	0,9	0,9
	Emissionsminderung in der Tierhaltung	0,2	0,3	0,3
	Erhöhung der Energieeffizienz	0,3	0,6	0,6

Sektor	Einzelmaßnahmen	2025	2030	2035
		Mio. t CO ₂		
	Schutz von Moorböden	0,0	0,2	0,2
Abfall	Förderprogramm zur Ausweitung der Deponiebelüftung und Optimierung der Gaserfassung	0,3	0,8	1,1
	Vermeidung von Lebensmittelabfällen	0,1	0,1	0,1
LULUCF	Humusaufbau	1,0	1,0	1,0
	Moorbodenschutz	0,7	1,7	2,6

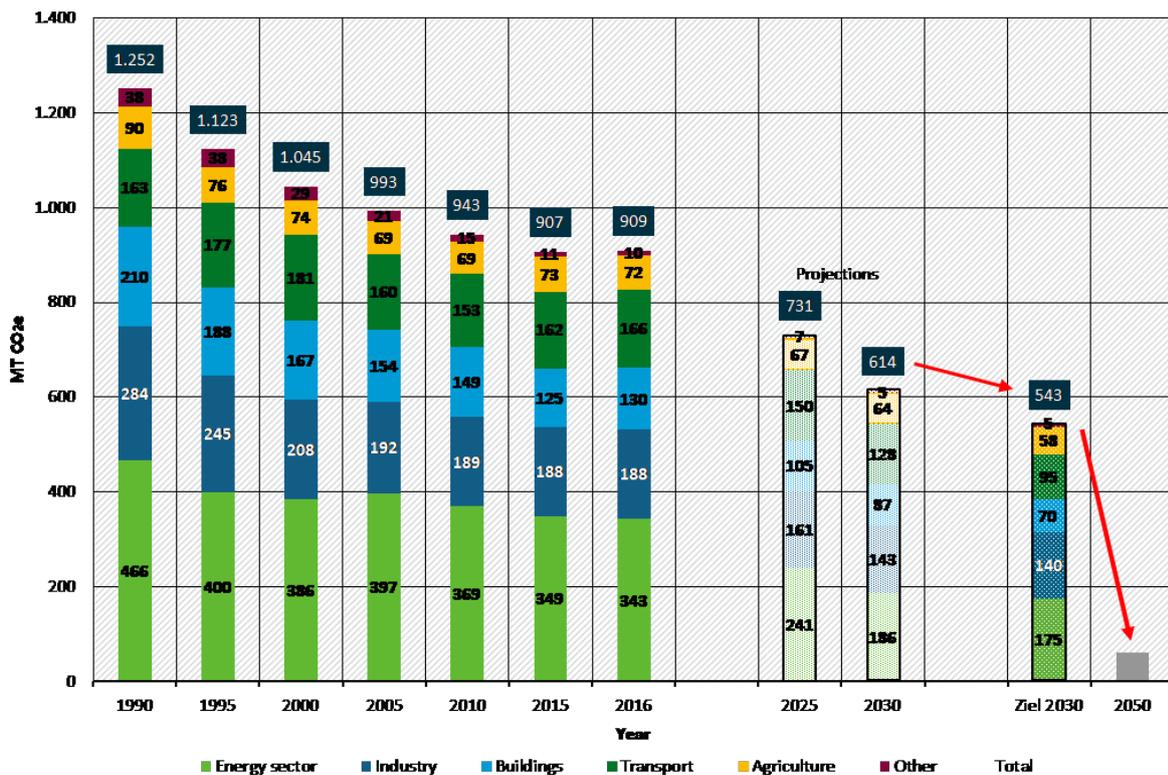
* Die Minderungswirkung in den jeweiligen Jahren berücksichtigt bei allen Maßnahmen keine Umsetzungszeiträume, sondern geht von einer sofortigen Mittelverwendung aus. Besonders bei Maßnahmenbündel 3 ist jedoch davon auszugehen, dass es einen größeren Zeitversatz zwischen der Mittelvergabe und der realisierten CO₂-Einsparung geben wird. Entsprechend kann sich die CO₂-Minderung durchaus um 1 bis 2 Jahre nach hinten verschieben. Dies gilt besonders für den für 2025 ausgewiesenen Wert.

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

Summary

Figure 1 shows the projected development of greenhouse gas emissions over time in the Climate Action Programme 2030 scenario (implementation status as of January 2020). This projection makes clear that the climate targets for 2030 will not be met based on the current Climate Action Programme. A reduction of approx. 51 % is achieved by 2030. This means that the overall reduction target laid down in the Federal Climate Change Act will be missed by 70.7 million t CO₂e.⁹ Particularly large are the gaps to meeting the targets in the transport and buildings sectors¹⁰, followed by the energy sector.¹¹

Figure 1: Greenhouse gas emissions in the Climate Action Programme 2030 scenario (KSPR (Jan 2020)), 1990-2035



Source: Calculations by Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

Table 1 compares the greenhouse gas emissions of the individual sectors in the Climate Action Programme 2030 scenario (KSPR (Jan 2020)) with the respective targets of the German Federal Climate Change Act. This shows that the energy, buildings and transport sectors, which are emission-intensive, already miss the targets in 2025, in part by a substantial margin.

In the energy sector, the gap to meeting the target amounts to approx. 11 million t CO₂e in 2030, despite the reduction of lignite and hard coal capacities on the market and compliance with the

⁹ In principle, it should be borne in mind that estimating the mitigation effects of a climate policy program is always associated with great uncertainty since assumptions have to be made about the national economic framework conditions and the implementation of the measures. It cannot be an exact forecast and serves rather as a description of a possible and, according to current knowledge, probable scenario. The corresponding uncertainties should be taken into account when interpreting the results.

¹⁰ See Tabelle 84.

¹¹ The mitigation effects of the measures in the Climate Action Programme 2030 were estimated based on the implementation status as of January 2020. The effects of the Covid-19 pandemic and of the economic policy measures are not taken into account here.

expansion targets for renewable energies. The gap to meeting the targets in the building and transport sectors increases between 2025 and 2030 (in 2025 the gaps amount to 11 million t CO₂e and 27 million t CO₂e respectively and in 2030 to 17 million t CO₂e and 33 million t CO₂e). This makes clear that, according to the present estimate, the climate protection measures adopted in these two sectors will not be sufficient to meet the respective targets despite the introduction of carbon pricing by the Fuel Emission Trading Act (BEHG).

Table 1: Greenhouse gas emissions in the Climate Action Programme 2030 scenario (KSPR (Jan 2020)) compared to the targets of the Federal Climate Change Act in Mt CO₂e

	2025			2030		
	Target ¹²	KSPR (Jan 2020)	Difference	Target	KSPR (Jan 2020)	Difference
Energy sector	n/a			175.0	186.1	11.1
Industry	163.0	160.7	-2.3	140.0	143.4	3.4
Buildings	94.0	105.4	11.4	70.0	86.8	16.8
Transport	123.0	150.0	27.0	95.0	128.4	33.4
Agriculture	64.0	67.1	3.1	58.0	64.1	6.1
Waste and other	7.0	6.6	-0.4	5.0	4.9	-0.1
Total	n/a			543.0	613.7	70.7
LULUCF		9.5		0.0	16.3	

Source: Calculations by Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, (Bundesregierung 2019b)

Values **in bold** mean that the target is not met; values *in italics* mean that the targets are overachieved.

Table 2 compares the results of the Reference Scenario and the Climate Action Programme 2030 scenario with the respective sector targets for 2030.

In the energy sector, the decrease in greenhouse gas emissions is mainly due to the reduction of the installed capacity of lignite and hard coal on the market. The further expansion of renewable energies¹³ is another important driver of emissions reduction. Compared to the reference development, the Climate Action Programme 2030 saves 83 million t CO₂e by 2030.

In the industry sector, the greenhouse gas emissions are reduced by efficiency measures, fuel switch, material efficiency and closed-loop materials management, low carbon production processes and carbon capture, storage and utilization and the implementation of carbon pricing in non-ETS sector. Compared to the reference development, 9 Mt CO₂e are saved by 2030 as a result of the Climate Action Programme 2030.

In the buildings sector, the greenhouse gas emissions are reduced by 4 Mt CO₂e through the Climate Action Programme 2030 compared to the reference development. The bundle of measures is mainly oriented to improving the promotion of energy efficiency and renewable heat and the introduction of carbon pricing.

¹² For 2025, the German Climate Change Act has not specified permissible annual emission levels for the energy sector. This means that the overall target for this year cannot be stated either.

¹³ It should be noted, however, that the gap to meeting the target can also be higher if the planned target for the expansion of renewable energies is not achieved. See Annex A.1 for a corresponding evaluation.

In the transport sector, the largest driver of emission reductions is the updating of emissions standards for passenger cars, light commercial vehicles and trucks (already adopted on EU level), followed by the approved carbon pricing. Compared to the reference development, 22 Mt CO₂e are saved in the transport sector by 2030 based on the Climate Action Programme 2030.¹⁴

In the agriculture sector, greenhouse gas emissions are reduced by decreasing nitrogen surpluses and promoting organic farming. Compared to the reference development, 4 Mt CO₂e are saved by 2030 based on the Climate Action Programme 2030.

In the waste sector, greenhouse gas emission reductions of 1 Mt CO₂e are achieved by means of the Climate Action Programme 2030, above all by expanding landfill aeration and optimizing gas capture. This sector achieves its target.

In the sector of land use, land use change and forestry (LULUCF), greenhouse gas emissions are reduced by 3 Mt CO₂e compared to the reference development based on the measures in the Climate Programme. These measures comprise maintaining the humus content of arable land and moorland protection.

Table 2: Comparison of scenario results for 2030 and the climate targets in Federal Climate Change Act in Mt CO₂e

Sector	Sector targets ¹⁵	Estimated greenhouse gas emissions 2030		
		Reference scenario	KSPr (Jan 2020)	Additional emission saving compared to reference scenario
Mt CO ₂ e				
Energy sector	175.0	269.0	186.1	82.9
Industry	140.0	152.4	143.4	9.0
Buildings	70.0	91.2	86.8	4.4
Transport ¹⁶	95.0	150.3	128.4	21.9
Agriculture	58.0	67.8	64.1	3.7
Waste and other	5.0	5.8	4.9	0.9
Total	543.0	736.5	613.7	122.8
LULUCF	0.0	19.0	16.3	2.7

Source: Calculations by Öko-Institut. The LULUCF sector is considered separately in accordance with the EU Regulation 2018/841 (LULUCF Regulation).

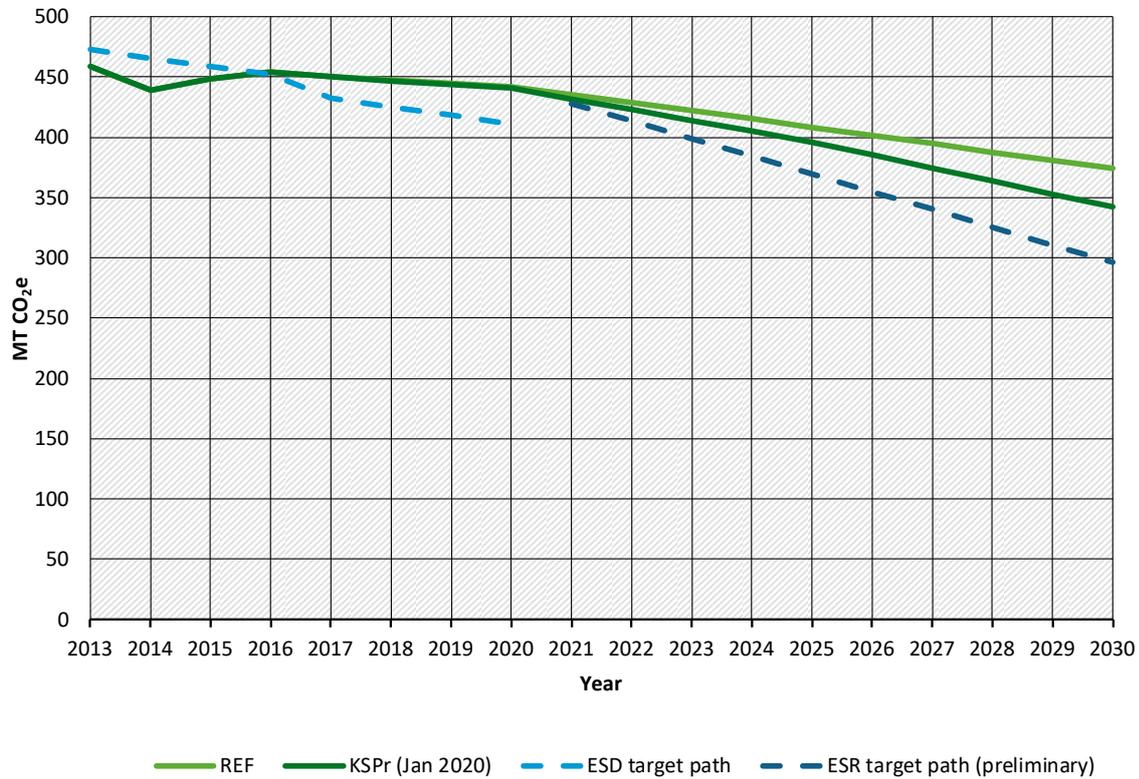
¹⁴ Updating the emission standards is not actually part of the Climate Action Programme 2030; however, for the sake of consistency with the reference development of the National Platform for the Future of Mobility (NPM), the passenger car standards were not included in the reference development either. They are discussed in Section 7.5 and a quantitative evaluation of the reference development with passenger car standards is provided.

¹⁵ According to the draft of the German Climate Change Act (Bundesregierung 2019b), Annex 2 to § 4, the permitted annual emission levels correspond to the lower limit of the sector targets for 2030. No sector targets for LULUCF are specified in the Climate Change Act. However, according to the Climate Action Plan 2050, the LULUCF sector is to retain its sink capacity up to 2030. The Climate Change Act also refers to measures to preserve the net sink (§9 (1)). These measures result in net emissions for the sector of a maximum of 0 Mt CO₂e.

¹⁶ See footnote 14.

With regard to the targets within the framework of the EU Effort Sharing Regulation (ESR), it is evident that the target path will not be achieved with the Climate Change Programme 2030 (Figure 2). At the beginning of the decade (2020), the gap to fulfilling the target under the Effort Sharing Decision (ESD) amounts to 30 Mt CO₂e in total. In the course of the decade, the gap increases substantially and achieves 46 Mt CO₂e in 2030.

Figure 2: Greenhouse gas emissions in ESR sector



Source: Calculations by Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES; calculations by Öko-Institut are based on the sectoral emissions covered by the EU Effort Sharing Decision (ESD) for 2016, 2017 and 2018, see also (Öko-Institut 2019).

Table 3 provides an overview of the measures and bundles of measures in the Climate Action Programme 2030, which were analyzed in the sectors, and their mitigation effects.

Table 3: Effects of measures in the Climate Action Programme 2030 (Jan 2020) scenario compared to the Reference Scenario (REF)

Sector	Measures	2025	2030	2035
		Mt CO ₂		
Energy sector	Phase-out of coal-fired electricity generation based on recommendations of the WSB Commission	52	78	114
	Expansion of renewables to 65 % share of gross electricity consumption by 2030	21	17	26

Sector	Measures	2025	2030	2035
		Mt CO ₂		
	Further development and comprehensive modernization of CHP	-2	-2	-1
	Increasing conversion of heat networks to use renewable energy and unavoidable waste heat	0	2	3
Industry	1: Bundle of measures: promotion of energy efficiency	1.0	2.0	2.8
	2: Bundle of measures: promotion of material efficiency	0.4	1.1	1.7
	3: Bundle of measures: market introduction of low carbon manufacturing processes*	2.1	4.7	8.1
	4: Bundle of measures: carbon pricing in the heat and transport sectors	0.3	1.2	2.4
Buildings	Tax incentives for building refurbishment (incl. "door-opener effect" of carbon pricing)	0.1	0.4	0.8
	"Efficient buildings" programme (BEG), incl. ban on oil-fired boilers (and incl. "door-opener effect" of carbon pricing)	0.2	1.1	2.2
	Serial refurbishment	0.0	0.0	0.0
	Energy retrofitting of cities	No estimation of effect		
	Energy consultations	0.0	0.0	0.0
	Role model function of federal buildings	0.0	0.0	0.1
	Raising energy standard	0.0	0.0	0.0
	Urban development (StBauF)	No estimation of effect		
	Innovation programme „Zukunft Bau“	0.0	0.0	0.0
	EffSTRA	0.0	0.0	0.0
	Carbon pricing (w/o "door-opener effects")	0.0	0.4	1.4

Sector	Measures	2025	2030	2035
		Mt CO ₂		
	Changes in housing benefits and tenancy law	No estimation of effect		
Transport	EU emission standards for passenger cars, light commercial vehicles and trucks	1.8	8.3	15.7
	Carbon price and commuting allowance	2.8	6.1	8.6
	Buyer's premium for electric vehicles and vehicle tax	1.8	1.4	0.6
	Electrification of rail, buses and trucks	0.4	1.0	1.0
	Promotion of rail + public transport + cycling	0.6	0.6	0.6
	Promotion of rail freight transport	0.9	1.8	1.7
	Low carbon fuels	1.2	2.7	6.7
Agriculture	Reduction of nitrogen surplus and emissions incl. reduction of ammonia emissions and targeted reduction of nitrous oxide emissions	0.0	0.5	0.5
	Energy use of animal manure and agricultural residues in biogas plants	0.6	1.6	1.6
	Expansion of organic areas	0.5	0.9	0.9
	Emission reduction in animal husbandry	0.2	0.3	0.3
	Increase of energy efficiency	0.3	0.6	0.6
	Moorland protection	0.0	0.2	0.2
Waste	Support program for expanding landfill aeration and optimizing gas capture	0.3	0.8	1.1
	Avoiding food waste	0.1	0.1	0.1
LULUCF	Increasing humus content of arable land	1.0	1.0	1.0
	Moorland protection	0.7	1.7	2.6

* The mitigation effect in the respective years does not take into account the implementation periods of measures; rather it is assumed that the funds are used immediately. However, especially in the case of the third bundle of measures, it can be

assumed that there will be a longer time lag between the allocation of funds and the reduction of CO₂. Correspondingly, the CO₂ reduction may well come about 1 to 2 years later. This applies in particular to the estimated reduction for 2025.

Source: Calculations by Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

1 Einleitung

Mit dem Klimaschutzprogramm 2030 hat die Bundesregierung am 9. Oktober 2019 ein umfassendes Programm zur Minderung der Treibhausgasemissionen in Deutschland beschlossen. Kernelemente sind das Bundes-Klimaschutzgesetz, das Brennstoffemissionshandelsgesetz, das Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 in Steuerrecht, der ausgehandelte Kompromiss zum Kohleausstieg und ein umfangreiches Investitionsprogramm.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 auf Grundlage der beschlossenen Einzelmaßnahmen sowie der übergreifenden Maßnahmen abzuschätzen und in Relation zu den Klimaschutzzielen der Bundesregierung für 2030 zu setzen. Mit einem umfassenden Modellierungsvorhaben wurde die Abschätzung der Minderungswirkung der beschlossenen Maßnahmen in Summe sowie auf Einzelmäßnahmenebene in den einzelnen Emissionssektoren – Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges – vorgenommen und in ein übergeordnetes Modell integriert. Hierdurch konnten Wechselwirkungen zwischen den Sektoren berücksichtigt werden, die in einer rein sektoralen Analyse nicht systematisch erfasst werden können.

Mit dem Vorhaben „Politikszenerien IX“ kommt das Umweltbundesamt (UBA) damit dem im Klimaschutzprogramm 2030 formulierten Arbeitsauftrag (Bundesregierung 2019c) nach, die Minderungswirkung des Programms unter der Berücksichtigung entsprechender Wechselwirkungen abzuschätzen. Entsprechend dem dort formulierten Auftrag hat parallel zu der vorliegenden Abschätzung ein Forschungskonsortium im Auftrag des BMWi eine vergleichbare Abschätzung vorgelegt.¹⁷

Grundsätzlich gilt zu berücksichtigen, dass entsprechende Szenarien immer mit Unsicherheiten verbunden sind, da weitreichende Annahmen zu vielen wesentlichen Parametern getroffen werden müssen. Daher müssen die Ergebnisse als ein mögliches und unter den Voraussetzungen zum Zeitpunkt der Modellierung wahrscheinliches Szenario betrachtet werden. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit macht sich die Ergebnisse der vorliegenden Studie nicht zu eigen.

Die berechneten Minderungswirkungen allein lassen keine Aussage darüber zu, welche Strategien oder Instrumente zur THG-Minderung am besten geeignet sind. Für eine umfassende Bewertung dieser Art wären neben dem THG-Minderungsbeitrag der Instrumente auch weitere Kriterien wie beispielsweise die sozialen Verteilungswirkungen, die Vermeidungskosten, und die Auswirkungen auf weitere zentrale ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeitsaspekte zu berücksichtigen.

Die Begutachtung der Minderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 erfolgt jeweils vor dem Hintergrund der durch die Bundesregierung und den Bundestag beschlossenen, rechtlich verbindlichen, Ziele zur Minderung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030. Hierfür sind vor allem (i) das Bundes-Klimaschutzgesetz und (ii) die EU-Klimaschutzverordnung (sog. Effort Sharing Regulation) maßgeblich.

Auf nationaler Ebene wurde mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (Bundesregierung 2019b) ein rechtlich verbindlicher Rahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele bis zum Jahr 2030 geschaffen. Demnach müssen die Treibhausgasemissionen insgesamt bis 2030 auf 543 Mio. t CO₂e sinken (dies entspricht einer Minderung um rund 56 Prozent ggü. 1990). Im Jahr 2018 wurden in

¹⁷ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutzprogramm-2030.html>

Deutschland insgesamt 858,4 Mio. t CO₂e emittiert (UBA 2020a). Zum einen wird mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz das Ziel der langfristigen Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 in § 1 des Gesetzes angestrebt. In § 3 wird dem Zieljahr 2030 eine Minderungsquote der Treibhausgasemissionen von mindestens 55 Prozent zugeordnet. Ergänzend sind in Anlage 2 des Bundes-Klimaschutzgesetzes für die Jahre zwischen 2020 und 2030 jahresspezifische, maximal zulässige Emissionsmengen für die einzelnen Sektoren vorgegeben (Tabelle 4). Zeichnet sich ab, dass die in einem Jahr maximal zulässige Emissionsmenge in einem Sektor nicht eingehalten werden kann, so muss die Bundesregierung Sofortprogramme vorlegen, die die Einhaltung der Ziele in den Folgejahren ermöglichen. In jedem Klimaschutzprogramm legt die Bundesregierung unter Berücksichtigung des jeweils aktuellen Klimaschutz-Projektionsberichts fest, welche Maßnahmen sie zur Erreichung der Klimaschutzziele in den einzelnen Sektoren ergreifen wird.

Tabelle 4: Sektorziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes

Jahresemissionsmenge (Mio. t CO ₂ e)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Energiewirtschaft	280		257								175
Industrie	186	182	177	172	168	163	158	154	149	145	140
Gebäude	118	113	108	103	99	94	89	84	80	75	70
Verkehr	150	145	139	134	128	123	117	112	106	101	95
Landwirtschaft	70	68	67	66	65	64	63	61	60	59	58
Abfallwirtschaft und Sonstiges	9	9	8	8	7	7	7	6	6	5	5
Summe	813										543

Quelle: (Bundesregierung 2019b), Anlage 2 zu §4

Mit der EU-Klimaschutzverordnung ist die Bundesregierung verpflichtet, die Treibhausgasemissionen in den Sektoren, die nicht vom europäischen Emissionshandel umfasst sind, bis 2030 um 38 Prozent gegenüber dem Jahr 2005 zu mindern. Konkret beinhaltet dieses Ziel die Emissionen in den Sektoren Gebäude, Verkehr (bis auf internationalen Luft- und Seeverkehr), Landwirtschaft sowie Teile der Industrie und des Energiesektors. Mit der EU-Klimaschutzverordnung wird auch ein jahresscharfer, linearer Minderungspfad für diese Sektoren für die Jahre zwischen 2021 und 2030 vorgegeben, der aus den Emissionen in den Vorjahren ermittelt und im Herbst 2020 von der Europäischen Kommission offiziell für jedes Land per Durchführungsrechtsakt erlassen wird. Tabelle 5 zeigt die vorläufigen Zielwerte für die Gesamtbudgets der zulässigen Treibhausgasemissionen jenseits des EU-Emissionshandels. Verfehlen die Mitgliedsstaaten ihre jahresscharfen Ziele im Rahmen der EU-Klimaschutzverordnung und können sie die Mehremissionen nicht durch eigene stärkere Emissionsminderungen in früheren Jahren ausgleichen, müssen sie Emissionszuweisungen von anderen Mitgliedsstaaten erwerben.

Tabelle 5: Vorläufige Zielwerte aus der EU-Klimaschutzverordnung (Effort Sharing Regulation)

2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Mio. t CO ₂ e									
428,3	413,6	398,9	384,3	369,6	354,9	340,2	325,6	310,9	296,2

Quelle: Berechnungen Öko-Institut basierend auf den Emissionen der Sektoren, die im Rahmen der Effort Sharing Decision (ESD) für 2016, 2017 und 2018 erfasst werden, siehe auch (Öko-Institut 2019).

In der nachfolgenden Abschätzung wurden sämtliche Beschlüsse der Bundesregierung mit Bezug zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030, die bis zum 29. Januar 2020 getroffen wurden, berücksichtigt. Das bedeutet, dass sowohl die im Vermittlungsausschuss zwischen Bund und Ländern am 18. Dezember 2019 erzielte Einigung (unter anderem zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 im Steuerrecht und zum Brennstoffemissionshandelsgesetz, hier insbesondere zum CO₂-Preispfad), als auch der Kabinettsbeschluss vom 29. Januar 2020¹⁸ zum Zeitplan für die Stilllegung von Braun- und Steinkohle-Kraftwerken in der Berechnung berücksichtigt worden sind. Die Auswirkungen der Corona-Pandemie und die von der Bundesregierung beschlossenen konjunkturpolitischen Maßnahmen sind nicht in der vorliegenden Abschätzung berücksichtigt.

Soweit Beschlüsse zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 noch ausstehen, wurden Annahmen zur Parametrisierung (d.h. von welcher Umsetzung der Maßnahmen vor dem Hintergrund der jetzigen Beschlusslage und der bisherigen Umsetzung vergleichbarer Maßnahmen auszugehen ist) getroffen und mit dem Umweltbundesamt und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit abgestimmt. Diese Annahmen werden erwartungsgemäß im Laufe der Umsetzung durch konkrete Beschlüsse ersetzt werden, die von diesen Annahmen abweichen können bzw. werden.

Methodisch folgt dieser Bericht dem Ansatz des Projektionsberichts der Bundesregierung, der bereits im Mai 2019 veröffentlicht wurde (Bundesregierung 2019d). Für die Berechnungen wurden im Zuge der Vorarbeiten zum Projektionsbericht ressortabgestimmte Rahmendaten verwendet. Im Gegensatz zum Projektionsbericht 2019 werden in diesem Bericht alle Ergebnisse gemäß dem Zuschnitt der Sektoren aus dem Klimaschutzplan 2050 dargestellt¹⁹, um die Lesbarkeit mit Bezug auf die Klimaschutzziele zu vereinfachen.

Dieser Bericht umfasst eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens und der Annahmen sowie der Ergebnisse, einschließlich einer Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung der Einzelmaßnahmen.

In diesem Bericht werden zwei Szenarien dargestellt:

- ▶ **Referenzszenario („REF“):** Stellt das Referenzszenario zum Klimaschutzprogramm 2030 dar. Hinsichtlich der Politiken und Maßnahmen werden alle Maßnahmen berücksichtigt, die bis 31. August 2018 verabschiedet worden sind. In einigen Sektoren basiert das Referenzszenario auf den Modellierungen des Mit-Maßnahmen-Szenarios des Projektionsberichts 2019 (MMS). Für die Sektoren Verkehr, Gebäude, Energiewirtschaft sowie Abfallwirtschaft und

¹⁸ Das Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVVBG) wurde nach Beendigung der Modellierung vom Deutschen Bundestag verabschiedet (Bundestag 2020).

¹⁹ Eine Erläuterung der methodischen Unterschiede zwischen der internationalen Inventarstruktur und der Abgrenzung der Sektoren gemäß dem Klimaschutzplan kann (UBA 2019c) entnommen werden.

Sonstiges wurde das Referenzszenario auf Grund von zum Teil aktualisiert vorliegenden Daten, die in der Modellierung berücksichtigt wurden, neu berechnet. Zum anderen wurden Annahmen mit anderen vorliegenden Abschätzungen abgeglichen und harmonisiert. Die Änderungen gegenüber dem MMS des Projektionsberichts 2019 werden in den jeweiligen Kapiteln zu den einzelnen Sektoren kurz beschrieben. Dieses Szenario ist notwendig, um die zusätzliche Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 in Bezug zu einer aktuellen Referenz zu setzen.

- ▶ **Szenario Klimaschutzprogramm 2030 („KSPr (Jan 2020)“):** Stellt die Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 mit Stand vom 29. Januar 2020 dar.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Berechnung der Szenarien im ersten Quartal 2020 abgeschlossen wurden und der dazugehörige Kurzbericht am 5. März 2020 veröffentlicht wurde (Öko-Institut et al. 2020). Damit ist der zu erwartende starke Rückgang der Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 durch die Corona-Krise nicht in der Modellierung berücksichtigt. Aus diesem Grund sind die für dieses Jahr modellierten Emissionen nicht als Prognose der tatsächlich zu erwartenden Entwicklungen zu werten. Nichtsdestotrotz gibt der Vergleich der beiden Szenarien (REF und KSPr (Jan 2020)) Aufschluss über die zu erwartende Wirksamkeit des Klimaschutzprogramms 2030 gegenüber einer Entwicklung ohne diese Maßnahmen.

Das Kapitel 2 enthält eine Übersicht zum methodischen Ansatz der Szenarienentwicklung.

Im Kapitel 3 werden die demographischen und gesamtwirtschaftlichen Rahmenannahmen, die angenommene Entwicklung der Primärenergiepreise sowie die Preise für die Treibhausgasemissionszertifikate und die CO₂-Preise für Verkehr und Wärme beschrieben.

Die Kapitel 4 bis 10 enthalten die Einzelanalysen zu den einzelnen sektoralen Projektionen. In den Kapiteln 11 und 12 wird die Entwicklung des Primär- und Endenergieverbrauchs dargestellt. Kapitel 13 enthält die Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen.

2 Methodischer Ansatz

2.1 Definition und Abgrenzung der Sektoren

Die Definition der einzelnen Sektoren dieses Berichts erfolgt in Anlehnung an die Abgrenzung der einzelnen Handlungsfelder des Klimaschutzplans 2050 (KSP 2050) der Bundesregierung (in Klammern die jeweiligen Quellgruppen im *Common Reporting Format*):

- ▶ **Energiewirtschaft:** Diese Energiewirtschaft umfasst öffentliche Kraftwerke und Heizwerke (1.A.1.a), Raffinerief Feuerungen und -kraftwerke (1.A.1.b) sowie Kokereien und andere Anlagen des Umwandlungssektors einschließlich deren Kraftwerke (1.A.1.c). Darüber hinaus umfasst die Energiewirtschaft im KSP 2050 den Erdgaspipelinetransport (1.A.3.e) sowie diffuse Emissionen aus der Energienutzung (1.B). Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen im Handlungsfeld Energiewirtschaft ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- ▶ **Industrie:** Neben industriellen Prozessfeuerungen und Wärmeerzeugungsanlagen sowie Industriekraftwerken (1.A.2) sind im Sektor Industrie auch die Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung (2) enthalten. Da der Sektor Industrie genauer als Verarbeitendes Gewerbe und Bauwirtschaft definiert ist, sind auch die Emissionen des bauwirtschaftlichen Sonderverkehrs (1.A.2.g.vii) enthalten. Nicht enthalten hingegen sind Raffinerien (1.A.1.b), Kokereien und andere Anlagen des Umwandlungssektors (1.A.1.c). Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen im Handlungsfeld Industrie ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- ▶ **Gebäude:** Der Sektor Gebäude umfasst neben der Gebäudewärme auch den Brennstoffeinsatz für die Warmwasserbereitung²⁰ sowie weiteren Brennstoffeinsatz in Haushalten (1.A.4.b) und im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (1.A.4.a). Energieverbräuche landwirtschaftlicher Gebäude (z.B. Gewächshäuser) (1.A.4.c) sind nicht im Sektor Gebäude enthalten, sondern im Sektor Landwirtschaft. Federführende Ressorts für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen im Handlungsfeld Gebäude sind das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- ▶ **Verkehr:** Dieser Sektor umfasst den inländischen Straßen- (1.A.3.b), Schienen- (1.A.3.c) und Luftverkehr (1.A.3.a) sowie die Binnen- und Küstenschifffahrt (1.A.3.d). Der internationale Luftverkehr (1.D.1.a) und die Hochseeschifffahrt (1.D.1.b) werden hier auch behandelt, allerdings werden deren Treibhausgasemissionen nicht auf die inländischen Emissionen angerechnet, sondern lediglich nachrichtlich ausgewiesen. Sonderverkehre sind teilweise in anderen Sektoren enthalten, so ist der bauwirtschaftliche Verkehr im Industriesektor (1.A.2.g.vii), der landwirtschaftliche Verkehr (1.A.4.b.ii) und die Fischereischifffahrt (1.A.4.b.iii) im Sektor Landwirtschaft und Erdgaspipelinetransport (1.A.3.e) in der Energie-

²⁰ Emissionen in Bezug auf den Stromverbrauch für Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung werden im Sektor Energiewirtschaft bilanziert (siehe Abschnitt 2.1).

wirtschaft enthalten. Federführende Ressorts für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen im Handlungsfeld Verkehr ist das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

- ▶ **Landwirtschaft:** Neben den biologisch-chemischen Emissionen von Tieren und landwirtschaftlichen Böden (3) umfasst dieser Sektor auch die energetischen Emissionen der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei (1.A.4.c). Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen im Handlungsfeld Landwirtschaft ist das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
- ▶ **Sonstige:** Dieser Sektor umfasst die Emissionen, die aus der Behandlung und Lagerung von Abfall (Deponien und andere) sowie von Abwasser entstehen (5). Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen im Handlungsfeld Sonstige ist das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).
- ▶ **Landnutzung und Forstwirtschaft:** Dieser Sektor umfasst die Emissionen von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (englisch: Land use, land-use change and forestry) (4).²¹ Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen im Handlungsfeld Landnutzung und Forstwirtschaft ist das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).

Die Emissionen aus der Stromerzeugung werden also teilweise in der Energiewirtschaft und teilweise in der Industrie bilanziert (Eigenstromerzeugung in Kraftwerken des Verarbeitenden Gewerbes).

Tabelle 6 zeigt, welche Quellgruppen des Treibhausgasinventars (CRF-Kategorien) welchen Sektoren des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung zugeordnet werden.

²¹ Gegenüber den anderen KSP-Sektoren weist dieser Sektor zwei Besonderheiten auf: Zum einen gibt es kein Emissionsminderungsziel wie in den anderen Sektoren, gleichwohl das klare Ziel, die Nettosenke zu erhalten. Zum anderen wird er bei der Berechnung der Gesamtemissionen nicht miteinbezogen. Daher werden die Emissionen dieses Sektors nur nachrichtlich ausgewiesen.

Tabelle 6: Zuordnung von CRF-Kategorien zu KSP-2050- und PB-2019-Sektoren

CRF-Kategorie	KSP-2050-Sektor ²²	PB-2019-Sektor ²³	Kommentar
1.A.1.a Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	Energiewirtschaft	Energiewirtschaft	Öffentliche Kraftwerke, Heizkraftwerke und Heizwerke
1.A.1.b Mineralölraffinerien	Energiewirtschaft	Energiewirtschaft	Raffineriekraftwerke und -feuerungen
1.A.1.c Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger	Energiewirtschaft	Energiewirtschaft	U.a. Kokereien, Brikettfabriken, Antriebe im Kohlenbergbau, sonstige Kraftwerke der Energiewirtschaft
1.A.2 Verarbeitendes Gewerbe	Industrie	Industrie	Industriekessel, Prozessfeuerungen sowie Industriekraftwerke, die nicht in 1.A.1.b oder 1.A.1.c enthalten sind
1.A.3.a Ziviler Luftverkehr	Verkehr	Verkehr	
1.A.3.b Straßenverkehr	Verkehr	Verkehr	
1.A.3.c Schienenverkehr	Verkehr	Verkehr	
1.A.3.d Schifffahrt	Verkehr	Verkehr	Binnen- und Küstenschifffahrt
1.A.3.e Übriger Verkehr	Energiewirtschaft	Verkehr	Erdgaspipelineverdichter
1.A.4.a Gewerbe, Handel, Dienstleitungen	Gebäude	GHD	
1.A.4.b Haushalte	Gebäude	Private Haushalte	
1.A.4.c Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei	Landwirtschaft	GHD	Energiebedingte Emissionen
1.A.5 Andere Bereiche	Gebäude	GHD	Militär (stationär und mobil)
1.B Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	Energiewirtschaft	Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	
1.D.1 Internationaler Luftverkehr und Hochseeschifffahrt	Keiner	Keiner	
2 Industrieprozesse	Industrie	Industrieprozesse und Produktverwendung	Einschließlich Produktverwendung
3 Landwirtschaft	Landwirtschaft	Landwirtschaft	Biologisch-chemische Emissionen
4 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft	Landnutzung und Forstwirtschaft	LULUCF	
5 Abfall und Abwasser	Sonstige	Abfallwirtschaft	Abfallverbrennung ist in Energiewirtschaft und Industrie enthalten

Quelle: Öko-Institut

Tabelle 7 zeigt zur Erläuterung, wie sich die deutschen Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 auf die im Klimaschutzplan 2050 definierten Sektoren verteilen und aus welchen Inventarkategorien sich die Sektoren zusammensetzen. Insgesamt betragen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 909,4 Mio. t CO₂e. Davon entfielen 147,5 Mio. t CO₂e auf nicht-verbrennungsbedingte Emissionen und 761,9 Mio. t CO₂e auf verbrennungsbedingte Emissionen.

Tabelle 7: Zusammensetzung der Treibhausgas-Emissionen der im Klimaschutzplan aufgeführten Sektoren (Mio. t CO₂e im Jahr 2016)

	Verbrennungsbedingte Emissionen				Nicht-verbrennungsbedingte Emissionen		Summe
	Mio. t	CRF	Mio. t	CRF	Mio. t	CRF	
Energiewirtschaft	332,2	1.A.1	1,2	1.A.3.e	10,0	1.B	343,4
Industrie	126,4	1.A.2			61,8	2	188,2
Gebäude	91,5	1.A.4.b	38,5	1.A.4.a + 1.A.5			130,0
Verkehr	165,6	1.A.3.a-d					165,6
Landwirtschaft	6,6	1.A.4.c			65,2	3	71,8
Sonstige					10,5	5	10,5
Summe	761,9				147,5		909,4

Quelle: Deutsches Treibhausgas-Inventar, CRF-Tabellen, Stand 5. April 2018

2.2 Methodischer Ansatz für die Emissionsprojektion

Die Erstellung der Projektionen des Referenzszenarios sowie des Szenarios zum Klimaschutzprogramm 2030 für die (deutschen) Treibhausgasemissionen bis 2035 erfolgt auf der Basis von Annahmen zur

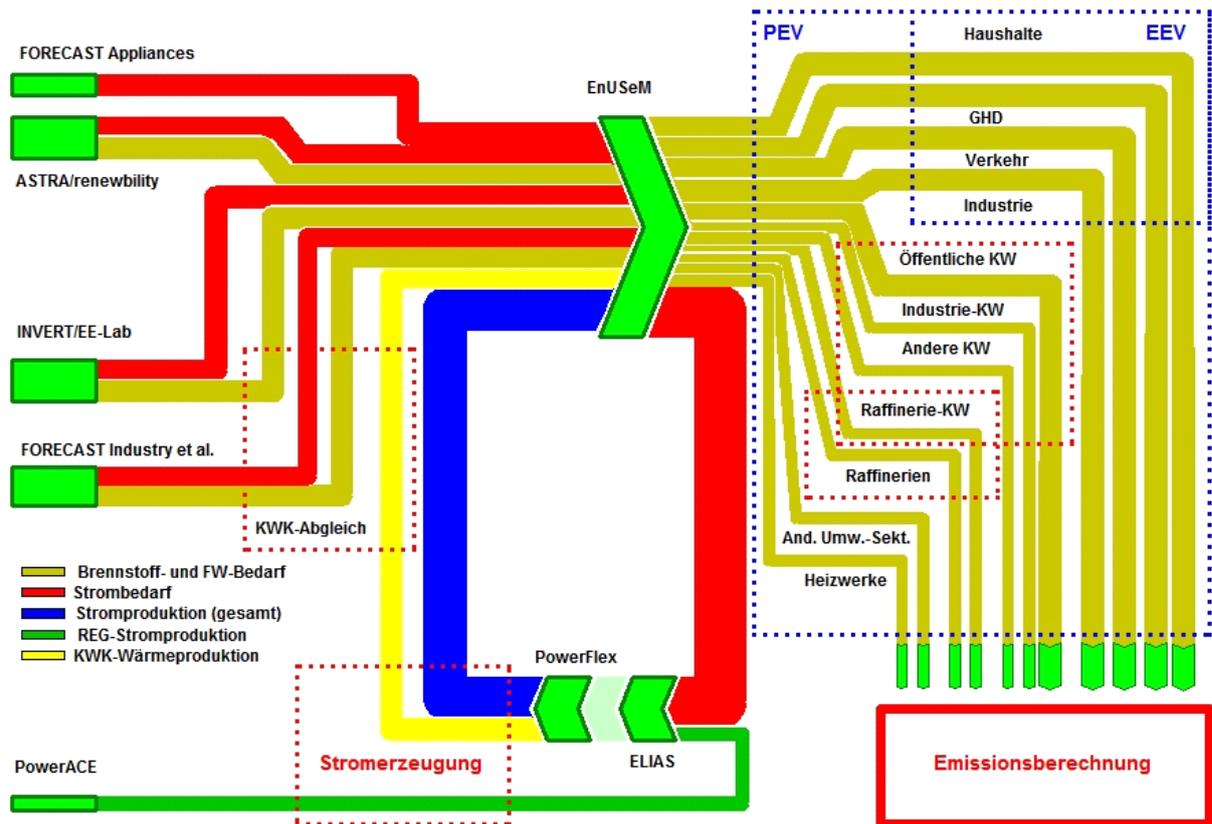
- ▶ Bevölkerungsentwicklung,
- ▶ Wirtschafts- und Wirtschaftsstrukturentwicklung,
- ▶ Energiepreisentwicklungen,
- ▶ Politiken und Maßnahmen sowie
- ▶ technische und sektorspezifische Faktoren.

Die Analyse und Bewertung der verschiedenen Maßnahmen, die Ermittlung der entsprechenden sektoralen Treibhausgasemissionen sowie der notwendigen Hintergrundinformationen und -indikatoren für diesen Bericht folgen für die verschiedenen Sektoren unterschiedlichen methodischen Ansätzen bzw. basieren auf unterschiedlichen Modellinstrumentarien, die für die verschiedenen Bereiche auf Basis der verfügbaren Daten und Informationen eine adäquate Analyse erlauben.

²² Entsprechend dem Bundes-Klimaschutzgesetz

²³ Entsprechend der Inventarstruktur gemäß UNFCCC und Governance-Verordnung.

Abbildung 3: Modellübersicht zur Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

Für die energiebedingten Treibhausgasemissionen aus Verbrennungsprozessen basieren die Analysen auf einem komplexen System verschiedener Modelle (Abbildung 3):

- Die Stromerzeugung auf Basis fossiler Energieträger sowie die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird mit dem PowerFlex-Modell des Öko-Instituts analysiert (siehe Abschnitt 4.1). Die Wärmeerzeugung von KWK-Anlagen wird in diesem Modell ebenfalls modelliert.
- Die Integration des Mengengerüsts für den Energieverbrauch, die Ermittlung des Primärenergieverbrauchs sowie des Energieeinsatzes in den anderen Umwandlungssektoren wird mit dem Integrationsmodell ENUSEM des Öko-Instituts durchgeführt (siehe Abschnitt 11 und 12).
- Für den Verkehrsbereich erfolgt die Modellierung mit dem Modell TEMPS des Öko-Instituts (siehe Abschnitt 7).
- Für den Gebäudesektor (im Bereich der Wohn- und Nichtwohngebäude) wird das Modell INVERT / EE-Lab des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) sowie der TU Wien genutzt. Die Abschätzung der Wirkung einzelner Politikinstrumente erfolgt durch das Öko-Institut anhand bestehender Evaluationen oder Auswertungen der entsprechenden Instrumente. (siehe Abschnitt 6.2).
- Analysen für den verbleibenden Brennstoff- und Strombedarf im Sektor Gebäude werden unter der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI durchgeführt (siehe Abschnitt 6.4).

- f) Die Analysen für den Strom- und Brennstoffbedarf der Sektoren Industrie sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistung erfolgen unter der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI, die auf einzelnen Sektormodellen beruht (siehe Abschnitt 5.1 und 6.4).

Die Emissionsermittlung für die Treibhausgasemissionen aus Verbrennungsprozessen erfolgt mit dem Emissionsmodell des Öko-Instituts, das die in ENUSEM aggregierten Energiebedarfsprojektionen für die verschiedenen Endverbrauchs- und Umwandlungssektoren in der Systematik der Nationalen Treibhausgasemissionen emissionsseitig bewertet.

Für die flüchtigen Emissionen des Energiesektors erfolgt eine quellgruppenspezifische Modellierung auf Basis des Mengengerüsts für die Energienachfrage und -bereitstellung sowie den für das Nationale Treibhausgasinventar genutzten Methoden (siehe 4.3).

Für die Emissionen aus Industrieprozessen werden drei verschiedene Ansätze verfolgt:

- a) Für die prozessbedingten Emissionen mit Bezug zum Energiesektor werden die Emissionen auf Basis des Mengengerüsts für die Energienachfrage und -bereitstellung im Emissionsmodell ENUSEM des Öko-Instituts mit den für das Nationale Treibhausgasinventar verwendeten Methoden ermittelt.
- b) Für die prozessbedingten Emissionen ohne Bezug zum Energiesektor werden die Emissionen auf der Basis von Produktionsschätzungen im Emissionsmodell ENUSEM des Öko-Instituts in Anlehnung an die für das Nationale Treibhausgasinventar verwendeten Methoden ermittelt (siehe Abschnitt 5.3).
- c) Für die HFKW-, FKW-, SF₆- und NF₃-Emissionen werden vorliegende Projektionen aktualisiert und angepasst (siehe Abschnitt 5.4).

Die Projektionen der Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft sowie von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) werden für das Referenzszenario dem Projektionsbericht 2019 entnommen (Bundesregierung 2019d) (siehe Abschnitte 8.3 und 10.2). Die Projektionen aus der Landwirtschaft für das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 werden mit dem Sektormodell LiSE - Livestock and Soil Emissions ermittelt (siehe Abschnitt 8.6), die Projektion für den LULUCF-Bereich wird ebenfalls durch das Öko-Instituts erstellt (Abschnitt 10.4).

Für die Treibhausgasemissionen aus der Abfallwirtschaft wird das für die Erstellung der Nationalen Treibhausgasinventare verwendete IPCC Waste Model des Öko-Instituts für die Projektion verwendet (siehe Abschnitt 9).

Die Berechnungen der Szenarien in diesem Bericht sind in großem Maß vom nationalen Treibhausgasinventar abhängig. Das aktuelle zum Zeitpunkt der Berechnung dieser Szenarien verfügbare Treibhausgasinventar ist aus dem Berichtsjahr 2018 (UBA 2018c) und wurde unter Anwendung der *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC 2006) unter Verwendung von Treibhausgaspotentialen gemäß den aktuellen Inventar-Berichterstattungsrichtlinien (UNFCCC 2013) erstellt. Es enthält Daten für die Jahre 1990 bis 2016. Die primäre Datenquelle zur Erstellung dieses Berichts sind die historischen Daten im Treibhausgasinventar (UBA 2018c) sowie einer zu diesem Inventar konsistenten Datenauspielung aus dem Zentralen System Emissionen (ZSE) im Umweltbundesamt (UBA 2018b). Das Treibhausgasinventar ist nicht vollständig kompatibel mit den Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland (u.a. teilweise andere Sektordefinitionen und Brennstoffaggregationen). Daher kommt es teilweise zu Differenzen gegenüber der Energiebilanz. Im Treibhausgasinventar sind nur Aktivitätsdaten zu

brennstoffförmigen Energieträgern enthalten. Als primäre Datenquelle für nichtbrennstoffförmige Energieträger dienen die Energiebilanzen.²⁴

Fokus der Maßnahmenbewertung ist die inländische Emissionsreduktion. Interaktionseffekte von Maßnahmen mit dem EU-Emissionshandel können deshalb nicht berücksichtigt werden.

Die historischen Treibhausgasemissionen in diesem Bericht basieren auf dem am 13. April 2018 an das Klimasekretariat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) übermittelten Stand des nationalen Treibhausgasinventars (UBA 2018c) bis einschließlich 2016.

Manche Einzelinstrumente wirken nicht nur in einem Sektor, sondern adressieren mehrere Sektoren. Ihre Treibhausgasminderungswirkung wird somit in mehreren Sektoren quantifiziert. Tabelle 8 gibt eine Übersicht, in welchen Kapiteln die Einzelinstrumentenbewertungen zu finden sind.

Tabelle 8: Kapitelübersicht zu Einzelinstrumentenbewertung

Maßnahmentitel	Berichtskapitel
CO₂-Bepreisung	
CO ₂ -Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr	5.1.6, 6.2.5, 7.5.2
Entlastung von Bürgern und Wirtschaft	
Senkung der Stromkosten	6.3.5
Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler	7.5.2
Änderung beim Wohngeld und beim Mietrecht	6.2.5
Maßnahmen in den Sektoren	
Energiewirtschaft	
Schrittweise Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung auf Basis der Empfehlungen der Kommission WSB	4.1.6
Ausbau der EE auf 65Prozent Anteil am Bruttostromverbrauch bis 2030	4.1.6
Weiterentwicklung und umfassende Modernisierung der KWK	4.1.6
Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umstellen	4.1.6
Energieeffizienzstrategie 2050 (EffSTRA)	6.2.5
Investitionsprogramm – Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft	5.1.6
Gebäude	

²⁴ In den Abschnitten 11.1 und 12.1 werden die wesentlichen Unterschiede zwischen dem Treibhausgasinventar und den Energiebilanzen detailliert erläutert.

Maßnahmentitel	Berichtskapitel
Steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung	6.2.5
Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) einschließlich einer Austauschprämie für Ölheizungen	6.2.5
Förderung der seriellen Sanierung	6.2.5
Energetische Stadtsanierung	6.2.5
Energieberatung und Öffentlichkeitsarbeit	6.2.5
Vorbildfunktion Bundesgebäude	6.2.5
Weiterentwicklung des energetischen Standards	6.2.5
Klimaschutz durch städtische Nachverdichtung	6.2.5
Fortentwicklung des Innovationsprogramms Zukunft Bau	6.2.5
Energieeffizienzstrategie 2050 (EffSTRA)	6.2.5
Verkehr	
Stärkung des Schienenpersonenverkehrs (Handlungsfeld „ÖV, Rad- und Fußverkehr“)	7.5.2
Attraktivität des ÖPNV erhöhen (Handlungsfeld „ÖV, Rad- und Fußverkehr“)	7.5.2
Ausbau von Radwegen und Fahrradparkmöglichkeiten sowie Verbesserung der Rahmenbedingungen (Handlungsfeld „ÖV, Rad- und Fußverkehr“)	7.5.2
Entwicklung strombasierter Kraftstoffe (Handlungsfeld „Alternative Kraftstoffe“)	7.5.2
Unterstützung fortschrittlicher Biokraftstoffe (Handlungsfeld „Alternative Kraftstoffe“)	7.5.2
Stärkung des Schienengüterverkehrs (Handlungsfeld „Güterverkehr“)	7.5.2
Modernisierung der Binnenschifffahrt und Nutzung von Landstrom in Häfen (Handlungsfeld „Güterverkehr“)	7.5.2
CO ₂ -arme PKW auf die Straße bringen (Handlungsfeld „PKW“)	7.5.2
Tank- und Ladeinfrastruktur ausbauen (Handlungsfeld „Nutzfahrzeuge“)	7.5.2
CO ₂ -arme LKW auf die Straße bringen (Handlungsfeld "Nutzfahrzeuge")	7.5.2

Maßnahmentitel	Berichtskapitel
Tank-, und Lade- und Oberleitungsinfrastruktur ausbauen (Handlungsfeld „Nutzfahrzeuge“)	7.5.2
Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen, innovative Mobilitätsformen ermöglichen (Handlungsfeld „Digitalisierung“)	7.5.2
Steuerliche Förderung der Elektromobilität (Jahressteuergesetz 2019)	7.5.2
Industrie	
Investitionsprogramm – Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft	5.1.6
Wettbewerbliche Ausschreibungen für Energieeffizienz: Förderprogramm	5.1.6
Ressourceneffizienz und -substitution	5.1.6
Neue Konstruktionstechniken und Werkstoffe für eine emissionsarme Industrie	5.1.6
Beschleunigte Umsetzung von Maßnahmen aus dem Energieaudit und den Energiemanagementsystemen (EMS) und wirksame Fortschreibung des Spitzenausgleichs	5.1.6
EU-Ökodesign-Richtlinie – Ausweitung von Mindeststandards	5.1.6
EU-ETS Innovationsfonds: Weiterentwicklung des NER300-Programms	5.1.6
Nationales Dekarbonisierungsprogramm	5.1.6
Programm CO ₂ -Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien	5.1.6
Landwirtschaft	
Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen und gezielte Verminderung der Lachgasemissionen sowie Verbesserung der Stickstoffeffizienz	8.6.1
Stärkung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und landwirtschaftlichen Reststoffen	8.6.1
Ausbau des Ökolandbaus	8.6.1
Verringerung der Treibhausgasemissionen in der Tierhaltung	8.6.1
Energieeffizienz in der Landwirtschaft	8.6.1

Maßnahmentitel	Berichtskapitel
Sonstige Maßnahmen	
Förderprogramm zur Ausweitung der Deponiebelüftung und Optimierung der Gasfassung	9.5.2
Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft	
Humuserhalt und -aufbau im Ackerland	10.4.2
Erhalt von Dauergrünland	10.4.2
Schutz von Moorböden einschließlich Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten	8.6.1, 10.4.2
Erhalt und nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder und Holzverwendung	10.4.2
Übergreifende Maßnahmen	
Vermeidung von Lebensmittelabfällen	9.5.2

Quelle: Darstellung Öko-Institut

3 Rahmendaten und -annahmen

Die Annahmen zu demographischen und gesamtwirtschaftlichen Rahmendaten (siehe Abschnitt 3.1), der Entwicklung der Primärenergiepreise sowie der Preise für die Treibhausgas-Emissionszertifikate entsprechen denen des Projektionsberichts 2019 (PB 2019) und wurden im Vorfeld der Arbeiten zum PB 2019 ressortabgestimmt. Die Annahmen zur Entwicklung der CO₂-Preise für Verkehr und Wärme sowie Annahmen zur Senkung der EEG-Umlage (siehe Abschnitt 3.4 und 3.5) wurden mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und dem Umweltbundesamt vor der Modellierung des Szenarios Klimaschutzprogramm 2030 abgestimmt.

3.1 Demographische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten

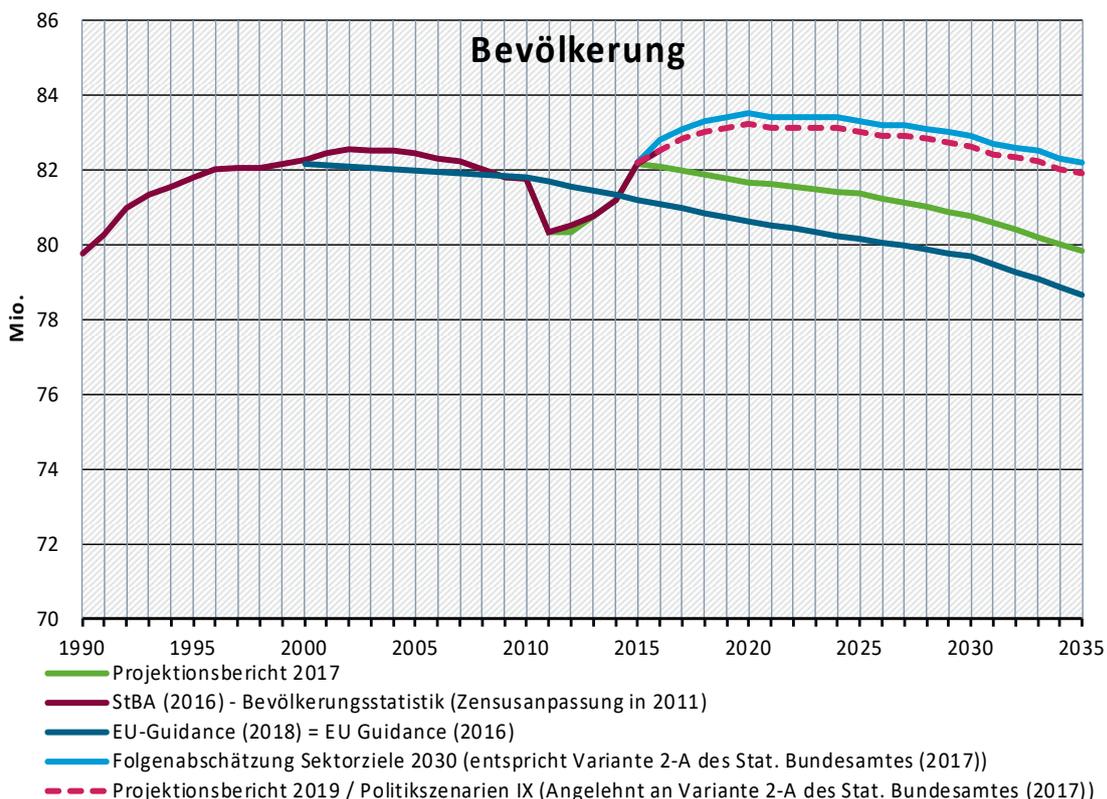
3.1.1 Demographische Entwicklung

Die demographische Entwicklung ist ein wichtiger Treiber für Treibhausgasemissionsprojektionen aus zweierlei Gründen:

- ▶ Zum einen besteht ein direkter Zusammenhang der Bevölkerungsgröße und Treibhausgasemissionen, z.B. durch die Nutzung von Brennstoffen für Transport- und Heizzwecke,
- ▶ zum anderen geht ein gewisser Anteil der Bevölkerung einer Erwerbstätigkeit nach, die in Branchen stattfindet, die Brennstoffe zur Erstellung von Gütern benötigen.

Dadurch spielen die Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung eine wesentliche Rolle in der Emissionsentwicklung. In Abbildung 4 sind aktuelle Bevölkerungsprojektionen vergleichend dargestellt.

Abbildung 4: Aktuelle Bevölkerungsprojektionen im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt (StBA 2016, 2017a), Projektionsbericht (2017), EC (2018)

Nach Veröffentlichung des Bevölkerungszensus 2011 wurden die Bevölkerungszahlen in der Bevölkerungsstatistik des Statistischen Bundesamts (StBA) nach unten korrigiert (in der Summe um ca. 1,5 Millionen Personen). Dies betrifft die Daten für 2010 bis 2016.

Die Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung für den Projektionsbericht 2019 leiten sich aus den aktuellen Angaben und der Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes – stärkere Zuwanderung (StBA 2016, 2017a) ab. Abweichend zu den Vorgaben der EU-Guidelines 2018 der Europäischen Kommission wird den aktuellen Entwicklungen Rechnung getragen und das Wachstum zwischen 2016 und 2020 stärker berücksichtigt. Die Fortschreibung baut auf der Aktualisierung der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung - Basis 2015, Variante 2-A stärkere Zuwanderung²⁵ auf. Die Projektion der Bevölkerung wird ab dem Jahr 2016 mit der Dynamik dieser Vorausberechnung fortgeschrieben.

Für die Folgenabschätzung der Sektorziele 2030 des Klimaschutzplans 2050 wurde die Projektion der aktualisierten Variante 2-A des Statistischen Bundesamtes ab 2015 verwendet. Die Bevölkerungsentwicklung ist für die Entwicklung der Wohnflächen sowie den Endenergieverbrauch der privaten Haushalte von Bedeutung.

Die Annahmen in der EU-Guidance zu den Kerngrößen der Bevölkerungsmodellierung sind von der Europäischen Kommission im Ageing Report (European Commission Economic and Financial Affairs European Economy Institutional Papers 2017) für jedes EU-Land dargelegt. Sie entsprechen in etwa denen der 13. Bevölkerungsvorausberechnung. Für Deutschland wird im Ageing Report eine Geburtenrate angenommen, die kontinuierlich bis auf 1,6 Kinder pro Frau ansteigt, die Lebenserwartung steigt auf 89,1 Jahren für Mädchen bei Geburt in 2060 (85,2 für Jungen) und die Nettozuwanderung liegt bei knapp 230.000 Personen im Jahr 2020. Die Nettozuwanderung bleibt also auf hohem Niveau über 200.000 bis 2030 und sinkt anschließend bis zum Jahr 2060 auf knapp unter 100.000 ab.²⁶

Die für die beiden Szenarien in dieser Studie werden folgende Datenpunkte verwendet:

- ▶ **2016:** 82,5 Mio. Einwohner
- ▶ **2020:** 83,2 Mio. Einwohner
- ▶ **2025:** 83,0 Mio. Einwohner
- ▶ **2030:** 82,6 Mio. Einwohner
- ▶ **2035:** 81,9 Mio. Einwohner

Die Wachstumsraten der oben gezeigten Projektionen sind in untenstehender Tabelle 9 zusammengefasst.

²⁵ Die aktualisierte Variante mit stärkerer Zuwanderung geht von einer höheren Geburtenrate von 1,5 Kindern je Frau aus, der Wanderungssaldo sinkt von 750.000 im Jahr 2016 auf 200.000 im Jahr 2021 und bleibt danach konstant.

²⁶ Annahmen zur Zuwanderung finden sich in StBA 2015.

Tabelle 9: Projizierte Wachstumsraten der Bevölkerung in %

	2015-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035
EU-Guidance (2018)	-0,15 %	-0,12 %	-0,12 %	-0,25 %
Projektionsbericht 2017	-0,12 %	-0,08 %	-0,12 %	-0,21 %
Folgenabschätzung Sektorziele 2030	0,31 %	-0,05 %	-0,10 %	-0,17 %
Projektionsbericht 2019 / Politikszenerien IX	0,31 %	-0,05 %	-0,10 %	-0,17 %

Quellen: Berechnungen des Öko-Instituts auf Basis oben genannter Quellen

3.1.2 Gesamtwirtschaftliche Entwicklung

Das BIP ist ein wichtiger Parameter zur Abschätzung von Treibhausgasemissionen. Wesentlicher Treiber in den zu Grunde liegenden Modellen sind die Wachstumsraten des BIP, d.h. die Veränderung des BIPs über die Zeit.

Folgende Prognosen für das reale BIP für Deutschland waren zum Zeitpunkt der Erstellung des Projektionsberichts 2019 aktuell verfügbar: Die Frühjahrsprojektion der Bundesregierung geht von einem Wachstum von 2,3 % im Jahr 2018, 2,1 % im Jahr 2019 sowie 1,4 % in den Jahren 2020 bis 2022 aus. Im Jahresdurchschnitt von 2018 bis 2020 ergibt sich ein Wachstum um 1,7 % pro Jahr und 1,6 % pro Jahr von 2018 bis 2022. Auch die Deutsche Bundesbank (2018) teilt diesen optimistischen Ausblick: Sie geht von Wachstumsraten von 2,0 % (2018), 1,9 % (2019) und 1,6 % (2020) aus (kalenderbereinigt). Diese Prognosen berücksichtigen die Auswirkungen der Corona-Pandemie auf das Wirtschaftswachstum noch nicht.

Für die Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung wurde eine gesamtwirtschaftliche Entwicklung bis zum Jahr 2030 vorgeschlagen, die der Projektion der Bundesbank (2017) bis zum Jahr 2019 folgt und an die in der EU-Guidance (EC 2016) vorgegebenen Wachstumsraten (zeitlich verschoben) anschließt. Dabei wurde ein deutlich positiveres Wirtschaftswachstum als im Projektionsbericht 2017 angenommen.

Die empfohlenen Wachstumsraten der Europäischen Kommission (EC (2018)) nach Artikel 23 (3) der Commission Implementing Regulation (EU) No 749/2014, die von den Mitgliedstaaten für ihre Treibhausgasprognosen verwendet werden können, liegen für den Zeitraum 2018-2020 bei 1,3 % p.a. und bei 0,9 % p.a. im Zeitraum 2020-2030. Nach 2030 sinken die von der Kommission empfohlenen Wachstumsraten auf 0,8 % p.a.; im Vergleich zu den Empfehlungen der EU Kommission aus dem Jahr 2016 liegen die Wachstumsraten zwischen 2020 und 2025 0,1 % p.a. niedriger, ab 2025 0,1 % höher.

Eine Zusammenschau der verschiedenen Annahmen in 5-Jahresschritten ist aus Tabelle 10 ersichtlich. Für die Szenarien wird für das Jahr 2020 die Wachstumsrate der Bundesregierung übernommen. Ab dem Jahr 2020 bis 2035 wird wie bei der Folgenabschätzung dem Trend der EU-Guidance (2018) (zeitlich verschoben) gefolgt.

Tabelle 10: Durchschnittliche, jährliche Wachstumsraten des Bruttoinlandsproduktes für Deutschland in verschiedenen Projektionen

	2018-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035
Bundesregierung (2018)	1,7 %			
Bundesbank (2018)	1,6 %			
EU-Guidance (2016) = Projektionsbericht 2017	1,3 %	1,0 %	0,8 %	0,7 %
EU-Guidance 2018	1,3 %	0,9 %	0,9 %	0,8 %
Folgenabschätzung Klimaschutzplan 2050	1,7 %	1,3 %	1,0 %	
Projektionsbericht 2019 / Politiksznarien IX	1,7 %	1,3 %	0,9 %	0,9 %

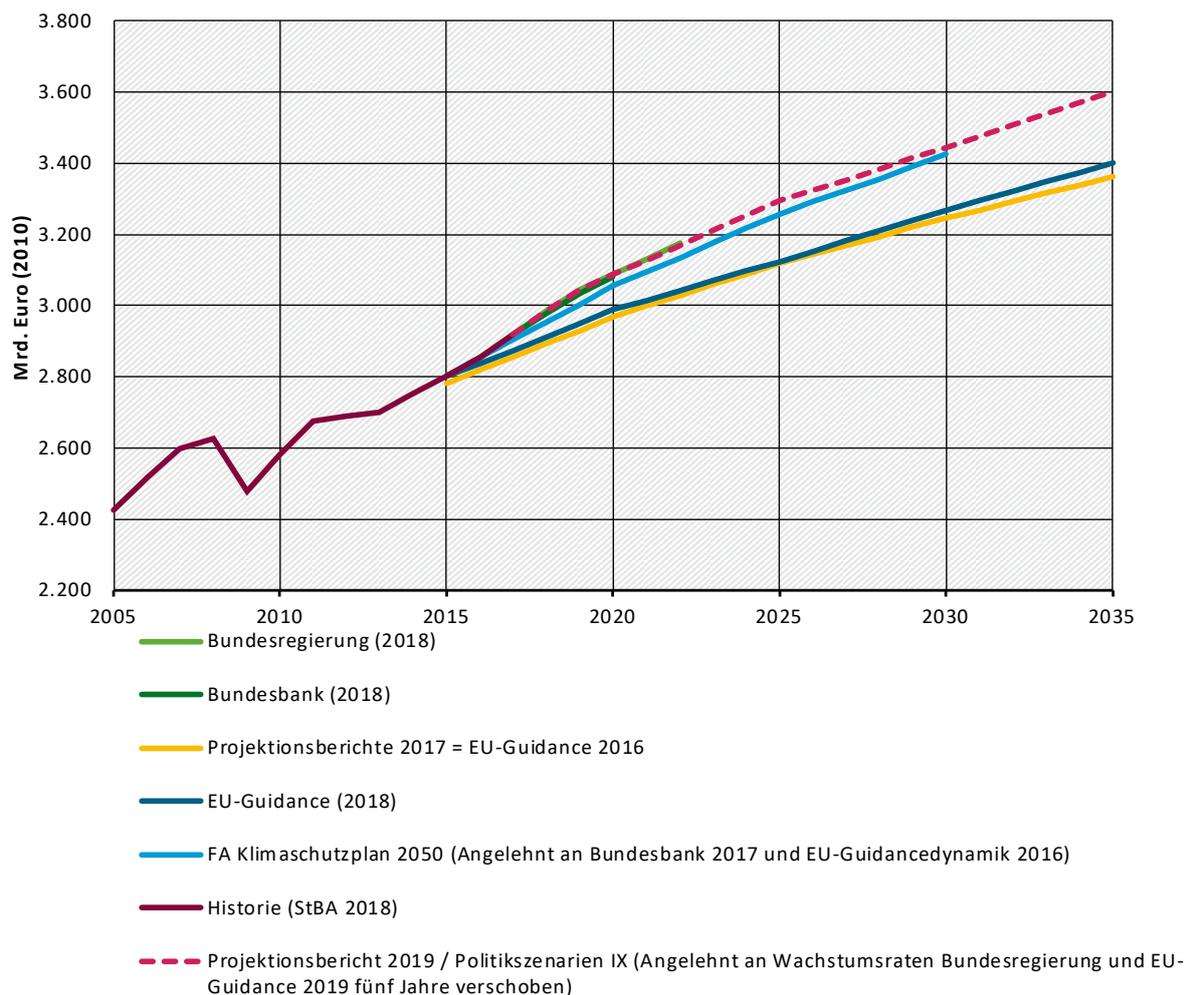
Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der oben angegebenen Quellen

Die Annahmen für das Referenzszenario sowie das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ 2018-2020: 1,7 % Wachstum p.a.
- ▶ 2020-2025: 1,3 % Wachstum p.a.
- ▶ 2025-2030: 0,9 % Wachstum p.a.
- ▶ 2030-2035: 0,9 % Wachstum p.a.

Abbildung 5 stellt die historische Entwicklung (schwarze durchgängige Trajektorie) und aktuelle, sowie vergangene BIP-Projektionen vergleichend dar und hebt die Annahmen für die Szenarien des Projektionsberichts 2019 sowie der Politiksznarien IX gestrichelt hervor.

Abbildung 5: Vergleich verschiedener Projektionen des Bruttoinlandsprodukts



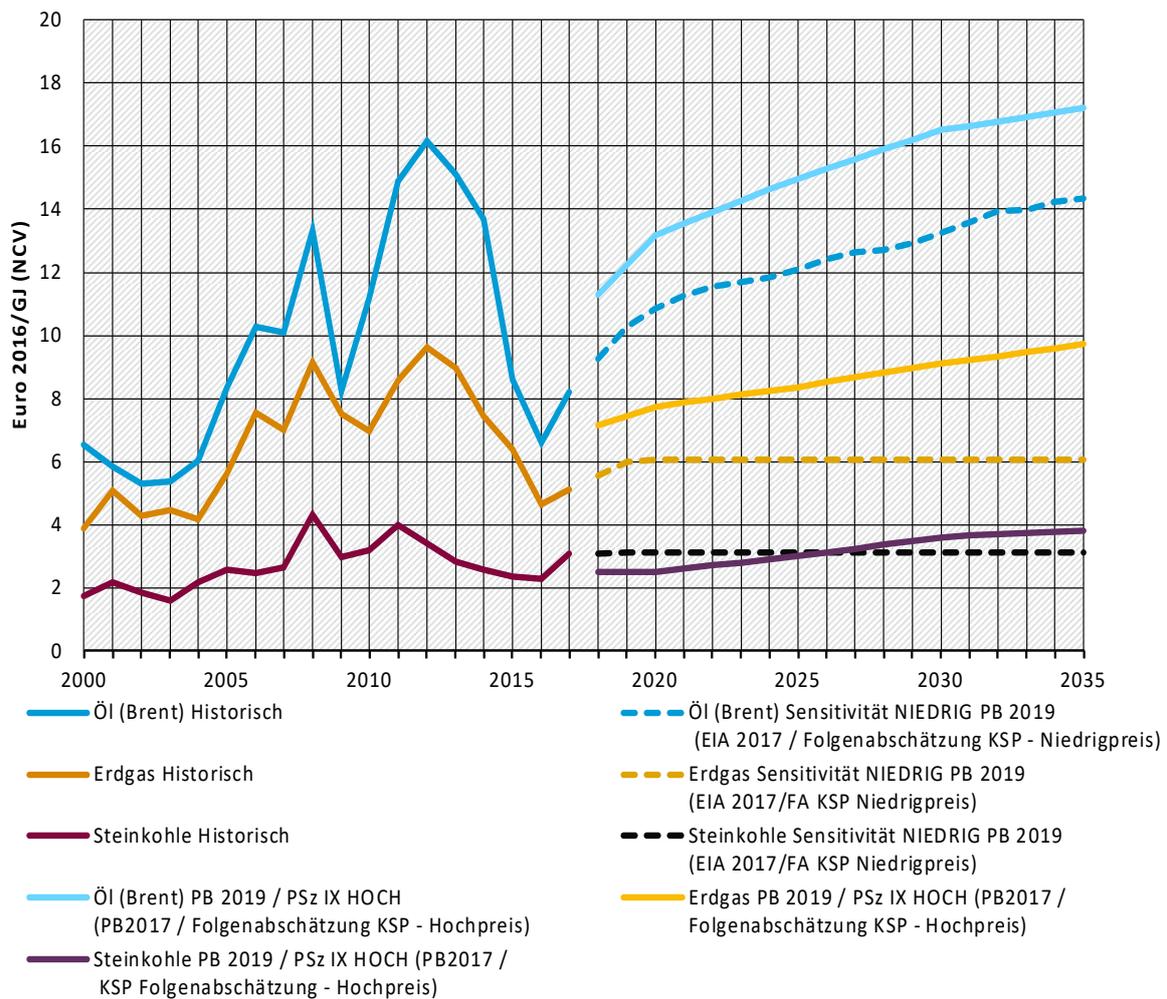
Quelle: Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt (StBA 2018), EC (2016; EC), (EC 2018), Bundesbank (2018), Frühjahrsprognose der Bundesregierung (BMW (2018)).

3.2 Entwicklung der Primärenergiepreise

3.2.1 Preisprojektionen für Rohöl, Steinkohle und Erdgas

Für die Projektionen im Rahmen der EU-Verordnung 525/2013 stellt die EU-Kommission regelmäßig eine Empfehlung für die zu verwendenden Rahmendaten bereit, die auf Ergebnissen des Weltenergiemodells PROMETHEUS beruht (European Commission (EC) 2016). Darin sind Grenzübergangspreise für Steinkohle, Erdgas und Rohöl enthalten. Im Gegensatz zum Projektionsbericht 2017 wird für die Berechnung der Szenarien des Projektionsberichts 2019 sowie der Politikszenerien IX von den Empfehlungen der Kommission abgewichen. Die Empfehlung der europäischen Kommission geht von vergleichsweise hohen Preisen aus, die sich von den aktuellen Prognosen wie dem World Energy Outlook der IEA und dem Annual Energy Outlook der EIA deutlich unterscheiden. Diese Prognosen berücksichtigen die Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die Energiepreise noch nicht. Die verwendeten Energieträgerpreise werden in Abbildung 6 und in Tabelle 11 dargestellt.

Abbildung 6: Energieträgerpreise und Vergleich EU-Guidelines und gewählte Preise



Quelle: Historische Preise: Statistik der Kohlenwirtschaft e. V., EC (2018)

Als Energieträgerpreise werden die Werte aus dem vorhergegangenen Projektionsbericht 2017 genutzt. Diese Preise wurden ebenfalls als Hochpreisszenario für die Folgenabschätzung des Klimaschutzplans 2050 (Öko-Institut et al. 2019) verwendet und im Vorfeld ressortübergreifend abgestimmt. Somit lässt sich ein hohes Maß an Vergleichbarkeit zu anderen aktuellen Berichten sicherstellen. Tabelle 11 zeigt die Preisprojektion und die Werte aus dem Projektionsbericht 2017 (hier in €₂₀₁₆).

Die Preisvariante, die als Sensitivität im Projektionsbericht 2019 gerechnet wird, entspricht dem Niedrigpreisszenario aus der Folgenabschätzung des Klimaschutzplans (Öko-Institut et al. 2019). Es handelt sich hier um die Preise aus dem Annual Energy Outlook 2017 der EIA, bei der die Werte zwischen den Stützjahren interpoliert wurden. Die Erdgaspreise sowie Kohlepreise wurden in diesem Fall ab 2020 auf ungefähr demselben Niveau fortgeschrieben, Steinkohle ist bis 2026 teurer und die relativen Energieträgerpreise verschieben sich im Vergleich zum MMS.

Die folgende Abbildung 7 zeigt am Beispiel verschiedener Ölpreisprojektionen, wie sich die verwendete Projektion im Vergleich zu anderen Projektionen verhält. Es ist zu erkennen, dass die verwendete Projektion ähnlich der EU-Guidelines 2018 (hellblau) verläuft, allerdings wird in Anlehnung an die IEA Projektion ein sanfterer Anstieg bis zum Jahre 2020 angenommen. Die Sensitivität des Projektionsberichts 2019 orientiert (gestrichelt rot = Sensitivität) sich an den EIA-Projektionen und liegt deutlich unter dem Hochpreisszenario. Die Projektionen im Current

Policy Szenario der IEA im World Energy Outlook (grün) unterlegen einen linearen Anstieg bis zum Jahr 2025 mit folgend höheren Wachstumsraten als in den anderen Projektionen.

Tabelle 11: Energiepreis-Projektionen* für Rohöl, Erdgas und Steinkohle, 2017–2035

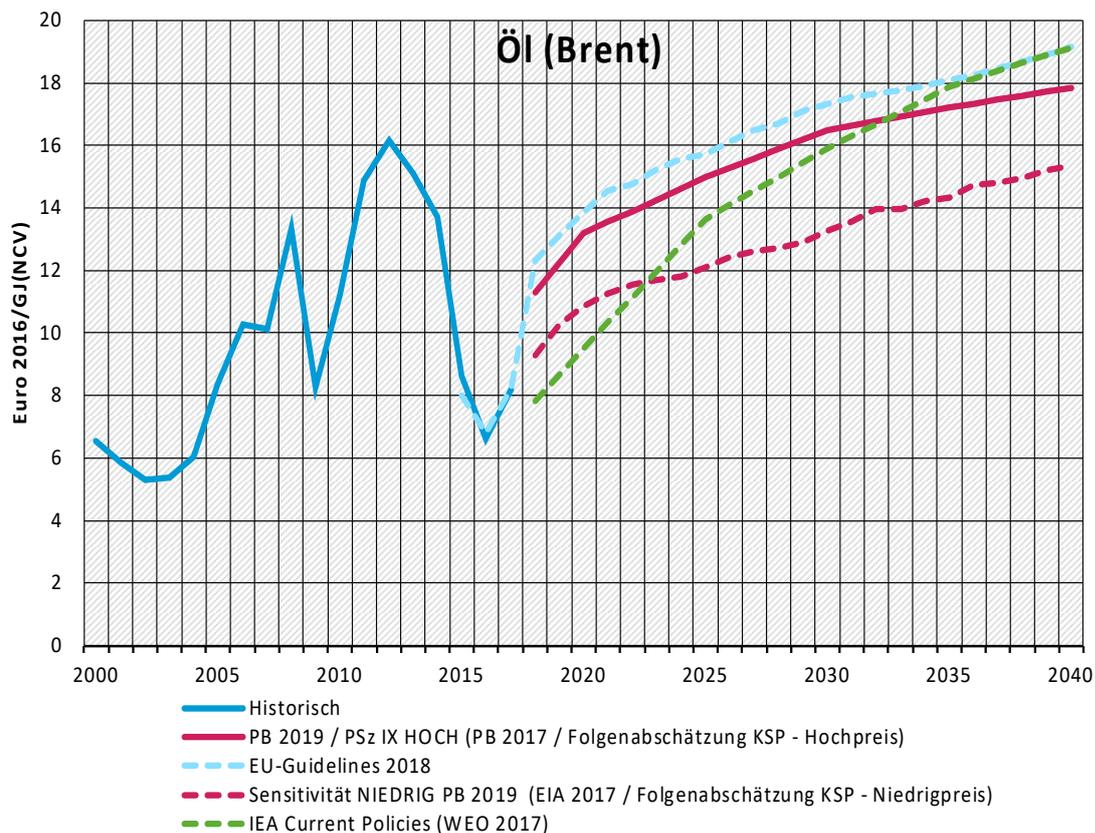
		2017	2020	2025	2030	2035
Projektionsbericht 2017 / Folgenabschätzung Klima- schutzplan HOCH	Rohöl Brent		13,2	15,0	16,5	17,2
	Steinkohle		2,5	3,0	3,6	3,8
	Erdgas		7,7	8,4	9,1	9,7
Projektionsbericht 2019 / Politikszenerien IX	Rohöl Brent	8,2	13,2	15,0	16,5	17,2
	Steinkohle	3,1	2,5	3,0	3,6	3,8
	Erdgas	5,5	7,7	8,4	9,1	9,7
Sensitivitätsrechnung Projek- tionsbericht 2019 (Folgenab- schätzung Klimaschutzplan NIEDRIG)	Rohöl Brent	8,2	10,9	12,1	13,3	14,3
	Steinkohle	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
	Erdgas	5,5	6,1	6,1	6,1	6,1

* Preis für 2017 aus Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. (2018)

** Quellen: Bundesregierung (2017), EC (2018)

Alle Angaben Grenzübergangpreise in €₂₀₁₆/GJ, unterer Heizwert bei Erdgas.

Abbildung 7: Vergleich verschiedener Ölpreisprojektionen



Quelle: Historische Preise: Statistik der Kohlenwirtschaft e. V., Projektionsbericht 2017, EIA (2017), International Energy Agency (IEA) (2017), EC (2018)

3.2.2 Preisprojektion Braunkohle

Für den Projektionsbericht 2019 sowie die Politikszenerarien IX werden als Ausgangspunkt für 2015 Gesamtkosten der Braunkohleförderung in Höhe von 6,4 €₂₀₁₆/MWh_{th} unterstellt. Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit in der Zukunft ist dabei der Anteil von Fixkosten bzw. sehr langfristigen Investitionen im Braunkohletagebau entscheidend.

Für Betrachtungen am aktuellen Rand (z. B. 2015 oder 2020) können die Gesamtkosten folgendermaßen sinnvoll aufgeteilt werden:

- ▶ Kurzfristig variable Kosten: Energiekosten des Tagebaubetriebs und weitere variable Kostenbestandteile; 1,55 €₂₀₁₆/MWh_{th} in Anlehnung an EWI et al. (2014). Diese Kosten fallen proportional zur Braunkohleförderung an.
- ▶ Langfristige Betriebskosten des Tagebaus: Personal, Versicherung, Wartung und Instandhaltung, Umsetzung von Brücken, Bändern und Baggern etc. Diese betragen in Anlehnung an EWI et al. (2014) ebenfalls 1,55 €₂₀₁₆/MWh_{th}. Es wird unterstellt, dass diese Kosten bei sinkendem Bedarf mittelfristig abbaubar sind.
- ▶ Investitionsausgaben: Landerwerb, Entschädigungen, Entwässerungsanlagen und deren Betrieb, Förderbrücken, Schaufelradbagger, Absetzer, Bergschäden, Rekultivierung etc. Der

Restbetrag von 3,3 €₂₀₁₆/MWh_{th} wird diesem Posten zugeschlagen.²⁷ Mit dem Aufschluss eines Tagebaus sind diese Kosten langfristig nicht vermeidbar.

Für den Kraftwerkseinsatz im Dispatch-Modell PowerFlex sind nur die variablen Kosten relevant, sie entsprechen den Grenzkosten der Brennstoffbeschaffung. Die anderen Kostenarten müssen nicht bei der Entscheidung zum Kraftwerkseinsatz, aber bei Kraftwerksneubau und -stilllegung berücksichtigt werden.

Grundsätzlich wird auch für die Zukunft unterstellt, dass die Kosten der Braunkohleförderung inflationsbereinigt konstant bleiben. Für Analysen ab 2025 wird aber eine andere Kostenstruktur angenommen, weil mit einem Vorlauf von etwa 10 Jahren ein deutlich höherer Anteil der Kosten beeinflussbar ist. Das betrifft z. B. Personal, Umsetzung, Wartung und andere Posten, die in der nahen Zukunft als Fixkosten gelten. Ähnliches gilt für die Investitionskosten bei der Erschließung neuer Tagebauflächen, die heute noch nicht versunken sind.

Diese Kostenblöcke werden in den späteren Jahren als variabel angesehen, um im Modell widerzuspiegeln, dass sie mit entsprechendem Vorlauf vermeidbar sind. Es entsteht folgende Aufteilung ab dem Stützjahr 2025:

- ▶ kurzfristig variable Kosten von weiterhin 1,55 €₂₀₁₆/MWh_{th};
- ▶ ein Anteil bereits heute versunkener Kosten für langfristige Investitionen und Verpflichtungen von 0,6 €₂₀₁₆/MWh_{th};
- ▶ als Rest die langfristig variablen Betriebskosten des Tagebaus von 4,2 €₂₀₁₆/MWh_{th}.

Tabelle 12: Kostenannahmen der Braunkohleförderung

	2015	2020	2025	2030	2035
Kurzfristige variable Kosten	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
Nicht vermeidbare Kosten	3,3	3,3	0,6	0,6	0,6
Langfristige Betriebskosten	1,55	1,55	4,2	4,2	4,2
Summe	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4

Quelle: Öko-Institut

3.3 Entwicklung der Preise für Treibhausgas-Emissionszertifikate

Für die Erstellung der Projektionen unter der MMR (Monitoring Mechanism Regulation) stellt die EU-Kommission auch eine Empfehlung für die zu verwendenden CO₂-Preise bereit (EC 2018). Für den Projektionsbericht 2019 wurden die CO₂-Preise der EU-Guideline 2018 verwendet.

Für das Referenzszenario und das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 der Politikszenerien IX wurde der Preis für 2020 auf 25 €/EUA für die Energiewirtschaft angehoben, um dem Ende

²⁷ 6,4 – 1,55 – 1,55 = 3,3

2019 aktuellen Preisniveau Rechnung zu tragen. Der weitere Verlauf bis 2035 entspricht dem des Projektionsberichts.²⁸

Tabelle 13 zeigt die von der EU-Kommission empfohlenen Preise, die als Annahmen für das Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts 2019 übernommen wurden sowie den für das Referenzszenario und das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 angenommenen höheren Preis für das Jahr 2020 in der Energiewirtschaft.

Tabelle 13: Preise für ETS-Zertifikate in €₂₀₁₆/EUA

	2020	2025	2030	2035
Projektionsberichts 2019 (entspricht EU-Guidelines 2018)	15,5	23,3	34,7	43,5
Referenzszenario und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Gesamtabschätzung)	25,0*	23,3	34,7	43,5

*Der Preis im Jahr 2020 wurde nur für die Berechnung der Szenarien in der Energiewirtschaft verwendet.

Quelle: EC (2018), Öko-Institut

3.4 Entwicklung der CO₂-Preise für Wärme und Verkehr

Mit dem Klimaschutzprogramm 2030 wird ab dem Jahr 2021 erstmals eine Bepreisung von CO₂ in den Sektoren Wärme und Verkehr eingeführt. Ziel ist es, einen Anreiz in diesen Sektoren für den Umstieg von emissionsintensiveren auf klimaschonendere Technologien wie beispielsweise den Einsatz von Wärmepumpen und Elektromobilität, mehr Energieeffizienz und die Nutzung erneuerbarer Energieträger zu setzen. In einem nationalen Emissionshandelssystem (nEHS) sollen die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brenn- und Kraftstoffe (insbesondere Heizöl, Flüssiggas, Erdgas, Kohle, Benzin, Diesel) erfasst werden. Dabei umfasst das System im Sektor Wärme die Emissionen der Wärmeerzeugung des Gebäudesektors und die brennstoffbezogenen CO₂-Emissionen aller Energie- und Industrieanlagen außerhalb des EU-Emissionshandelssystems (insb. Anlagen < 20 MW Feuerungswärmeleistung und Abfallverbrennungsanlagen). Im Verkehrsbereich umfasst das System ebenfalls Emissionen aus der Verbrennung fossiler Kraftstoffe, jedoch nicht den Luftverkehr, der dem EU-ETS unterliegt. Das nEHS setzt auf den vorgelagerten Handelsebenen an, bei den Unternehmen, die Brenn- und Kraftstoffe in Verkehr bringen („Upstream-ETS“).

Am 18. Dezember 2019 beschloss der Vermittlungsausschuss zwischen Bundestag und Bundesrat einige Ergänzungen bzw. Änderungen am Klimaschutzprogramm 2030, die unter anderem den CO₂-Preis in der Einführungsphase betreffen. Für die Einführungsphase (2021-2025) werden die Festpreise erhöht. Im Startjahr 2021 beträgt der Zertifikatepreis 25 €/t CO₂ und steigt dann schrittweise nominal auf 55 €/t CO₂ im Jahr 2025 an.

Für das Jahr 2026 ist ein Preiskorridor mit einem Mindestpreis von 55 €/t CO₂ und einem Höchstpreis von 65 €/t CO₂ festgelegt. Im Jahr 2025 soll dann überprüft werden, inwieweit Höchst- und Mindestpreise für die Zeit ab 2027 sinnvoll und erforderlich sind. Am 20. Mai 2020 wurden die Ergänzungen des Vermittlungsausschusses vom Bundeskabinett beschlossen.

²⁸ Die Preise der EU-Empfehlung 2018 wurden seit 2016 nicht mehr angepasst und bilden die Entwicklung wesentlicher Rahmenbedingungen nicht mehr vollumfänglich ab. In Folge der jüngsten Reform des EU-ETS erreichten die Preise für EUA im Jahr 2019 bereits ein durchschnittliches Niveau von 24,56 € und überstiegen damit bereits die Preisannahmen der Empfehlung für 2025. Dem wird zunächst durch die Anhebung des Preises für 2020 Rechnung getragen. Die weitere Preisentwicklung ist mit Unsicherheiten behaftet. Ein wesentlicher Treiber ist insbesondere die Ausgestaltung der Maßnahmen mit Bezug zum EU ETS im Rahmen des European Green Deal (EGD). Aufgrund dieser Unsicherheiten wurde auf eine Anpassung der Stützpreise für 2025 und 2030 verzichtet. Mögliche Auswirkungen der Corona-Krise auf den CO₂-Preis wurden in der Modellierung nicht berücksichtigt.

Ohne eine weitere Änderung des BEHG gilt also für die Zeit ab 2027 die Vorgabe einer freien Preisbildung im Rahmen der Auktionierung der Emissionszertifikate – entsprechend der gängigen Praxis im EU-Emissionshandel. Da derzeit nicht absehbar ist, ob für die Zeit nach 2026 ein Preiskorridor fortgeschrieben wird und wie sich ohne einen solchen Preiskorridor die Preise am Markt entwickeln, wurden für die Modellrechnungen folgende Annahmen hinsichtlich des Preispfades getroffen und mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit abgestimmt: Bis 2025 wird für die Modellrechnung der im Vermittlungsausschuss beschlossene Preispfad verwendet. Im Jahr 2026 wird das obere Ende der Preisspanne angenommen. Ab 2027 wird sich der CO₂-Preis am Markt bilden sofern im Jahr 2025 keine Höchst- bzw. Mindestpreise vereinbart werden. Für die Zeit ab 2027 wird angenommen, dass der Preis jährlich um 15 € (nominal) ansteigt und im Jahr 2035 200 €/t CO₂ beträgt. Die nominal angegebenen Werte werden für die Modellierung aufgrund unbekannter Regelung zum Inflationsausgleich an reale Preise angepasst und sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: CO₂-Preise für Verkehr und Wärme

Jahr	CO ₂ -Preis	
	€/t (nominal)	€ ₂₀₁₆ /t (real)
2021	25	24
2022	30	28
2023	35	33
2024	45	42
2025	55	50
2026	65	59
2027	80	72
2028	95	84
2029	110	97
2030	125	109
2031	140	120
2032	155	132
2033	170	143
2034	185	154
2035	200	165

Quelle: (Vermittlungsausschuss 2019), Öko-Institut

3.5 EEG-Umlagesenkung

Im Klimaschutzprogramm 2030 war im Kontext der Einführung des Brennstoff-Emissionshandelsgesetzes (BEHG) (Bundesregierung 2019a) vorgesehen, dass ein Teil des Aufkommens aus dem BEHG zur Senkung der Stromkosten verwendet werden soll:

„Zeitgleich mit dem Einstieg in die CO₂-Bepreisung werden Bürger und Wirtschaft beim Strompreis entlastet, indem die EEG-Umlage oder einzelne Fördertatbestände sowie ggf. andere staatlich induzierte Preisbestandteile (Netzentgelte, Umlagen und Abgaben) schrittweise aus den Bepreisungseinnahmen bezahlt werden [...]. Ab 2021 wird die EEG-Umlage um 0,25 Cent pro kWh gesenkt. Entlang des CO₂-Bepreisungspfades beträgt die Entlastung 2022 0,5 Cent pro kWh und 2023 0,625 Cent pro kWh.“

Mit der Einigung im Vermittlungsausschuss ist für den Bereich des BEHG weiterhin vorgesehen, neben der Anhebung der Niveaus von Fixpreis- und Preiskorridor auch die damit entstehenden zusätzlichen Einnahmen für die Senkung der EEG-Umlage sowie eine weitere Erhöhung der Entfernungspauschale um 3 ct/km für den Zeitraum 2024 bis 2026 zu verwenden:

„Zusätzliche Einnahmen werden zur Senkung der EEG-Umlage verwendet und zur Anhebung der zusätzlichen Entfernungspauschale für Fernpendler ab den 1.1.2024 von 5 ct. auf 8 ct. pro km ab dem 21. Entfernungskilometer, entsprechendes gilt für die Mobilitätsprämie. Darüber hinaus bleibt die Ausgestaltung der Entfernungspauschale einschließlich der Mobilitätsprämie unverändert.“

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen ergibt sich die folgende Situation für die Entlastung der EEG-Umlage:

- ▶ Für den Zeitraum von 2021 bis 2026 lassen sich die Einnahmen aus dem BEHG und die entsprechend zur Senkung der EEG-Umlage verfügbaren Mittel relativ robust abschätzen (hier zunächst in nominalen Preisen):
 - für 2021 und 2022 ist die Begrenzung des Geltungsbereichs des BEHG auf die großvolumig verwendeten flüssigen und gasförmigen Brennstoffe zu berücksichtigen (Benzin, Diesel, Heizöle, Erdgas und Flüssiggase), so dass das Aufkommen aus dem BEHG in den ersten beiden Jahren bei 7,7 bis 9 Mrd. € jährlich liegt und dann bis 2026 relativ steil auf Jahreswerte von ca. 19 Mrd. € ansteigt (wobei für 2026 mit Blick auf die Vermeidungskostensituation in den vom BEHG regulierten Bereichen vom oberen Bandbreitenwert des Preiskorridors von nunmehr 55 bis 65 €/t CO₂ ausgegangen wurde);
 - für die erhöhte Pendler- und die Mobilitätszuschale müssen in den Jahren 2024 bis 2026 ca. 400 Mio. € jährlich aufgebracht werden;
 - weiterhin ist vorgesehen, dass aus den BEHG-Erlösen auch weitere Entlastungen für Härtefälle und Carbon-Leakage-Ausgleichszahlungen finanziert werden; der für diese Beihilfeleistungen erforderliche Finanzierungsumfang ergibt sich jedoch erst aus entsprechenden Rechtsverordnungen der Bundesregierung, die noch nicht vorliegen. Für die Modellrechnung wurde die Annahme getroffen, dass dieses zusätzliche Finanzierungsvolumen, das nicht für die Entlastung der EEG-Umlage zur Verfügung steht, für die Jahre 2021 bis 2026 von ca. 390 auf 960 Mio. € jährlich ansteigt;

- aus einer leichten Glättung der Zusatzeinnahme folgt für die EEG-Umlage ein Senkung von 1,6 ct/kWh in 2021 sowie 1,7 ct/kWh in 2022, in den Jahren 2023 steigt dieser Wert auf 2,0 bzw. 2,5 ct/kWh und erreicht in den Jahren 2025 und 2026 ein Niveau von 3,0 ct/kWh, wobei hier eine Stromabgabe an Letztverbraucher für die in der Abgrenzung des EEG unterschiedlich privilegierten Verbrauchergruppen entsprechend der aktuellen Mittelfristprognosen der Übertragungsnetzbetreiber unterstellt wurde.
- Für den Zeitraum von 2027 bis 2035 lassen sich die Einnahmen aus dem BEHG zwar insgesamt abschätzen, es liegen jedoch (noch) keine Festlegungen zum für die EEG-Umlage- (oder andere Stromkosten-) Senkungen verfügbaren BEHG-Aufkommensanteil vor:
- würde der Anteil des BEHG-Aufkommens für die EEG-Umlagesenkung konstant gehalten, würde das EEG-Entlastungspotenzial bis 2030 auf 6,3 ct/kWh und auch nach 2030 nochmals (leicht ansteigen) ansteigen, so dass die aus heutiger Sicht erwartbare EEG-Umlage übersteigen dürfte;
 - vor dem Hintergrund der fehlenden Regelungen zur Aufkommensverwendung des BEHG wurde das Niveau der EEG-Entlastung ab 2027 bei 3,0 ct/kWh (nominal) festgeschrieben.

Umgerechnet auf die Preisbasis von 2016 werden folgende Realwerte in Ansatz gebracht:

- in den Jahren 2021 und 2022 wird die EEG-Umlage um 1,52 und 1,6 ct/kWh reduziert;
- in den Jahren 2023 bis 2026 wird sie um 1,86, 2,31, 2,74 bzw. 2,71 ct/kWh abgesenkt;
- in den Jahren 2027 bis 2030 sinkt sie um 2,69, 2,66, 2,63 bzw. 2,61 ct/kWh;
- in den Jahren 2031 bis 2035 wird sie um 2,58, 2,55, 2,53, 2,50 bzw. 2,48 ct/kWh.

3.6 Entwicklung der Endverbraucherpreise für Strom

Die Entwicklung der mittleren Strom-Endverbraucherpreise im Referenzszenario ist in Tabelle 15 dargestellt. Sie beinhalten Annahmen zur Entwicklung von Großhandelspreisen, Steuern und Umlagen. Der leichte kontinuierliche Anstieg bis 2025 ist auf steigende Netzentgelte und Großhandelspreise zurückzuführen. Das Absinken nach 2025 liegt vorwiegend an der prognostizierten fallenden EEG-Umlage.

Tabelle 15: Annahmen zur Entwicklung der mittleren Endverbraucher-Strompreise je Sektor im Referenzszenario (REF) [Eurocent₂₀₁₆/kWh]

Sektor	2015	2020	2025	2030	2035
Haushalte (inkl. MWSt)	29	34	34	33	31
GHD (ohne MWSt)	21	23	24	22	21
Industrie (ohne MWSt)	11	14	15	14	14

Quellen: Eigene Berechnungen basierend auf (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2018), (BDEW 2016; BMWi 2016; Öko-Institut 2015; Bundesnetzagentur 2015)

Die Entwicklung der mittleren Strom-Endverbraucherpreise im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 ist in Tabelle 16 dargestellt. Die im Vergleich zum Referenzszenario etwas niedrigeren Preise, sind durch die im vorigen Kapitel beschriebene Senkung der EEG-Umlage begründet.

Tabelle 16: Annahmen zur Entwicklung der mittleren Endverbraucher-Strompreise je Sektor im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) [Eurocent₂₀₁₆/kWh]

Sektor	2015	2020	2025	2030	2035
Haushalte (inkl. MWSt)	29	34	31	30	29
GHD (ohne MWSt)	21	23	21	20	19
Industrie (ohne MWSt)	11	14	13	13	13

Quellen: Eigene Berechnungen basierend auf (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2018), (BDEW 2016; BMWi 2016; Öko-Institut 2015; Bundesnetzagentur 2015)

4 Projektionen Sektor Energiewirtschaft

4.1 Stromerzeugung und gekoppelte Wärmeerzeugung

4.1.1 Methodik

Die Modellierung der zu erwartenden Entwicklung des Kraftwerksparks wird mit Hilfe des Strommarktmodells PowerFlex des Öko-Instituts vorgenommen. Dabei wird zum einen der Kraftwerkseinsatz berechnet, zum anderen kommt ein integriertes Stilllegungskalkül zum Einsatz, das die Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke überprüft. Ausgangsjahr der Modellierung ist das Jahr 2016.

4.1.1.1 PowerFlex

Das am Öko-Institut entwickelte Strommarktmodell PowerFlex²⁹ ist ein Fundamentalmodell, welches thermische Kraftwerke, die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerke und flexible Stromverbraucher kostenminimal einsetzt, um die Strom- und Fernwärmefachfrage zu decken.

Der Fokus des Modells liegt auf Deutschland, es werden jedoch mit Ausnahme von Island und Zypern alle 35 EntsoE-Mitgliedsländer berücksichtigt. Der Detaillierungsgrad ist für Deutschland hoch, die anderen Länder werden aggregiert abgebildet. Jedes Land stellt dabei einen Knoten dar, der über Kuppelleitungen mit seinen Nachbarländern verbunden ist. Innerhalb eines Knotens wird ein einheitliches Marktgebiet ohne Netzengpässe unterstellt. Die Austauschkapazitäten zwischen den Ländern (Net Transfer Capacities, NTC) in beide Richtungen werden vorgegeben.

Die einzelnen Kraftwerke werden im Modell detailliert mit Hilfe technischer und ökonomischer Parameter abgebildet. Thermische Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung größer 100 MW werden blockscharf und mit einem individuellen Wirkungsgrad erfasst. Kleinere thermische Stromerzeugungsanlagen werden in technologie- und baujahrspezifischen Gruppen zusammengefasst und mit Hilfe von typspezifischen Parametern charakterisiert.

Biomassekraftwerke, welche Biogas, Holz oder Pflanzenöl einsetzen, werden über Technologieaggregate als Teil des thermischen Kraftwerksparks im Modell abgebildet. Das Stromangebot aus fluktuierenden Erzeugern (Laufwasser, Wind, Photovoltaik) wird in stündlicher Auflösung vorgegeben. Die tatsächlich eingespeiste Menge wird modellendogen bestimmt, sodass das zur Verfügung stehende fluktuierende Stromangebot auch als Überschuss identifiziert werden kann.

Das Erzeugungsprofil für Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung setzt sich aus einem typischen Fernwärmeprofil und einer angenommenen Gleichverteilung für industrielle KWK-Anlagen zusammen.³⁰

Die jährliche Stromnachfrage wird exogen vorgegeben und ergibt sich aus den Stromnachfragen der anderen Sektoren (Abschnitt 4.1.1.4). Die Stromnachfrage teilt sich im Modell in einen unflexiblen Anteil mit vorgegebenem stündlichen Lastprofil sowie einen flexiblen Anteil, der aus der Stromnachfrage von Verbrauchern wie der (zusätzlich zum Schienenverkehr wachsenden) Elektromobilität, aus Pumpspeicherkraftwerken oder Wärmepumpen resultiert. Für diese Verbraucher existieren im Modell zusätzliche Nebenbedingungen, die beispielsweise die Anforderungen aus den Fahrprofilen oder die Kapazität der Speicher abbilden. Unter Berücksichtigung

²⁹ Eine detaillierte Modellbeschreibung ist z.B. in UBA 2017 enthalten.

³⁰ Zur modelltechnischen Implementierung der gekoppelten und ungekoppelten Fernwärmefachzeugung siehe auch Abschnitt 4.2.1.

dieser Nebenbedingungen wird die zeitliche Struktur dieser Nachfrage modellendogen im Zuge der Optimierung berechnet. Darüber hinaus wird modellendogen Stromexport und -import als Austausch mit den Nachbarstaaten bestimmt. Jedes Land stellt dabei einen Knoten dar, der über Kuppelleitungen mit seinen Nachbarländern verbunden ist. Innerhalb eines Knotens wird ein einheitliches Marktgebiet ohne Netzengpässe unterstellt. Die Austauschkapazitäten zwischen den Ländern (Net Transfer Capacities, NTC) sind differenziert nach Richtung für jedes Modelljahr hinterlegt.

Auf Basis einer vollständigen Voraussicht wird dann im Rahmen einer linearen Optimierung der kostenminimale Einsatz von thermischen Kraftwerken, Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerken und Import/Export unter Berücksichtigung technischer und energiewirtschaftlicher Nebenbedingungen bestimmt.

4.1.1.2 Stilllegungen in PowerFlex

Das in PowerFlex integrierte Stilllegungskalkül³¹ überprüft, ob die Deckungsbeiträge ausreichen, um die fixen Betriebskosten eines Kraftwerks zu decken. Ist dies nicht der Fall, geht das Kraftwerk in Kaltreserve und wird langfristig stillgelegt. Da sich durch Kraftwerksstilllegungen in großem Umfang der Strompreis ändern würde, was wiederum die Erlöse der verbleibenden Kraftwerke und damit das Ergebnis des Stilllegungskalküls beeinflussen würde, wird bei der Kraftwerksstilllegung iterativ vorgegangen. Die Kraftwerke mit den größten Verlusten werden zuerst stillgelegt, in jeder Iteration kommen wenige weitere Kraftwerke hinzu, bis die verbleibenden Kraftwerke ihre fixen Betriebskosten aus den Deckungsbeiträgen finanzieren können.

4.1.1.3 KWK und Fernwärme

Strom und Fernwärme werden sowohl von öffentlichen Anlagen als auch teilweise von Kraftwerken erzeugt, welche dem Industriesektor zuzurechnen sind. Diese Anlagen können sich bei der Strom- und Wärmeerzeugung zumindest teilweise substituieren. Abbildung 8 zeigt für die Wärmeerzeugung die Überschneidungsbereiche der einzelnen Erzeugungsbereiche. Da es für die Modellierung nicht sinnvoll ist, diese voneinander zu trennen, wird der gesamte Bereich der Kraftwerke gemeinsam modelliert. Die THG-Emissionen und sonstigen Effekte werden dann im weiteren Verlauf dieses Berichts auf die einzelnen Inventarquellgruppen³² aufgeteilt (siehe hierzu auch Kapitel 5.2.1).

³¹ Das in PowerFlex integrierte Stilllegungskalkül basiert auf dem Kraftwerksinvestitionsmodell ELIAS (Electricity Investment Analysis). Für eine genauere Darstellung des Stilllegungsmechanismus siehe die dazugehörige Dissertationsschrift (Harthan 2015).

³² Öffentliche Kraftwerke, Industriekraftwerke, Raffineriekraftwerke und Kraftwerke des übrigen Umwandlungsbereichs.

Abbildung 8: Begriffsklärung KWK-Wärme und Fernwärme



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

Die Gesamtheit der Kraftwerke beinhaltet demnach nicht nur die Anlagen der öffentlichen Versorgung, sondern auch die industriellen Kraftwerke (insbesondere KWK-Anlagen).

4.1.1.4 Stromnachfrage

Der Endenergieverbrauch an Strom wird von den Sektormodellen für Industrie, GHD, Gebäude und Verkehr unter Berücksichtigung der jeweiligen Szenariodaten berechnet und dem Integrationsmodell ENUSEM übergeben. Darauf aufbauend berechnet ENUSEM den Stromverbrauch der Energiewirtschaft (Raffinerien, Kokereien, Kohleförderung etc.) sowie die Netzverluste. Das Strommarktmodell PowerFlex berechnet neben der Nettostromerzeugung den Kraftwerkseigenverbrauch und Pumpstromverbrauch. Ebenso berechnet PowerFlex über eine Kopplung zum Verkehrsmodell TEMPS den Stromverbrauch von Elektrofahrzeugen mit flexiblen Ladeanforderungen. Die Aggregation aller Teilergebnisse erfolgt schließlich wieder im Integrationsmodell ENUSEM.

4.1.2 Allgemeine Annahmen und Parameter für die Modellierung

Die technische Lebensdauer legt die zunächst vorgesehene Betriebsdauer der Kraftwerke fest. Im Fall von fossilen Kondensationskraftwerken (Erdgas, Steinkohle, Braunkohle), bei denen eine überwiegend strommarktorientierte Betriebsweise angenommen wird, wird das ökonomische Stilllegungskalkül angewendet (s.o.), das bei unwirtschaftlichem Betrieb eine zeitweise Stilllegung (Kaltreserve) vorsieht (vor dem Ende der technischen Lebensdauer) bzw. Retrofit bei wirtschaftlichem Betrieb erlaubt, angewendet, sodass Kraftwerke über die vorgegebene technische Lebensdauer hinaus betrieben werden können. KWK-Anlagen werden nach technischer Lebensdauer stillgelegt³³. Tabelle 17 zeigt die angesetzten technischen Lebensdauern.

³³ Da KWK-Anlagen neben einem teilweisen strommarktorientierten Betrieb insbesondere Wärme für Wärmesenken bereitstellen, wird davon ausgegangen, dass eine vorzeitige zeitweise Stilllegung (Kaltreserve) hier nicht relevant ist. Aus diesem Grund wird für KWK-Anlagen nicht das dynamische Kalkül angewendet, sondern sie werden nach technischer Lebensdauer stillgelegt. Zum Zeitpunkt der Modellierungsarbeiten (2019-2020) wird noch eine Reihe von Kohle-KWK-Anlagen betrieben, die bereits vor über 60 Jahren errichtet wurden. Vor diesem Hintergrund wird in den Szenarien eine vergleichsweise lange Lebensdauer für Braunkohle-

Tabelle 17: Technische Lebensdauern der Bestandskraftwerke³⁴

Kraftwerkstyp	Lebensdauer der Kraftwerke in Jahren
Steinkohle	65 (Option auf Verlängerung oder frühere Stilllegung)
Steinkohle (KWK)	65
Braunkohle	65 (Option auf Verlängerung oder frühere Stilllegung)
Braunkohle (KWK)	65
Erdgas	65 (Option auf Verlängerung oder frühere Stilllegung)
Erdgas (KWK)	30 (Gasturbinen, BHKWs), 40 (Dampfkraftwerke, GuD-Anlagen)
Kernenergie	nach AtG 2011
Öl, Müll	für gesamten Modellierungszeitraum
Erneuerbare	25 (feste Biomasse, Solar, Geothermie, Windenergie an Land), 20 (Biogas, Pflanzenöl, Deponiegas, Klärgas, Windenergie auf See), 100 (Wasser)

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Ausgangspunkt für die Entwicklung des Kraftwerksparks ist das Basisjahr 2016. Als Datengrundlage hierfür dienten hauptsächlich Kraftwerkslisten der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur (BNetzA) 2018).³⁵ Stilllegungsanzeigen der Bundesnetzagentur wurden berücksichtigt. In Einzelfällen wurden Kraftwerken längere oder kürzere Lebensdauern zugeordnet, wenn entsprechende Informationen vorlagen.

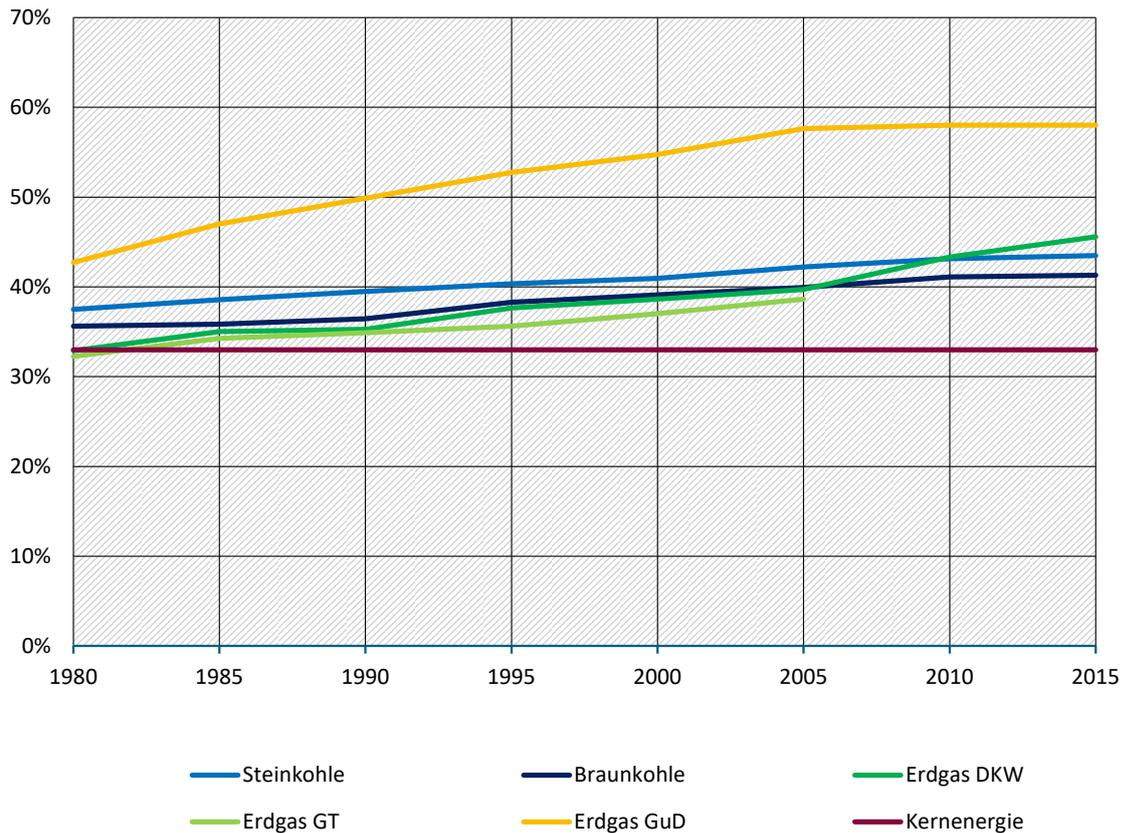
Die Wirkungsgrade der Bestandskraftwerke sind in Abbildung 9 dargestellt. Dabei bilden die verwendeten Wirkungsgrade einen durchschnittlichen Anlagenbetrieb über ein Jahr ab und berücksichtigen somit zusätzlichen Brennstoffverbrauch im Teillastbetrieb und für An- und Abfahrvorgänge. In der Literatur wird oft ein Wirkungsgrad unter optimalen Bedingungen angegeben (z.B. der Abnahmewirkungsgrad). In der Jahresperspektive entspricht der hier angesetzte Wirkungsgrad dem Nutzungsgrad.

und Steinkohle-KWK-Anlagen von 65 Jahren gewählt, damit es nicht im Stützjahr 2020 zu einer Stilllegung älterer Braunkohle- und Steinkohle-KWK-Anlagen kommt, wenn die Betreiber die Stilllegung nicht planen.

³⁴ Die technischen Lebensdauern bestehender Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke werden vergleichsweise hoch angesetzt. Dies kann damit begründet werden, dass im Zuge der Einführung der Großfeuerungsanlagenverordnung (13. BImSchV) in den 1980er und 1990er Jahren viele Kraftwerke Nachrüstungsmaßnahmen unterzogen wurden und somit von einer grundsätzlichen Verlängerung der Lebensdauer ausgegangen wird. Bei den Kondensationskraftwerken erfolgt die tatsächliche Stilllegung jedoch aus ökonomischen Erwägungen (s.o.), sodass die Kraftwerke vor Erreichen der Lebensdauer in Kaltreserve gehen können oder bei wirtschaftlichem Betrieb Retrofit durchführen können und somit über die technische Lebensdauer hinaus weiterbetrieben werden können.

³⁵ Die Annahmen wurden im Einzelfall durch zusätzliche Angaben aus Wikipedia und Pressemitteilungen im Internet ergänzt. Vom DIW wurden Angaben zu Kraftwerkstechnologien übernommen (DIW 2014). Für kleine KWK-Anlagen wurden die installierten Leistungen durch eigene Auswertungen auf Basis der BHKW-Datenbank des Öko-Instituts ermittelt.

Abbildung 9: Nutzungsgrade von Bestandskraftwerken (Kondensations-Kraftwerke und Kondensations-Scheiben der KWK-Anlagen) nach Inbetriebnahmejahr



Quelle: Annahmen und Berechnungen des Öko-Instituts

KWK-Anlagen werden mit dem KWK-Modul im PowerFlex-Modell abgebildet:

- ▶ Das KWK-Kraftwerk wird in eine KWK-Scheibe und eine Kondensations-Scheibe aufgeteilt. Der elektrische Wirkungsgrad der KWK-Scheibe (Wirkungsgrad bei Wärmeauskopplung) ist dabei niedriger als der elektrische Wirkungsgrad der Kondensations-Scheibe (Wirkungsgrad ohne Wärmeauskopplung), um den Stromverlust durch Wärmeauskopplung zu berücksichtigen.
- ▶ In der Modellierung werden die in Tabelle 18 aufgeführten Parameter für die KWK-Scheiben der Kraftwerke verwendet. Für die Bestandsanlagen wurden die elektrischen Wirkungsgrade der KWK-Scheiben aus der amtlichen Statistik für das Basisjahr 2016 abgeleitet.

Tabelle 18: Parameter der KWK-Scheiben

	Elektrischer Wirkungsgrad der KWK-Scheibe	Gesamtnutzungsgrad der KWK-Scheibe
Steinkohle	21 %	80 %
Braunkohle	18 %	79 %
Erdgas - Dampfturbine	18 %	76 %
Erdgas - Gasturbine	27 %	76 %
Erdgas - GuD	34 %	76 %
Erdgas - BHKW	33 %	85 %
Biogas	38 %	79 %
Feste Biomasse	18 %	77 %

Quelle: Eigene Annahmen, basierend auf Statistisches Bundesamt (Destatis) 2016a und Statistisches Bundesamt (Destatis) 2016b

Die in Tabelle 18 angegebenen Wirkungsgrade für KWK-Anlagen beziehen sich auf den elektrischen Wirkungsgrad der KWK-Scheibe bei voller Wärmeauskopplung. Da bei Entnahme-Kondensations-Kraftwerken unterschiedliche Betriebszustände (mit unterschiedlicher Wärmeauskopplung) möglich sind, unterscheidet sich der zum jeweiligen Zeitpunkt im Modell relevante elektrische Wirkungsgrad der Gesamtanlage (Kondensations- und KWK-Scheibe) von den hier angegebenen Werten.

Wie in Abschnitt 4.1.1.2 beschrieben, wird über die Stilllegung von Kondensations-Kraftwerken modellendogen entschieden. Der Neubau von Kraftwerken im Szenarienhorizont wird der Modellierung dagegen vorgegeben. Dies sind zum einen Kraftwerke, die sich unabhängig von zusätzlichen Politiken und Maßnahmen bereits heute in einem fortgeschrittenen Planungs- oder Baustadium befinden.³⁶ Zum anderen sind dies Kraftwerke, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass diese durch Politikmaßnahmen unterstützt in den kommenden Jahren errichtet (z.B. nach dem KWKG oder dem EEG) werden.

4.1.3 Annahmen und Parameter Referenzszenario

Für die Beschreibung der Instrumente sowie der verwendeten Annahmen und Parameter im Referenzszenario sei auf das MMS des Projektionsberichts 2019 verwiesen (Bundesregierung 2019d). Es wurden im Referenzszenario (REF) des vorliegenden Berichts nur an wenigen Stellen Änderungen vorgenommen, die im Folgenden beschrieben werden.

- ▶ Geringfügige Anpassung der für die Modellierung verwendeten Kraftwerkliste auf Basis der BNetzA-Kraftwerkliste.
- ▶ Erneuerbare Energien: der Zubaupfad wurde auf Basis neuer verfügbarer Statistiken aktualisiert (Tabelle 19).

³⁶ Für das Steinkohle-Kraftwerk Datteln wird eine Fertigstellung bis zum Jahr 2021 unterstellt.

- ▶ CO₂-Preis: der für 2020 angesetzte CO₂-Preis im ETS wurde von 15,5 auf 25,0 €/EUA angehoben, um der Entwicklung von 2018 bis Anfang 2020 im EU-ETS zu folgen und den entsprechenden Effekt auf den Kraftwerkseinsatz abzubilden (Tabelle 13).
- ▶ Stromerzeugung: Aktualisierungen in anderen Sektoren, sofern sie die Stromnachfrage betreffen, führen zu Änderungen bei der Stromerzeugung

Insgesamt sind die vorgenommenen Änderungen jedoch als nur geringfügig einzustufen.

Tabelle 19: Installierte Leistung erneuerbarer Energien im Referenzszenario (REF), 2016-2035

Technologie	2016	2020	2025	2030	2035
	GW				
Wasserkraft ³⁷	5,6	5,6	5,7	5,7	5,7
Windenergie an Land	45,3	55,6	54,5	59,8	60,9
Windenergie auf See	4,2	8,4	11,7	15,0	17,4
Photovoltaik	40,7	49,5	62,0	73,4	76,5
Biomasse ³⁸	1,8	1,9	2,0	1,7	1,7
Biogas ³⁹	5,9	6,8	6,9	6,7	6,7
Geothermie	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
Summe	103,5	78,4	142,9	162,5	169,1

Quelle: (BMWi 2019), BWE 17.01.2018, Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

4.1.4 Ergebnisse Referenzszenario

Abbildung 10 sowie Tabelle 20 stellen die Entwicklung des Bruttostromverbrauchs als Summe der Endverbraucher sowie der Energiewirtschaft⁴⁰ im Referenzszenario dar. In den Bereichen⁴¹ Industrie sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) kommt es zu einem merklichen Rückgang der Stromnachfrage durch Effizienzmaßnahmen (Abschnitte 5.1 und 6.4), während der Rückgang bei den Haushalten vergleichsweise gering ausfällt. Eine spürbare Zunahme des Bruttostromverbrauchs verzeichnet der Straßenverkehr⁴² aufgrund des Ausbaus der Elektromobilität. Der Stromverbrauch im Schienenverkehr nimmt leicht ab, da die autonome Effizienzsteigerung größer ist als die Zunahme der Verkehrsleistung. In Summe sinkt der Endenergieverbrauch an Strom bis 2030 um 5 % gegenüber 2016 bzw. um 6 % im Vergleich zu 2008.

³⁷ Lauf- und Speicherwasserkraftwerke sowie Pumpspeicherkraftwerke mit natürlichem Zufluss.

³⁸ Feste und flüssige Biomasse.

³⁹ Biogas, Biomethan, Klärgas, Deponiegas.

⁴⁰ Der Begriff „Energiewirtschaft“ umfasst hier auch die Kraftwerkeigenverbräuche von Industriekraftwerken. Er stellt also hier das dar, was in der Energiebilanz als „Umwandlungssektor“ bezeichnet wird.

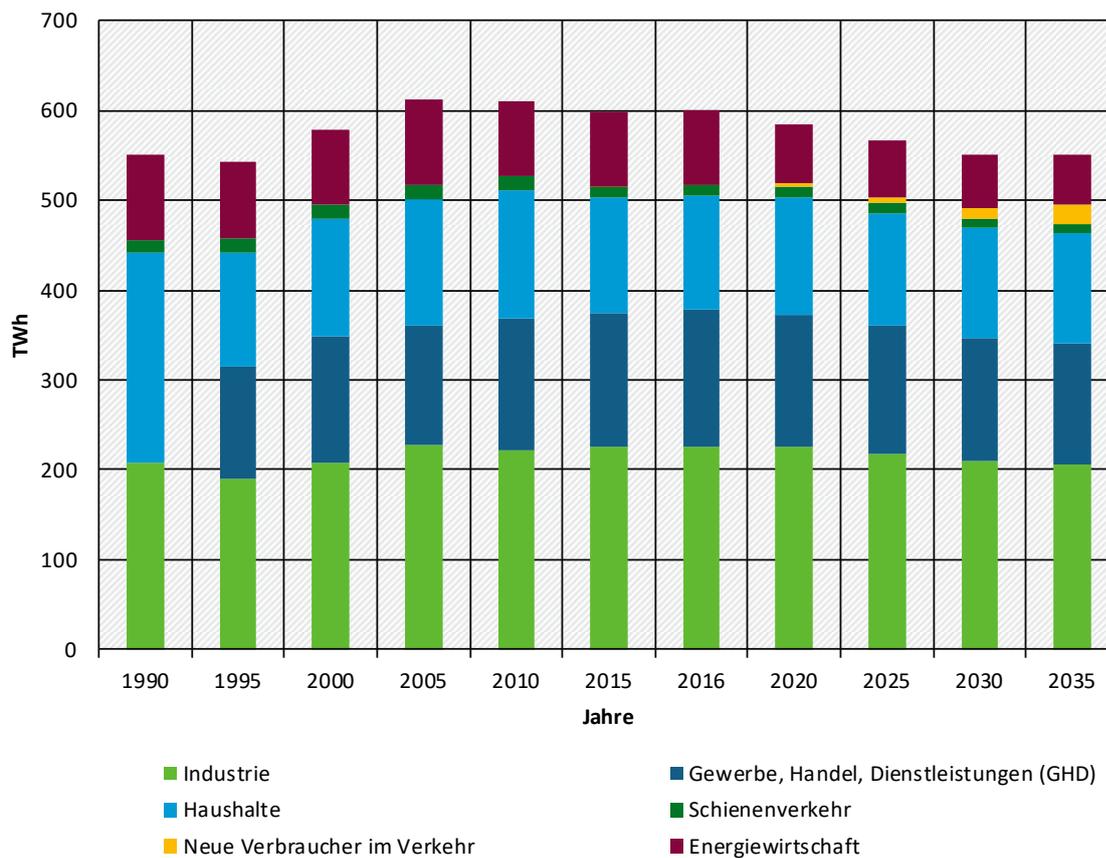
⁴¹ Die in der Tabelle dargestellten Sektoren folgende aus methodischen Gründen der Strukturierung der Energiebilanz und entsprechen somit nicht dem Sektorzuschnitt des Klimaschutzplans.

⁴² Der Posten „Neue Verbraucher im Verkehr“ enthält den Stromverbrauch des Straßenverkehrs sowie eine geringfügige Stromnachfrage der Binnenschifffahrt. Zwar ist die Stromnachfrage der Binnenschifffahrt lediglich im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 relevant, aus Konsistenzgründen wurde die Bezeichnung jedoch vereinheitlicht.

Darüber hinaus sinken die Stromverbräuche von Raffinerien und der sonstigen Energiewirtschaft aufgrund geringerer Brenn- und Kraftstoffproduktion durch den Rückgang der Nachfrage nach fossilen Energieträgern. Da bereits im Referenzszenario die Stromerzeugung aus thermischen Kraftwerken deutlich zurückgeht, sinkt auch der Kraftwerkseigenverbrauch von Strom (z.B. Stromverbrauch von Pumpen in fossilen Kraftwerken) deutlich. In Summe sinkt der Stromverbrauch der Energiewirtschaft bis 2030 um 29 % im Vergleich zu 2016 bzw. um 36 % gegenüber 2008.

Als Summe aus dem Stromverbrauch der Endverbraucher und der Energiewirtschaft⁴³ ergibt sich der Bruttostromverbrauch. Dieser sinkt bis 2030 um 8 % gegenüber 2016 bzw. 11 % im Vergleich zu 2008.

Abbildung 10: Bruttostromverbrauch im Referenzszenario (REF), 1990-2035



Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

⁴³ Sowie bereinigt um statistische Differenzen.

Tabelle 20: Bruttostromverbrauch im Referenzszenario (REF), 1990-2035

Sektor	2008	2016	2020	2025	2030	2035
	TWh					
Industrie	232,6	226,6	225,3	218,0	209,7	205,5
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)	135,7	151,0	147,1	142,0	137,4	136,0
Haushalte	139,5	128,2	131,4	126,1	122,6	121,7
Schienenverkehr	16,5	11,6	11,0	10,4	9,8	9,5
Neue Verbraucher im Verkehr ⁴⁴	0,0	0,1	3,4	6,0	12,4	22,2
Stromverbrauch Endenergie	524,3	517,6	518,3	502,4	491,8	495,0
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-1,3 %</i>	<i>-1,2 %</i>	<i>-4,2 %</i>	<i>-6,2 %</i>	<i>-5,6 %</i>
Raffinerien	6,4	6,2	6,2	5,8	5,4	5,0
PtL für Endverbrauch	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Übrige Energiewirtschaft	7,7	6,8	5,9	5,8	5,3	4,0
Leitungsverluste	30,1	25,8	24,4	23,6	23,0	23,0
Pumpstrom ⁴⁵	7,9	7,5	2,0	2,9	2,2	2,2
Eigenstromverbrauch Kraftwerke	38,3	36,3	28,3	25,4	22,5	22,4
Elektrodenkessel und Großwärmepumpen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Stromverbrauch Energiewirtschaft	90,5	82,5	66,8	63,5	58,3	56,7
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-8,8 %</i>	<i>-26,2 %</i>	<i>-29,8 %</i>	<i>-35,6 %</i>	<i>-37,4 %</i>
Statistische Differenz ^a	-4,2	3,5	0,0	-0,2	-0,1	-0,1
Bruttostromverbrauch	619,0	596,6	585,0	566,2	550,3	551,7
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,6 %</i>	<i>-5,5 %</i>	<i>-8,5 %</i>	<i>-11,1 %</i>	<i>-10,9 %</i>
Stromhandelssaldo ^b	-22,5	-53,7	-52,7	-41,9	-60,8	-77,2
Bruttostromerzeugung	641,5	650,3	637,8	608,1	611,1	628,9
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>1,4 %</i>	<i>-0,6 %</i>	<i>-5,2 %</i>	<i>-4,7 %</i>	<i>-2,0 %</i>

Quelle: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b). Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Anmerkung: ^a Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Datenquellen ergeben sich kleine statistische Differenzen. ^b Ein positives Vorzeichen zeigt einen Importüberschuss, ein negatives Vorzeichen einen Exportüberschuss an.

⁴⁴ Der Posten „Neue Verbraucher im Verkehr“ enthält den Stromverbrauch des Straßenverkehrs sowie eine geringfügige Stromnachfrage der Binnenschifffahrt. Zwar ist die Stromnachfrage der Binnenschifffahrt lediglich im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 relevant, aus Konsistenzgründen wurde die Bezeichnung jedoch vereinheitlicht.

⁴⁵ Der Stromverbrauch für Pumpstrom ergibt sich als Modellergebnis im PowerFlex-Modell. Dies wird von verschiedenen Faktoren wie den abgebildeten und verfügbaren Flexibilitätsoptionen (Speicher, E-Mobilität, etc.), den Möglichkeiten des Im- und Exports und dem Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage beeinflusst. Des Weiteren werden im Modell Primär- und Sekundärregelleistung, welche einen signifikanten Anteil an der Pumpstromerzeugung haben, nicht abgebildet. Dies führt dazu, dass der Pumpstromverbrauch in den modellierten Jahren schwankt und teilweise deutlich niedriger liegt als die historischen Werte.

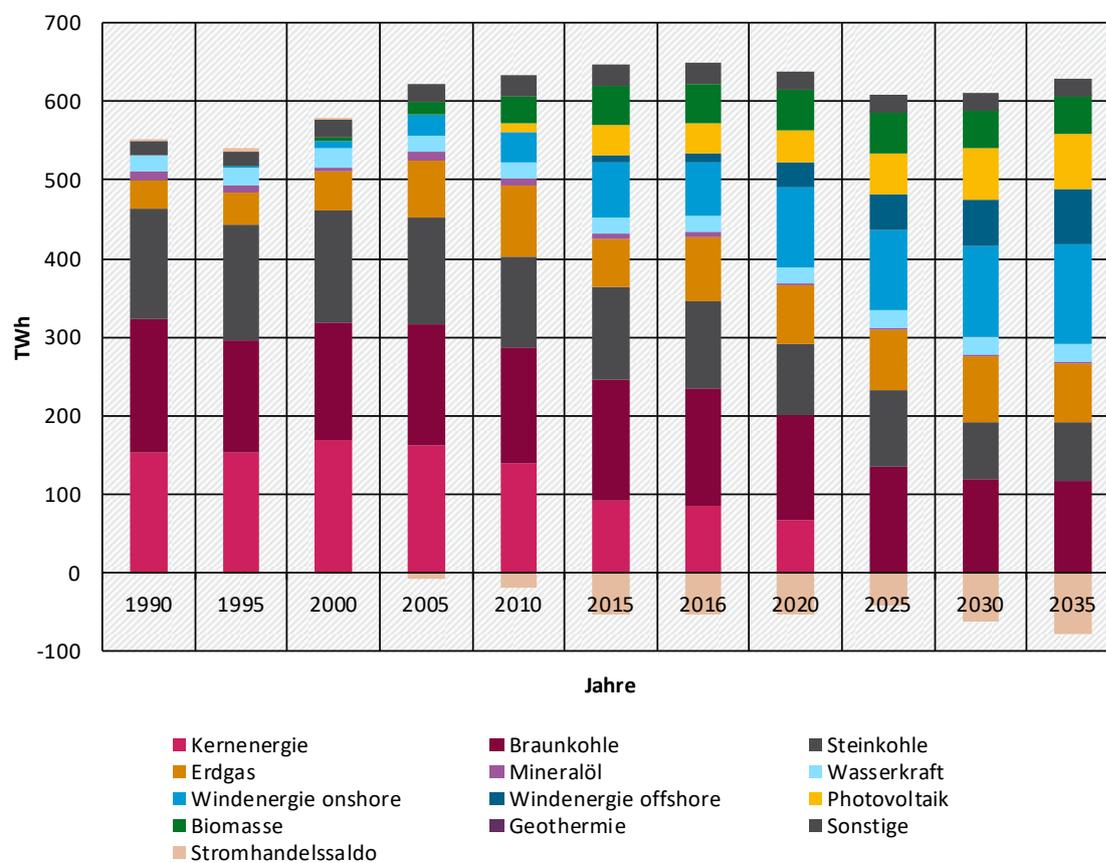
Abbildung 11 und Tabelle 21 stellen die Entwicklung der Bruttostromerzeugung im Referenzszenario dar. Die dazugehörige Entwicklung der installierten elektrischen Leistung kann Abbildung 12 und Tabelle 22 entnommen werden.

Einen deutlichen Anstieg erfährt die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Die Stromerzeugung durch On- und Offshore-Windkraftanlagen nimmt zwischen 2016 und 2030 um 48 TWh bzw. 47 TWh zu. Die Photovoltaik erfährt ebenfalls einen deutlichen Ausbau und nimmt um 27 TWh zu. Die Biomasseverstromung nimmt aufgrund aktueller Regeln im EEG im Szenarienhorizont leicht ab.

Die Stromerzeugung aus Kernenergie kommt aufgrund des Atomausstiegs 2022 zum Erliegen. Durch die starke Zunahme erneuerbarer Energien sowie den EU-Emissionshandel kommt es zu einer Abnahme der Braun- und Steinkohlenverstromung. Aufgrund der Wirtschaftlichkeit der Braunkohleverstromung, nimmt diese jedoch zwischen 2016 und 2030 lediglich um 20 % ab. Die Erdgasverstromung nimmt nur leicht ab, unter anderem aufgrund des Zubaus im Rahmen des KWKG.

Der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch liegt im Jahr 2030 bei ca. 56 % und damit deutlich unter dem Ausbauziel der Bundesregierung (65 %).

Abbildung 11: Bruttostromerzeugung im Referenzszenario (REF), 1990-2035



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

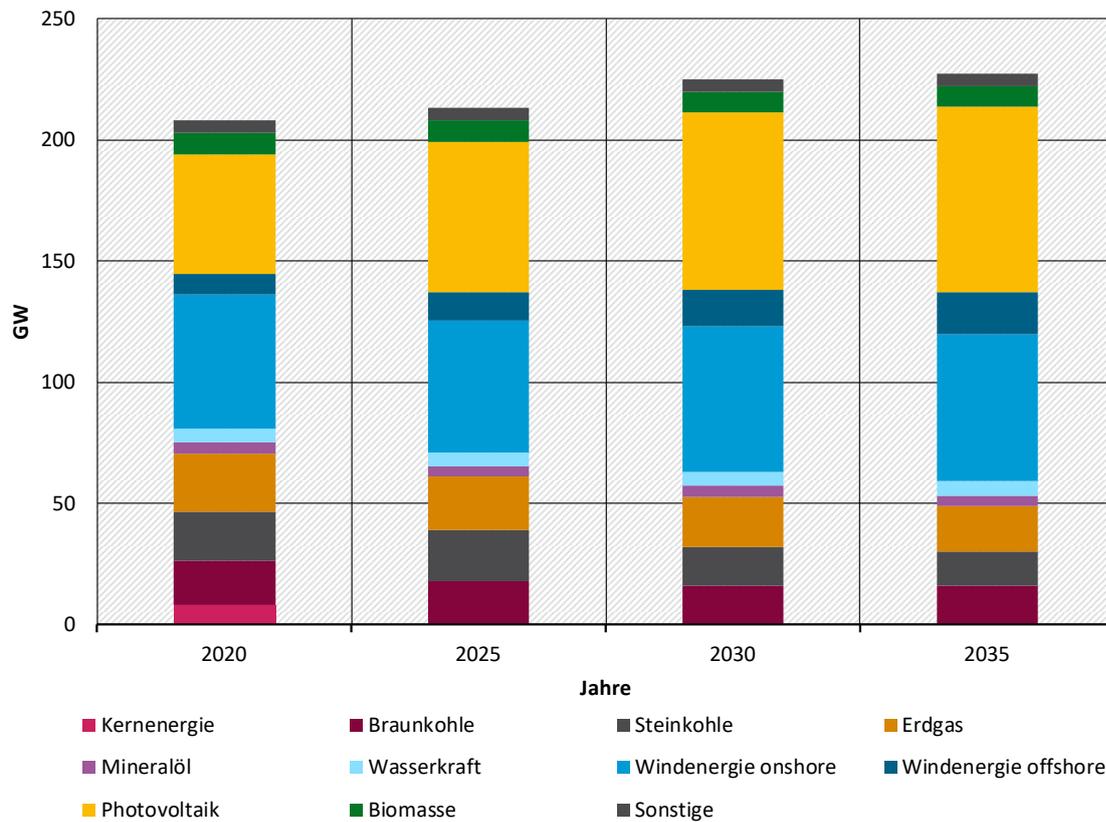
Tabelle 21: Bruttostromerzeugung im Referenzszenario (REF), 1990-2035

Energieträger	2008	2016	2020	2025	2030	2035
	TWh					
Kernenergie	148,8	84,6	66,7	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	150,6	149,5	134,7	135,6	120,0	116,9
Steinkohle	124,6	112,2	90,3	96,5	72,2	75,7
Erdgas	89,1	81,3	73,9	77,2	83,7	74,3
Mineralöl	9,7	5,8	2,9	2,8	2,8	2,9
Wasserkraft	20,4	20,5	21,3	21,4	21,5	21,6
Windenergie onshore	41,4	67,8	101,1	102,3	116,0	126,0
Windenergie offshore	0,0	12,3	31,8	46,0	59,5	70,1
Photovoltaik	4,4	38,1	40,8	53,1	65,4	71,1
Biomasse ^a	27,8	50,9	46,5	45,3	42,8	42,9
Geothermie	0,0	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9
Sonstige	24,7	27,3	27,5	27,5	26,5	26,6
Bruttostromerzeugung	641,5	650,3	637,8	608,1	611,0	628,9
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>1,4 %</i>	<i>-0,6 %</i>	<i>-5,2 %</i>	<i>-4,7 %</i>	<i>-2,0 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>14,7 %</i>	<i>29,2 %</i>	<i>37,9 %</i>	<i>44,2 %</i>	<i>50,0 %</i>	<i>52,9 %</i>
Stromhandelssaldo ^b	-22,5	-53,7	-52,7	-41,9	-60,8	-77,2
Bruttostromverbrauch	619,0	596,6	585,0	566,2	550,3	551,7
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,6 %</i>	<i>-5,5 %</i>	<i>-8,5 %</i>	<i>-11,1 %</i>	<i>-10,9 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>15,2 %</i>	<i>31,8 %</i>	<i>42,2 %</i>	<i>48,3 %</i>	<i>56,4 %</i>	<i>61,1 %</i>

Quelle: AGEb (2018), Modellierung Öko-Institut

Anmerkung: ^a Einschließlich organischen Anteils des Mülls. ^b Ein positives Vorzeichen zeigt einen Importüberschuss, ein negatives Vorzeichen einen Exportüberschuss an.

Abbildung 12: Installierte elektrische Leistung (netto) im Referenzszenario (REF), 2020-2035



Quelle: Modellierung Öko-Institut

Tabelle 22: Installierte elektrische Leistung (netto) nach Energieträgern im Referenzszenario (REF), 2020-2035

Energieträger	2020	2025	2030	2035
	GW			
Kernenergie	8,1	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	18,1	18,1	16,0	16,0
Steinkohle	20,5	21,1	16,2	14,2
Erdgas	23,7	21,7	20,7	18,5
Mineralöl	4,7	4,7	4,7	4,7
Wasserkraft	5,6	5,7	5,7	5,7
Windenergie onshore	55,6	54,5	59,8	60,9
Windenergie offshore	8,4	11,7	15,0	17,4
Photovoltaik	49,5	62,0	73,4	76,5
Biomasse ^a	8,7	8,8	8,4	8,5
Geothermie	0,1	0,1	0,2	0,2
Sonstige	5,3	5,3	5,3	5,3

Energieträger	2020	2025	2030	2035
	GW			
Summe	208,3	213,7	225,4	227,9

Quelle: Modellierung Öko-Institut

Anmerkung: ^a Einschließlich feste und flüssige Biomasse sowie Biogas und Klär- und Deponiegas.

4.1.5 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Die Beschreibung der Instrumente des Klimaschutzprogramms 2030 kann direkt dem entsprechenden Dokument entnommen werden (Bundesregierung 2019c). Für die entsprechenden Instrumente und Maßnahmen werden die folgenden Annahmen und Parameter angesetzt. Da sich die Maßnahme "Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umstellen" vor allem auf den Bereich der ungekoppelten Wärmeerzeugung und des Wärmetransports bezieht ist sie dem Bereich sonstigen Energiewirtschaft zugeordnet. Die detaillierte Parametrisierung kann Abschnitt 4.2.4 entnommen werden.

4.1.5.1 Schrittweise Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung auf Basis der Empfehlungen der Kommission WSB

Eine zentrale Maßnahme im Klimaschutzprogramm ist die Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung auf Basis der Empfehlungen der Kommission „Wachstum, Strukturwandel, Beschäftigung“ (KWSB). Die hier angesetzte verbleibende Stein- und Braunkohleleistung bis 2038 ergibt sich aus den Empfehlungen der KWSB sowie dem Kabinettsbeschluss vom 29. Januar 2020 zum Zeitplan für die Stilllegung von Braun- und Steinkohle-Kraftwerken (Tabelle 23).

Tabelle 23: Installierte Leistung von Stein- und Braunkohlekraftwerken im Szenario Klimaschutzprogramm 2030⁴⁶ (KSPR (Jan 2020)), 2016-2038

Jahr	Braunkohle	Steinkohle
	GW	
2016	21,0	27,7
2022	15,0	15,0
2023	15,0	12,4
2024	14,9	10,9
2025	14,5	9,9
2026	14,0	9,5
2027	13,9	8,4
2028	12,7	8,4
2029	11,1	8,4
2030	8,8	8,0

⁴⁶ Die genannten Leistungen ergeben sich aus den Vorgaben des Kabinettsbeschlusses vom 29.01.2020 sowie Annahmen zur Abschaltung von Braunkohlekraftwerken mit einer elektrischen Leistung unter 120 MW. Die Leistungen geben die Zielniveaus für die jeweiligen im Kabinettsbeschluss genannten Zieldaten wieder (überwiegend zum 01.04. eines Jahres). Für die Umsetzung und Berechnung wurde angenommen, dass diese Leistungsniveaus jeweils für das gesamte Jahr auf dieser Höhe liegen.

Jahr	Braunkohle	Steinkohle
	GW	
2031	8,8	6,1
2032	8,7	4,0
2033	8,7	1,9
2034	8,7	0,7
2035	7,8	0,3
2036	6,1	0,0
2037	6,1	0,0
2038	0,0	0,0

Quelle: BDEW (2018), Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

Um Inkonsistenzen zum vorgegebenen Abschaltplan und dem Erreichen der jeweiligen vorgesehenen Zielniveaus zu vermeiden, wird von einer zusätzlichen wirtschaftlichen Betrachtung der Einzelanlagen im Rahmen des Stilllegungskalküls abgesehen.

4.1.5.2 Ausbau der EE auf 65 % Anteil am Bruttostromverbrauch bis 2030

Des Weiteren sieht das Klimaschutzprogramm 2030 den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung auf einen Anteil von 65 % am Bruttostromverbrauch bis 2030 vor. Für die Modellierung wird die installierte Leistung aus dem Klimaschutzprogramm 2030 übernommen (Tabelle 24), während die Stromerzeugung sowie der Anteil erneuerbarer Energien modellendogen berechnet wird. Für die Windenergie an Land wird für das Jahr 2030 eine installierte Leistung von 69 GW angenommen, was dem Mittelwert des im Klimaschutzprogramms 2030 vorgesehenen Korridors (67-71 GW) entspricht. Die installierte elektrische Leistung für Windenergie auf See wird ebenfalls aus dem Klimaschutzprogramm 2030 entnommen. Damit steigt die installierte Leistung von Windenergie bis 2030 um rund 9 GW (Windenergie an Land) bzw. 5 GW (Windenergie auf See) gegenüber dem Referenzszenario (Tabelle 19). Dasselbe gilt für die installierte Leistung der Photovoltaik im Jahr 2030. Hier ist im Klimaschutzprogramm 2030 eine Leistung von 98 GW avisiert, was einer Erhöhung um 25 GW gegenüber dem Referenzszenario entspricht. Die installierte Leistung der anderen Energieträger bleibt gegenüber dem Referenzszenario unverändert. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass dem im Klimaschutzprogramm 2030 vorgesehenen Zielkorridor für Windenergie an Land (67 bis 71 GW installierte Leistung) die ebenfalls im Klimaschutzprogramm 2030 vorgesehene pauschale Abstandsregelung von 1.000 m entgegensteht, sodass sich auch ein deutlich niedriger Zubau bis 2030 ergeben kann, wenn Bundesländer von dieser Möglichkeit Gebrauch machen (siehe Anhang A.1).⁴⁷

⁴⁷ Eine Berücksichtigung des zwischen den Regierungsfractionen im Mai 2020 gefundenen Kompromisses zur Umsetzung der Abstandsregelung nach dem Klimaschutzprogramm 2030 konnte im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen.

Tabelle 24: Installierte Leistung erneuerbarer Energien im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2016-2035

Technologie	2016	2020	2025	2030	2035
	GW				
Wasserkraft ⁴⁸	5,6	5,6	5,7	5,7	5,7
Windenergie an Land	45,3	55,6	68,7	69,0	74,3
Windenergie auf See	4,2	8,4	14,4	20,3	25,4
Photovoltaik	40,7	49,5	74,5	98,4	114,0
Biomasse ⁴⁹	1,8	1,9	1,9	1,7	1,7
Biogas ⁵⁰	5,9	6,8	6,9	6,7	6,7
Geothermie	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
Summe	103,5	127,9	172,2	202	228

Quelle: (BMWi 2019), BWE 17.01.2018, (Bundesregierung 2019c), Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

4.1.5.3 Weiterentwicklung und umfassende Modernisierung der KWK

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 wird weiterhin die Kraft-Wärme-Kopplung gefördert. Dabei ist einerseits die Förderung des Ersatzes von Kohleanlagen durch Erdgas-KWK-Anlagen vorgesehen. Tabelle 25 stellt die angenommene Leistung an Erdgas-KWK-Anlagen dar, die durch das Klimaschutzprogramm 2030 zusätzlich zum Referenzszenario in Betrieb gehen werden.

Tabelle 25: Kumulierter Zubau von Erdgas-KWK-Anlagen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2025-2035⁵¹

Größenklasse	2025	2030	2035
	GW		
< 1 MW	0,1	0,5	-0,3
1 MW - 50 MW	1,7	1,7	1,9
> 50 MW	3,8	3,8	4,3
Summe	5,6	6,0	5,8

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

⁴⁸ Lauf- und Speicherwasserkraftwerke sowie Pumpspeicherkraftwerke mit natürlichem Zufluss.

⁴⁹ Feste und flüssige Biomasse.

⁵⁰ Biogas, Biomethan, Klärgas, Deponiegas.

⁵¹ Es wird angenommen, dass die Regelungen des im Kabinettsbeschluss bis Ende des Jahres 2029 verlängerten KWKG auch für das Jahr 2035 gelten. Dabei wird über die Zeit ein steigender Anteil an Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien unterstellt sowie eine in 20235 im Vergleich zum Referenzszenario sinkende Rentabilität von kleinen KWK-Anlagen <1 MW.

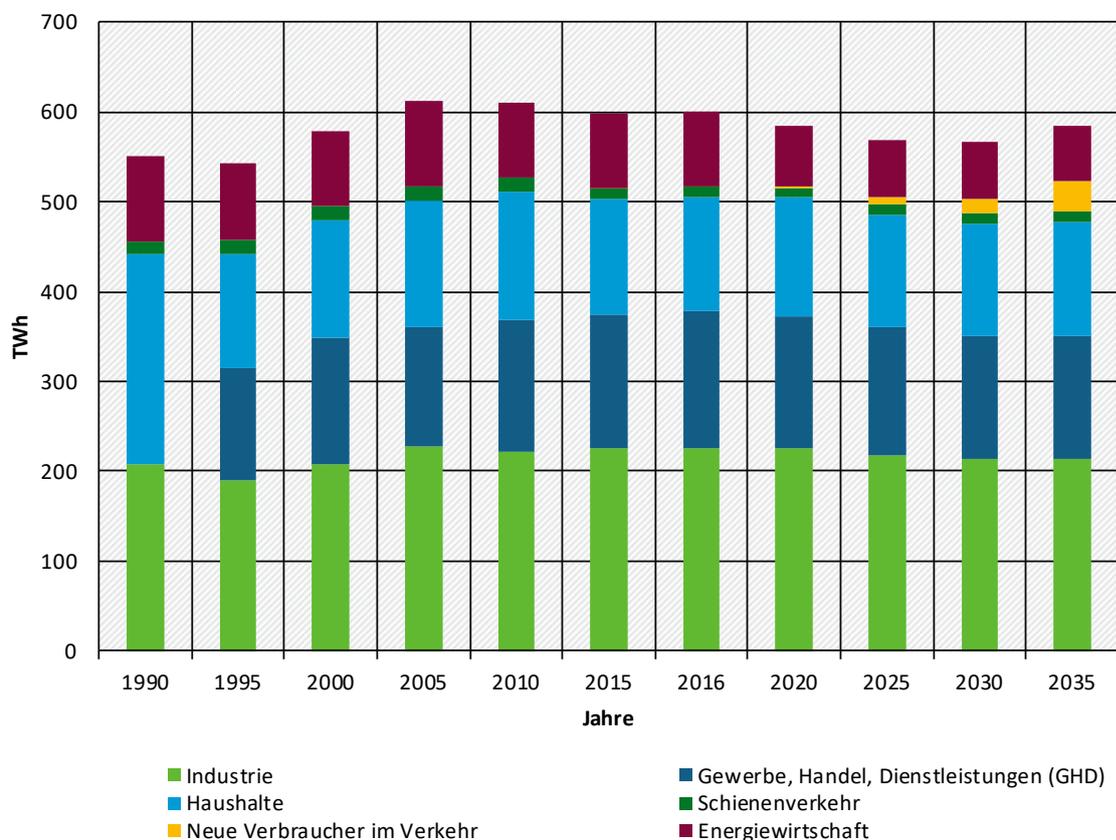
Andererseits sieht der Kabinettsbeschluss vom 29. Januar 2020 unter anderem auch die Förderung von elektrischen Wärmeerzeugern (insbesondere Power-to-Heat-Anlagen) sowie eine Förderung für die Steigerung des erneuerbaren Wärmeanteils in Wärmenetzen vor. Des Weiteren ist im Klimaschutzprogramm 2030 als Maßnahme vorgesehen, Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umzustellen, dabei sollen auch Wärmenetzverluste zu reduziert werden. Da sich die Maßnahmen vor allem auf den Bereich der ungekoppelten Wärmeerzeugung⁵² und des Wärmetransports beziehen, kann die Parametrisierung dieser Maßnahmen entsprechend der Zuordnung dieser Bereiche zur sonstigen Energiewirtschaft, Abschnitt 4.2.4 entnommen werden.

4.1.6 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

4.1.6.1 Gesamtergebnisse

Abbildung 13 und Tabelle 26 stellen die Entwicklung des Bruttostromverbrauchs als Summe der Endverbraucher sowie der Energiewirtschaft⁵³ im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 dar.

Abbildung 13: Bruttostromverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2008-2035



Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

⁵² Im Gegensatz zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird hier nur als Produkt nur Wärme erzeugt, ohne eine gleichzeitige Erzeugung von elektrischem Strom.

⁵³ „Andere Verbraucher“ in Abbildung 13.

Tabelle 26: Bruttostromverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPR (Jan 2020)), 2008-2035

Sektor	2008	2016	2020	2025	2030	2035
	TWh					
Industrie ⁵⁴	232,6	226,6	225,7	217,6	212,8	214,1
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)	135,7	151,0	147,1	142,0	137,5	136,7
Haushalte	139,5	128,2	131,5	126,4	124,4	126,1
Schieneverkehr	16,5	11,6	11,1	11,5	11,7	11,5
Neue Verbraucher im Verkehr ⁵⁵	0,0	0,1	1,0	6,9	17,2	34,0
Stromverbrauch Endenergie	524,3	517,6	516,3	504,4	503,6	522,4
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-1,3 %</i>	<i>-1,5 %</i>	<i>-3,8 %</i>	<i>-3,9 %</i>	<i>-0,4 %</i>
Raffinerien	6,4	6,2	6,2	5,4	4,6	3,8
PtL für Endverbrauch	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	4,5
Übrige Energiewirtschaft	7,7	6,8	5,9	4,7	3,5	2,5
Leitungsverluste	30,1	25,8	24,3	23,6	23,7	24,4
Pumpstrom ⁵⁶	7,9	7,5	1,3	2,8	1,9	2,8
Eigenstromverbrauch Kraftwerke	38,3	36,3	28,3	21,2	17,9	13,3
Elektrodenkessel und Großwärmepumpen	0,0	0,0	1,4	5,6	6,8	10,7
Stromverbrauch Energiewirtschaft	90,5	82,5	67,5	63,4	62,9	62,0
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-8,8 %</i>	<i>-25,4 %</i>	<i>-30,0 %</i>	<i>-30,5 %</i>	<i>-31,5 %</i>
Statistische Differenz ^a	-4,2	3,5	-0,2	-0,6	-0,5	-0,6
Bruttostromverbrauch	619,0	596,6	584,0	568,3	567,0	584,9
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,6 %</i>	<i>-5,7 %</i>	<i>-8,2 %</i>	<i>-8,4 %</i>	<i>-5,5 %</i>
Stromhandelssaldo ^b	-22,5	-53,7	-53,1	-33,7	-45,4	-19,1
Bruttostromerzeugung	641,5	650,3	637,1	602,0	612,3	604,0
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>1,4 %</i>	<i>-0,7 %</i>	<i>-6,2 %</i>	<i>-4,5 %</i>	<i>-5,9 %</i>

Quelle: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b). Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

⁵⁴ Die industrielle Wasserstoffherstellung ist in der gesamten Stromnachfrage der Industrie enthalten.

⁵⁵ Siehe Fußnote 33.

⁵⁶ Der Stromverbrauch für Pumpstrom ergibt sich als Modellergebnis im PowerFlex-Modell. Dies wird von verschiedenen Faktoren wie den abgebildeten und verfügbaren Flexibilitätsoptionen (Speicher, E-Mobilität, etc.), den Möglichkeiten des Im- und Exports und dem Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage beeinflusst. Des Weiteren werden im Modell Primär- und Sekundärregelleistung, welche einen signifikanten Anteil an der Pumpstromerzeugung haben, nicht abgebildet. Dies führt dazu, dass der Pumpstromverbrauch in den modellierten Jahren schwankt und teilweise deutlich niedriger liegt als die historischen Werte.

Anmerkung: ^a Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Datenquellen ergeben sich kleine statistische Differenzen. ^b Ein positives Vorzeichen zeigt einen Importüberschuss, ein negatives Vorzeichen einen Exportüberschuss an.

In den Bereichen Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Haushalte und Schienenverkehr⁵⁷ weicht die Entwicklung der Stromnachfrage bis 2030 nur geringfügig von der Entwicklung im Referenzszenario ab (Tabelle 20 und Tabelle 26). Hierbei gleichen sich in diesen Bereichen nachfragesenkenden Maßnahmen wie Effizienzmaßnahmen und nachfrageerhöhende Maßnahmen (Elektrifizierung) nahezu aus. Lediglich die Stromnachfrage des Straßenverkehrs⁵⁸ liegt mit 17,2 TWh im Jahr 2030 durch neue Verbraucher um rund 5 TWh über dem Referenzszenario (12,4 TWh).

In der Energiewirtschaft gibt es mehrere gegenläufige Effekte: Einerseits sinkt der Stromverbrauch in Raffinerien und anderen Teilen der Energiewirtschaft durch einen deutlichen Rückgang der Nachfrage nach fossilen Energieträgern. Dies betrifft auch den Kraftwerkseigenverbrauch. Andererseits gibt es auch in der Energiewirtschaft neue Stromanwendungen, um aus elektrischer Energie entweder synthetische Kraftstoffe für den Verkehr herzustellen (Power-to-Liquids) oder über Elektrodenkessel (Power-to-Heat) und Großwärmepumpen Fernwärme bereitzustellen. In Summe sinkt der Stromverbrauch der Energiewirtschaft bis 2030 um 24 % gegenüber 2016 und um 30 % gegenüber 2008.

Der gesamte Stromverbrauch sinkt bis 2030 um 5 % gegenüber 2016 bzw. 8 % im Vergleich zu 2008. Insgesamt liegt der Stromverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 im Jahr 2030 um 3 % über dem Referenzszenario.

Abbildung 14 und Tabelle 27 stellen die Entwicklung der Bruttostromerzeugung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 dar. Die dazugehörige Entwicklung der installierten elektrischen Leistung kann Abbildung 15 und Tabelle 28 entnommen werden.

Gegenüber dem Referenzszenario zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Insbesondere die Stromerzeugung durch On- und Offshore-Windenergieanlagen liegt 2030 deutlich höher als im Referenzszenario (um 17 TWh bzw. 20 TWh), was sich durch den Ausbau nach den Zielen des Klimaschutzprogramms 2030 erklären lässt⁵⁹. Die Photovoltaik erfährt ebenfalls einen deutlichen Ausbau und nimmt bis 2030 im Vergleich zum Referenzszenario um rund 22 TWh zu.

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass auftragsgemäß die im Klimaschutzprogramm 2030 vorgesehene EE-Leistung für die Modellierung angenommen wurde. Dem Erreichen des Zielkorridors für Windenergie an Land (67 bis 71 GW installierte Leistung) steht dabei jedoch die ebenfalls im Klimaschutzprogramm 2030 zunächst vorgesehene pauschale Abstandsregelung von 1.000 m entgegen. Wenn Bundesländer von dieser Möglichkeit Gebrauch machen, ergibt sich damit je nach konkreter Ausgestaltung der Abstandsregelung eine erhebliche Mindererzeugung von

⁵⁷ Die Stromnachfrage des Schienenverkehrs bleibt zwischen 2016 und 2035 auf ähnlichem Niveau dadurch, dass der autonomen Effizienzverbesserung eine Erhöhung der Verkehrsleistung gegenübersteht, während sie im Referenzszenario leicht absinkt.

⁵⁸ Siehe Fußnote 34.

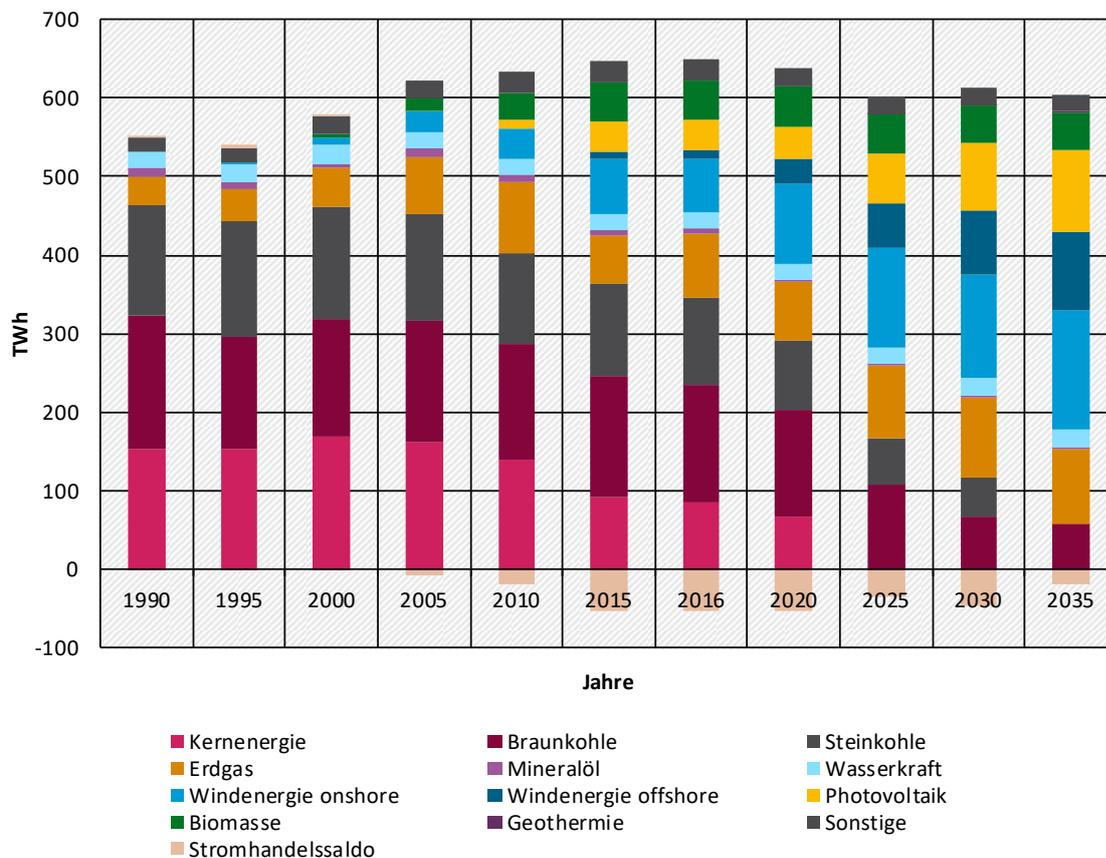
⁵⁹ Als Zielwerte für die installierte Leistung zum jeweiligen Jahresende wurden hier die Mittelwerte der angegebenen Spannen des im Klimaschutzprogramm 2030 beschlossenen Zieltabelaus verwendet. Für die Ermittlung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wurde die installierte Leistung zur Jahresmitte verwendet, um den Effekt des unterjährigen Zubaus abzubilden. Weiterhin wurde die im Projektionsbericht 2019 ausgewiesene Entwicklung der Vollbenutzungsstunden unterstellt, die eine robuste Abschätzung des Zusammenspiels aus prognostizierter technologischer Entwicklung und auftretender Abschläge (z.B. durch Abschattung in Windparks oder durch Abnutzung im Zeitverlauf) darstellt. Diese sind zum Teil geringer als die sich rechnerisch im Zieltableau aus genannter installierter Leistung und Erzeugung ergebenden Vollbenutzungsstunden. In Summe ergibt sich ein Dargebot (mögliche Stromerzeugung) an erneuerbaren Energien, welches am unteren Rand der im Zieltableau ausgewiesenen Erzeugung liegt (370 TWh im Vergleich zu Zieltableau: 372-382 TWh).

Windenergieanlagen an Land im Jahr 2030⁶⁰. Die dazugehörigen Berechnungen können Anhang A.1 entnommen werden.

Durch den zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien, vor allem jedoch durch die Umsetzung des Kohleausstiegs kommt es gegenüber dem Referenzszenario bis 2025 zu einer um 27 TWh geringeren Braunkohleverstromung und bis 2030 um 54 TWh. Damit verbleiben 2030 rund 44 % der Braunkohlenverstromung des Jahres 2016. Während im Referenzszenario die Steinkohleverstromung noch bei 72 TWh im Jahr 2030 lag, liegt sie im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 bei 51 TWh. Damit beträgt die Steinkohlenverstromung im Jahr 2030 rund 45 % des Jahres 2016. Im Vergleich der Szenarien für das Jahr 2030 nimmt die Erdgasverstromung um rund 18 TWh zu. Dies ist vor allem auf den Ersatz von Steinkohle-KWK-Anlagen durch Erdgas-KWK-Anlagen zu erklären, welcher über das KWKG gefördert wird.

Der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch liegt im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 im Jahr 2030 bei 65 % und erreicht damit das Ausbauziel der Bundesregierung. Dabei ist jedoch darauf hinzuweisen, dass weitergehende Elektrifizierungsstrategien in anderen Sektoren (z.B. weiterer Ausbau der Elektromobilität, Herstellung von Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen) zu einer höheren Stromnachfrage führen würden. Wird die installierte Leistung an erneuerbaren Energien und damit auch ihre Erzeugung nicht in gleichem Maße ausgebaut, sinkt der EE-Anteil, da die zusätzliche Nachfrage durch fossile Kraftwerke bedient werden muss.

Abbildung 14: Bruttostromerzeugung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2008-2035



⁶⁰ Eine Berücksichtigung des zwischen den Regierungsfractionen im Mai 2020 gefundenen Kompromisses zur Umsetzung der Abstandsregelung nach Klimaschutzprogramm 2030 konnte im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen.

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

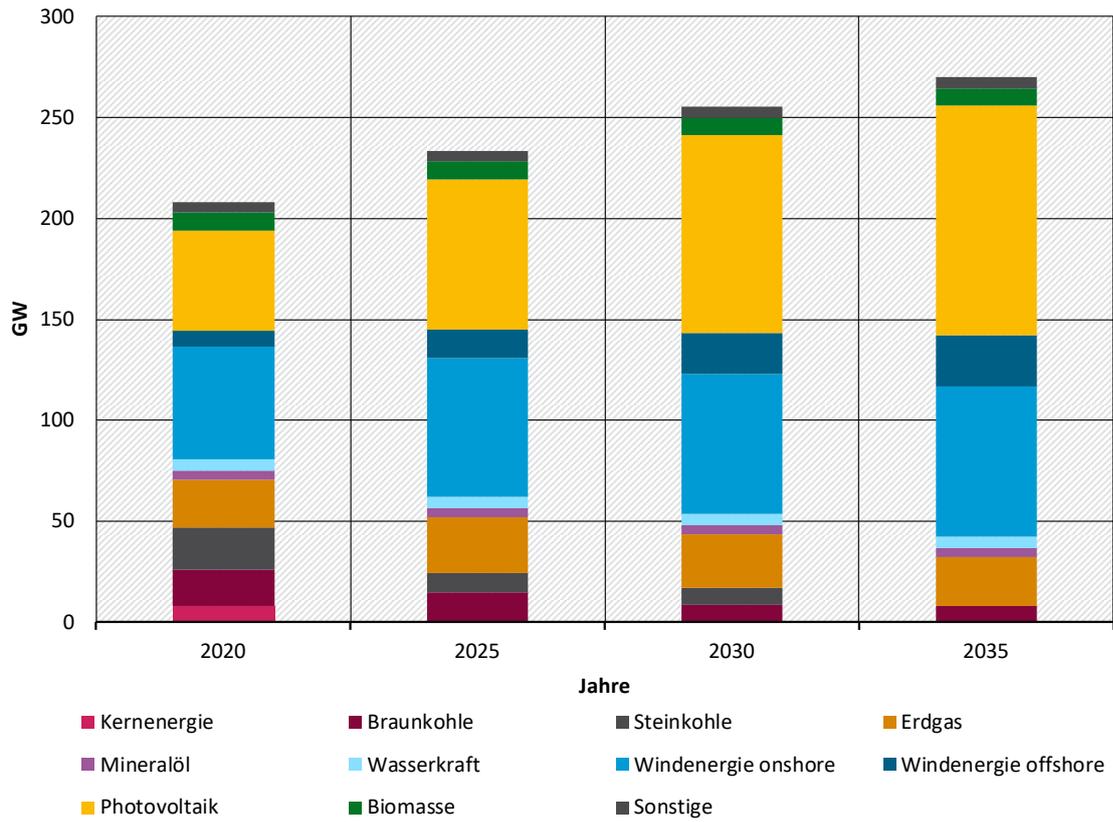
Tabelle 27: Bruttostromerzeugung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP_r (Jan 2020)), 2008-2035

Energieträger	2008	2016	2020	2025	2030	2035
	TWh					
Kernenergie	148,8	84,6	66,7	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	150,6	149,5	135,5	108,8	66,5	58,0
Steinkohle	124,6	112,2	90,1	58,0	51,0	0,0
Erdgas	89,1	81,3	73,2	92,4	101,9	95,6
Mineralöl	9,7	5,8	2,9	2,5	2,4	2,5
Wasserkraft	20,4	20,5	21,3	21,4	21,5	21,6
Windenergie onshore	41,4	67,8	101,1	127,2	133,1	151,3
Windenergie offshore	0,0	12,3	31,8	55,6	79,8	101,1
Photovoltaik	4,4	38,1	40,8	63,0	86,9	104,4
Biomasse ^a	27,8	50,9	46,4	45,5	43,1	43,0
Geothermie	0,0	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
Sonstige	24,7	27,3	27,1	27,2	25,5	25,7
Bruttostromerzeugung	641,5	650,3	637,1	602,0	612,3	604,0
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>1,4 %</i>	<i>-0,7 %</i>	<i>-6,2 %</i>	<i>-4,5 %</i>	<i>-5,9 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>14,7 %</i>	<i>29,2 %</i>	<i>37,9 %</i>	<i>52,0 %</i>	<i>59,6 %</i>	<i>69,9 %</i>
Stromhandelssaldo ^b	-22,5	-53,7	-53,1	-33,7	-45,4	-19,1
Bruttostromverbrauch	619,0	596,6	584,0	568,3	567,0	584,9
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,6 %</i>	<i>-5,7 %</i>	<i>-8,2 %</i>	<i>-8,4 %</i>	<i>-5,5 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>15,2 %</i>	<i>31,8 %</i>	<i>42,2 %</i>	<i>55,9 %</i>	<i>65,2 %</i>	<i>73,0 %</i>

Quelle: AGE (2018), Modellierung Öko-Institut

Anmerkung: ^a Einschließlich organischen Anteils des Mülls. ^b Ein positives Vorzeichen zeigt einen Importüberschuss, ein negatives Vorzeichen einen Exportüberschuss an.

Abbildung 15: Installierte elektrische Leistung (netto) im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 KSPr (Jan 2020), 2020-2035



Quelle: Modellierung Öko-Institut

Tabelle 28: Installierte elektrische Netto-Nennleistung nach Energieträgern im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2020-2035

Energieträger	2020	2025	2030	2035
	GW			
Kernenergie	8,1	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	18,1	14,5	8,8	7,8
Steinkohle	20,5	9,9	8,1	0,0
Erdgas	23,7	27,3	26,6	24,3
Mineralöl	4,7	4,7	4,7	4,6
Wasserkraft	5,6	5,7	5,7	5,7
Windenergie onshore	55,6	68,7	69,0	74,3
Windenergie offshore	8,4	14,4	20,3	25,4
Photovoltaik	49,5	74,5	98,4	114,0
Biomasse ^a	8,7	8,8	8,4	8,5
Geothermie	0,1	0,1	0,2	0,2
Sonstige	5,3	5,3	5,3	5,3
Summe	208,3	233,9	255,5	270,1

Quelle: Modellierung Öko-Institut

Anmerkung: ^a Einschließlich feste und flüssige Biomasse sowie Biogas und Klär- und Deponiegas.

4.1.6.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Die Bewertung der Maßnahmen des Klimaschutzplans 2030 wurde ebenfalls über eine Modellierung im Strommarktmodell PowerFlex durchgeführt. Hierzu wurde zu den Einstellungen des Referenzszenarios jeweils eine Maßnahme hinzugeschaltet (z.B. REF + Reduzierung der Kohleverstromung) und die daraus folgenden CO₂-Emissionen berechnet. Da es Überlappungseffekte zwischen den Einzelmaßnahmen gibt (z.B. wirken sowohl der Ausbau der erneuerbaren Energien als auch der Kohleausstieg auf die Stromerzeugung aus Braun- und Steinkohle), ist der Gesamteffekt aller Maßnahmen geringer. Dieser entspricht der Differenz der Emissionen zwischen dem Szenario Klimaschutzprogramm 2030 und dem Referenzszenario.

Tabelle 29: Annahmen für die Bewertung der Einzelmaßnahmen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))

Einzelmaßnahme	Annahmen
Schrittweise Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung auf Basis der Empfehlungen der Kommission WSB	Der Stand der Kapazitäten zum Zieldatum für die installierte Leistung von Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke wurde für das jeweilige Stützjahr wie folgt angenommen: -Braunkohle: Ausstiegspfad des Bund-Länder-Kompromisses, schrittweise Abschaltung der Braunkohlekraftwerke < 120MW (0,6 GW) innerhalb von 10 Jahren von 2022 bis 2032

Einzelmaßnahme	Annahmen
	<p>- Steinkohle: Abschaltung auf Grundlage des Alters und der geographischen Lage (Netzfaktor); Zielwerte für installierte Leistung anhand von Sonder-/Aus-schreibungsmengen, die die lineare Reduktion der Gesamt-Kohle-Kapazitäten sicherstellen</p> <p>- Datteln IV befindet sich im Stützjahr 2020 im Probetrieb, es wird ange-nommen, dass das Kraftwerk den Dauerbetrieb frühestens im Jahr 2021 auf-nimmt und in den Jahren 2025 und 2030 in Betrieb ist. 2035 sind keine Stein-kohlekraftwerke mehr am Netz</p> <p>- Kohleersatz-Anlagen: Grundlage ist die Wärmebereitstellung, die durch die Abschaltung der Braun- und Steinkohlekraftwerke im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 im Ver-gleich zum Referenzszenario wegfällt; diese wird zum Teil durch Erdgas-KWK und -BHKW und zum Teil durch EE-Wärme erstellt. Der Anteil an EE-Wärme-ersatz steigt über die Zeit an: 2025: 15 %; 2030: 30 %; 2035: 55 % Aufteilung zwischen GuD und BHKW auf Grundlage der heute bekannten ge-planten Projekte (40 % BHKWs)</p>
<p>Ausbau der EE auf 65 % An-teil am Bruttostromver-brauch bis 2030</p>	<p>Für den Ausbau von PV und Windenergieanlagen an Land und auf See sowie für Biomasse werden die im Klimaschutzprogramm 2030 genannten Zielwerte für die installierte Leistung 2030 verwendet. Der jeweilige Bestand wurde bis zum aktuellen Rand (2018) aktualisiert und dann ein gleichmäßiger Zubau an-genommen, der die Leistungsziele für 2030 erreicht. Für die Vollbenutzungs-stunden (VBH) von PV, Windenergieanlagen an Land und auf See wurden die im Projektionsbericht 2019 verwendeten Annahmen zugrunde gelegt. Diese entsprechen einem Anstieg der VBH über die Zeit. Für 2030 sind diese Werte jedoch konservativer als die rechnerischen VBH, die sich aus der installierten Leistung und der erwarteten Erzeugung aus dem Klimaschutzprogramm 2030 ergeben. Auf Grund des geringeren Stromverbrauchs wird das 65 %-Ziel den-och erreicht.</p>
<p>Weiterentwicklung und um-fassende Modernisierung der KWK</p>	<p>Es wird angenommen, dass der Zubau an großen und mittleren KWK-Anlagen (> 1 MW) vorrangig im Rahmen des Kohleersatzes passiert, sodass diese Ka-pazitäten der Maßnahme zur Beendigung der Kohleverstromung zugeordnet werden. Im Rahmen der Maßnahme zur Weiterentwicklung und umfassenden Modernisierung der KWK erfolgt die Förderung kleiner KWK-Anlagen (< 1MW), von Power-to-Heat (PtH)-Anlagen und der Erhöhung des EE-Anteils in der Fernwärme (EE-Wärme). Im Einzelnen wird angenommen, dass die die Wärmebereitstellung aus Groß-Wärmepumpen zwischen 2020 und 2025 um ca. 0,4 TWh und zwischen 2025 und 2030 um ca. 0,6 TWh und zwischen 2030 und 2035 um rund 0,4 TWh pro Jahr ansteigt. Die Installierte Leistung an PtH-Anlagen steigt von 500 MW im Jahr 2020 bis 2030 um rund 350 MW pro Jahr; danach um 50 MW pro Jahr.</p>
<p>Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Ab-wärme umstellen</p>	<p>Es wird angenommen, dass für die Förderfälle im Rahmen dieser Maßnahme durch sinkende Gebäudeenergieverbräuche eine gewisse Sättigung einsetzt, so dass die Zahl der Projekte, die angeschoben werden können, bis 2025 am höchsten ist und dann sukzessive abnimmt. Andererseits wird angenommen, dass sich damit die Einsparung kumuliert: für 2020 bis 2025: rund 1 TWh pro Jahr (also 5 TWh in 2025); 2025 bis 2030: rund 0,85 TWh pro Jahr (also 9 TWh in 2030); 2030 bis 2035: rund 0,6 TWh pro Jahr (also 12 TWh in 2035). Es wird davon ausgegangen, dass vor allem Projekte im Bereich von Solarthermie-, Wärmepumpen-, und Abwärmenetzen angeschoben werden und außerdem auch Wärmeverluste im Bestandsnetz verringert werden.</p>

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Tabelle 30: Bewertung der Einzelmaßnahmen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPR (Jan 2020))

Einzelmaßnahmen	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂		
Schrittweise Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung auf Basis der Empfehlungen der Kommission WSB	52	78	114
Ausbau der EE auf 65 % Anteil am Bruttostromverbrauch bis 2030	21	17	26
Weiterentwicklung und umfassende Modernisierung der KWK ⁶¹	-2	-2	-1
Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umstellen	0	2	3
Summe der Einzelmaßnahmen	70	94	143
Gesamtwirkung unter Berücksichtigung der Überlappungseffekte	60	76	122

Quelle: Modellierung Öko-Institut

Die wirkmächtigste Maßnahme ist die Beendigung der Kohleverstromung (inklusive Erdgas-KWK-Ersatz) mit einer Minderung der THG-Emissionen von 78 Mio. t CO₂ im Jahr 2030, da Kohlekraftwerke den größten Teil der Emissionen im Stromsektor ausmachen, gefolgt von der Ausweitung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, auf die 17 Mio. t CO₂e im Jahr 2030 entfallen. Die Modernisierung der KWK (Anlagen <1MW sowie Förderung von Elektrodenkesseln und Einsatz von Großwärmepumpen) führt zu einer Erhöhung der Emissionen im Stromsektor. Dies ist darin begründet, dass der Einsatz von kleinen Erdgas-KWK-Anlagen gegenüber der Referenzentwicklung zurückgeht. Auf Grund des in diesem Szenario unterbleibenden zusätzlichen Ausbau der erneuerbaren Energien, wird darüber hinaus der Strom für den Betrieb der Elektrodenkessel und Großwärmepumpen nicht nur aus erneuerbaren Energien gespeist, sondern auch aus fossiler Erzeugung, die zum Teil mit höheren Emissionen verbunden ist als die Wärmeerzeugung in Erdgaskesseln. Die Bilanz für die Umstellung von Wärmenetzen fällt dagegen positiver aus, führt aber ebenfalls zu einer vergleichsweise geringen Emissionswirkung. Der Unterschied liegt hier einerseits in der echten Verdrängung von fossiler Wärmeerzeugung durch Solarthermie und Abwärme, andererseits in der Verringerung der Wärmenachfrage durch eine Reduktion der Wärmeverluste. Die Unterschiede in der Wirkung in den verschiedenen Jahren ergibt sich aus den unterschiedlichen Entwicklungen der Kapazitäten und Erzeugung der einzelnen Technologien (siehe Abschnitt 4.2.4).

Die in Tabelle 30 berechnete Gesamtwirkung der Maßnahmen ist nicht deckungsgleich mit der Differenz zwischen dem Szenario Klimaschutzprogramm 2030 und dem Referenzszenario für die gesamte Energiewirtschaft (Tabelle 41). Dies liegt darin begründet, dass Tabelle 30 die Be-

⁶¹ An dieser Stelle sein nochmals explizit drauf hingewiesen, dass der Ersatz von Kohle-KWK durch Erdgas-KWK-Anlagen (Kohleersatz) als Teil der Maßnahme Schrittweise Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung abgebildet wurde. Die hier untersuchte Maßnahmenwirkung bezieht sich ausschließlich auf KWK-Anlagen unter 1 MW und auf den Einsatz von Großwärmepumpen und Elektrodenkessel in der Wärmebereitstellung.

wertung von Maßnahmen im Bereich der Stromerzeugung ausweist, diese jedoch in zwei Sektoren wirksam werden: in der Industrie (Industriekraftwerke) sowie in der Energiewirtschaft (öffentliche Kraftwerke). Gleichermäßen enthält Tabelle 41 ebenfalls die Emissionen von Heizwerken sowie flüchtige Emissionen, die nicht in Tabelle 30 enthalten sind. Schließlich stellt Tabelle 30 CO₂-Emissionen dar, während Tabelle 41 THG-Emissionen (CO₂e) abbildet.

4.1.6.3 Einordnung der Unsicherheiten

Die Projektion von THG-Emissionen im Stromsektor unterliegt einer Reihe von Unsicherheiten.

Zum einen bestehen Unsicherheiten in Bezug auf die Parametrisierung der Maßnahmen. Da die Maßnahmen im Klimaschutzprogramm 2030 nur zum Teil mit konkreten Annahmen hinterlegt sind, mussten für die Modellierung Annahmen getroffen werden, die mit dem Auftraggeber abgestimmt wurden (Kapitel 3).

Wesentlich für die Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Stromsektor im Kraftwerkssektor ist die Entwicklung der erneuerbaren Energien. So kann die im Klimaschutzprogramm 2030 vorgesehene Abstandsregelung dazu führen, dass die Emissionsminderung deutlich niedriger ausfällt, da fossile Kraftwerke damit stärker ausgelastet würden⁶² (Anhang A.1).

Darüber hinaus ist die Einsatzreihenfolge der Kraftwerke und damit die THG-Emissionen wesentlich davon abhängig, wie sich die Brennstoffpreise sowie die CO₂-Preise im europäischen Emissionshandel entwickeln. Sofern der CO₂-Preis niedrig und der Erdgaspreis hoch sind, sind Kohlekraftwerke profitabler, sodass die THG-Emissionen entsprechend steigen; ist der CO₂-Preis hoch und der Erdgaspreis niedrig, so steigt die Profitabilität von Erdgaskraftwerken so dass Steinkohlekraftwerke und/oder Braunkohlekraftwerke in der Einsatzreihenfolge hinter Erdgaskraftwerke rutschen und die THG-Emissionen entsprechend sinken.

Schließlich sind die Emissionen im Stromsektor auch von der Entwicklung im gesamtwirtschaftlichen Umfeld, in anderen Sektoren sowie im von der Entwicklung des Erzeugungsparks im europäischen Ausland abhängig. Sofern sich das Wirtschaftswachstum anders darstellt als angenommen, so kann es zu einem höheren bzw. niedrigeren Stromverbrauch, vor allem in den Endverbrauchssektoren Industrie und GHD, kommen. Die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen und Elektrifizierungsstrategien in den Endverbrauchssektoren wirken sich ebenfalls auf den Stromverbrauch und damit auf die Emissionen des Kraftwerkssektors aus. Als relevante Maßnahmen sind hier unter anderem die Förderung von Wärmepumpen sowie der Ausbau der Elektromobilität zu nennen. Die Umsetzungsgeschwindigkeit sowie der Umfang dieser Maßnahmen haben eine direkte Auswirkung auf den Stromverbrauch. Eine zusätzliche Nachfrage kann durch den Umbau der Energiesysteme der deutschen Nachbarstaaten entstehen. Hier sind vor allem die direkten Nachbarländer zu nennen, wie z.B. Frankreich, wo es mittelfristig zu einem Rückgang der Stromerzeugung aus Kernkraft kommen wird oder die Niederlande, wo innerhalb der nächsten Dekade sowohl ein Kohleausstieg als auch der Ausstieg aus der einheimischen Gasproduktion erfolgen soll.

4.1.7 Vergleich der Szenarien

Eine vergleichende Diskussion zwischen dem Klimaschutzprogramm 2030 und dem Referenzszenario wurde in Abschnitt 4.1.6.1 vorgenommen. Hier werden die Unterschiede in Bezug auf Stromnachfrage und Stromerzeugung zwischen beiden Szenarien diskutiert.

⁶² Eine Berücksichtigung des zwischen den Regierungsfractionen im Mai 2020 gefundenen Kompromisses zur Umsetzung der Abstandsregelung nach Klimaschutzprogramm 2030 konnte im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen.

Eine Diskussion der Unterschiede in Bezug auf die THG-Emissionen wird in Abschnitt 4.4.3 vorgenommen.

4.2 Übrige Energiewirtschaft

4.2.1 Methodik

Neben der Stromerzeugung müssen für die Energiewirtschaft (Umwandlungssektor) noch eine Reihe weiterer Verursacherebereiche berücksichtigt werden:

- a) Heizwerke der Fernwärmeversorgung (d.h. ungekoppelte Fernwärmeerzeugung)⁶³,
- b) (Mineralöl-) Raffinerien,
- c) übrige Anlagen des Umwandlungssektors (Braunkohlengruben, Steinkohlensechen, Brikettfabriken, Kokereien, andere Umwandlungs- und Veredelungsanlagen, Eigenverbrauch von Biogasanlagen),
- d) Erdgasverdichterstationen im Pipelinennetz⁶⁴.

Die Entwicklung der fossilen Brennstoffeinsätze (außer Erdgas) der Heizwerke orientiert sich an den Entwicklungen der Brennstoffeinsätze zur Wärmeerzeugung in öffentlichen Kraftwerken. Ein Ausbau wurde bei Solar- und Geothermie angenommen, während Einsätze übriger erneuerbarer Energieträger sowie von Abfall auf dem Niveau des Jahres 2016 fortgeschrieben wurden. Der Einsatz von Erdgas wurde als Residualgröße modelliert, also als Größe, die die verbleibende Wärmenachfrage nach Abzug aller anderen Energieträger abdeckt.

Die übrigen betrachteten Umwandlungsanlagen werden unabhängig vom Stromerzeugungssektor modelliert. Anders als die Modellierung des Stromsektors erfolgt hier die Modellierung nicht stundenscharf, sondern nur als Jahreswert. Bei der Integration der Sektorergebnisse bilden sie zusammen mit den Stromerzeugungsanlagen den gesamten Umwandlungssektor (Energiewirtschaft) ab. Die Projektionen der anderen Umwandlungssektoren außerhalb der Stromerzeugung sind im Wesentlichen durch die Energieverbräuche der Energiesektoren determiniert: alle Nachfragegrößen für die übrigen Umwandlungssektoren ergeben sich aus den in den Sektoranalysen ermittelten Energienachfragen, wobei Leitungs- und Umwandlungsverluste bei der Integration vollständig berücksichtigt werden. Energieverbräuche, die nicht konkret zu individuellen Treibern zugeordnet werden können, werden als konstant fortgeschrieben.

4.2.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario

Für das Referenzszenario wird durch Fortschreibung angenommen, dass sich durch die im Rahmen des KWKG bestehende Förderung innovativer KWK-Systeme mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien der Einsatz von Solarthermie und Geothermie entsprechend der folgenden Tabelle erhöht.

⁶³ Gekoppelte Fernwärmeerzeugung bezeichnet die Fernwärmeerzeugung in Heizkraftwerken bei gleichzeitiger Stromerzeugung. Ungekoppelte Fernwärmeerzeugung hingegen bezeichnet die Fernwärmeerzeugung ohne gleichzeitige Stromerzeugung, z.B. in Heizwerken.

⁶⁴ Bei den Erdgasverdichterstationen ergibt sich die Besonderheit, dass diese im Sinne der Energiebilanz zum Umwandlungssektor gerechnet werden, in der Systematik des Nationalen Treibhausgasinventars hingegen beim Verkehr als CRF 1.A.3.e Sonstiger Transport verbucht werden. Diese Besonderheit wurde in der Modellierung bei der Berechnung von Primär- und Endenergie einerseits und der Zuordnung von Emissionen andererseits berücksichtigt.

Tabelle 31: Ausbau im Bereich netzgebundener Wärme im Referenzszenario (REF)

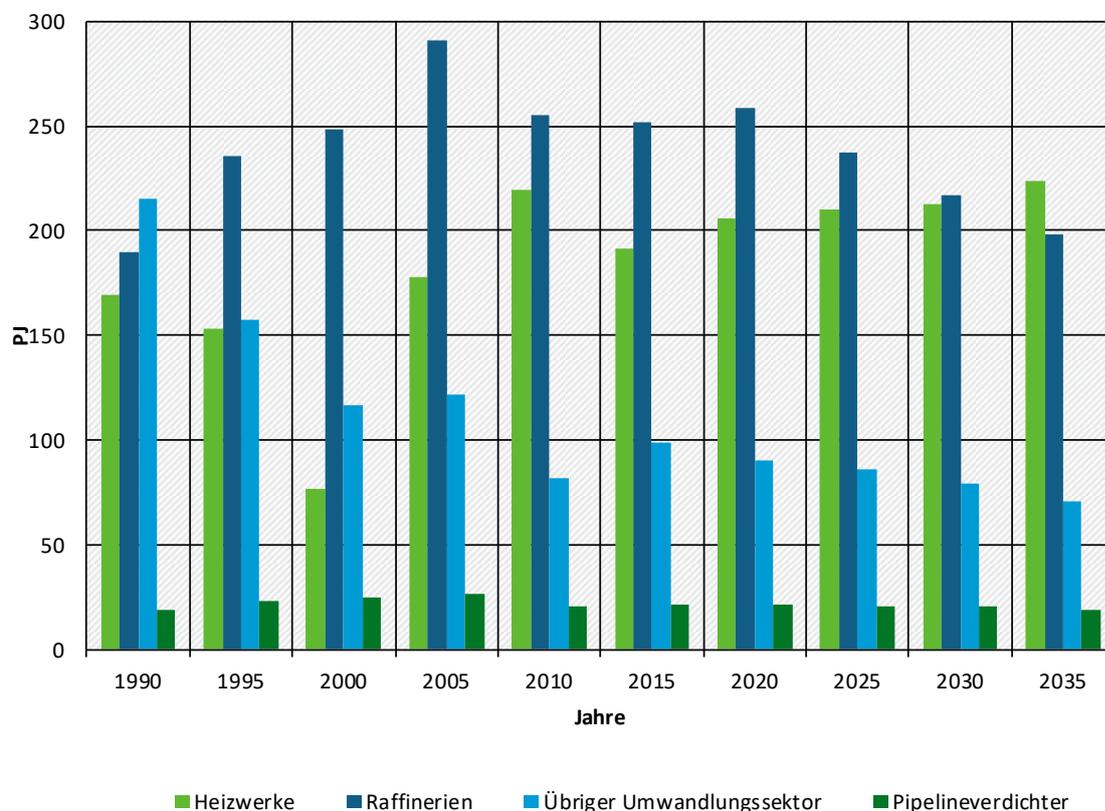
	2020	2025	2030	2035
Solarthermie	GW			
Installierte thermische Leistung	0,3	0,5	0,8	1,0
Tiefengeothermie	TWh			
Wärmeeinspeisung	0,6	0,8	1,0	1,2

Quelle: Annahmen Öko-Institut

4.2.3 Ergebnisse Referenzszenario

Die Energieverbräuche in den verschiedenen Subsektoren der übrigen Energiewirtschaft haben sich in der Vergangenheit unterschiedlich entwickelt. Auch in der Zukunft ist keine gleichmäßige Entwicklung zu erwarten, wie Abbildung 16 und die darauffolgende Erläuterung für das Referenzszenario zeigen.

Abbildung 16: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Referenzszenario (REF), 1990-2035



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellrechnungen des Öko-Institut

Die Nachfrage nach netzgebundener Wärme (Fernwärme sowie industrielle KWK-Wärme) in den Endverbrauchssektoren ist in Summe bis 2025 leicht ansteigend, um dann bis 2035 wieder leicht abzusinken. Ebenso erreicht die KWK-Wärmeerzeugung 2025 ein Maximum. Anschließend geht die KWK-Wärmeerzeugung weder leicht zurück, so dass durch die ungekoppelte

Fernwärmeerzeugung in öffentlichen Heizwerken ein größerer Anteil der Wärmenachfrage abgedeckt wird. Daher nimmt der Energieeinsatz in öffentlichen Heizwerken bis 2030 um gut 13 % gegenüber 2016 zu, siehe Tabelle 32, bis 2035 sogar um 19 %. Der zusätzliche Energiebedarf wird zum größten Teil durch zusätzliches Erdgas gedeckt, teilweise auch durch Öl. Der Verbrauch an anderen fossilen Energieträgern ändert sich im Vergleich dazu nur wenig. Der Einsatz biogener Energieträger sowie von Müll bleibt auf konstantem Niveau. Eine zunehmende Bedeutung bei der Bereitstellung von Fernwärme erlangen, wenn auch auf niedrigem Niveau, Geothermie und Solarthermie.

Bedingt durch einen Rückgang des Mineralölverbrauchs insgesamt (siehe Primärenergieverbrauch von Mineralöl in Tabelle 125) sinkt die Aktivität der Raffinerien und somit zeigt sich ein Rückgang aller in Raffinerieunterfeuerungen eingesetzten fossilen Brennstoffe wie auch des Strombedarfs der Raffinerien. Insgesamt sinkt der Energieverbrauch der Raffinerien (ohne Raffineriekraftwerke) bis 2030 um etwa 17 % gegenüber dem Jahr 2016.

Im Bereich der übrigen Energiewirtschaft zeigt sich ein diverses Bild: Im Bereich der Kokereien und sonstigen Kohleumwandlung sinken die Energieverbräuche bedingt durch eine sinkende Nachfrage nach Koks (in der Stahlherstellung) und Briketts. Der Eigenverbrauch von Biogasanlagen⁶⁵ bleibt auf etwa konstantem Niveau. Der Strombedarf des übrigen Umwandlungssektors ist rückläufig. Die Verbräuche einiger Energieträger sind modellierungsbedingt konstant. Insgesamt sinkt der Energieverbrauch des übrigen Umwandlungssektors bis 2030 um etwa 17 % gegenüber 2016.

Der Energieverbrauch der Erdgasverdichterstationen ist rückläufig und sinkt aufgrund sinkender Nachfragen der Erdgasverbraucher bis 2030 um etwa 6 % gegenüber dem Jahr 2016.

Insgesamt sinkt der Energieverbrauch der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Referenzszenario bis 2030 um etwa 7 % gegenüber dem Jahr 2016.

Tabelle 32: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Referenzszenario (REF), 2016-2035

Sektor	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
Heizwerke					
Braunkohlen	2	3	3	2	3
Steinkohlen	13	14	15	14	13
Öl	6	0	0	1	17
Erdgas	88	111	112	113	106
Kokerei-/Stadtgas	1	0	0	0	0
Müll	31	31	31	31	31
Biogas	6	6	6	6	6

⁶⁵ Seit dem Berichtsjahr 2016 ist der Eigenverbrauch von Biogasanlagen in der Quellgruppe CRF 1.A.1.c Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger (= Übriger Umwandlungssektor) enthalten (Umweltbundesamt (UBA) 2016a, 2016b).

Sektor	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
(Feste) Biomasse	38	38	38	38	38
Wärmepumpen	0	0	0	0	0
Geothermie	2	2	3	4	4
Solarthermie	0	1	2	3	5
Strom	0	0	0	0	0
Heizwerke gesamt	187	206	210	213	224
<i>Änderung ggü. 2016</i>	<i>0,0 %</i>	<i>10,0 %</i>	<i>12,1 %</i>	<i>13,5 %</i>	<i>19,3 %</i>
Raffinerien					
Öl	48	47	43	39	36
Raffineriegas	147	145	132	121	111
Erdgas	40	40	36	33	30
Kokerei-/Stadtgas	1	1	1	1	1
Fern- und Nahwärme	4	4	3	3	3
Strom	22	22	21	19	18
Raffinerien gesamt	263	258	237	217	199
<i>Änderung ggü. 2016</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-1,7 %</i>	<i>-9,9 %</i>	<i>-17,4 %</i>	<i>-24,5 %</i>
Übriger Umwandlungssektor					
Braunkohlen	6	5	3	2	1
Erdgas	5	4	3	2	1
Gichtgas	16	16	16	16	16
Kokerei-/Stadtgas	7	7	7	7	7
Biogas	21	23	22	21	21
(Feste) Biomasse	6	6	6	6	6
Fern- und Nahwärme	9	7	7	6	4
Strom	24	21	21	19	15
Übriger Umwandlungssektor gesamt	96	91	86	80	71
<i>Änderung ggü. 2016</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-5,3 %</i>	<i>-10,4 %</i>	<i>-16,9 %</i>	<i>-25,8 %</i>

Sektor	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
Pipelineverdichter					
Erdgas	22	21	21	21	19
Pipelineverdichter gesamt	22	21	21	21	19
<i>Änderung ggü. 2016</i>	0,0 %	-3,3 %	-5,1 %	-6,3 %	-12,1 %
Übrige Energiewirtschaft gesamt	568	577	554	530	513
<i>Änderung ggü. 2016</i>	0,0 %	1,5 %	-2,5 %	-6,7 %	-9,8 %

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellrechnungen des Öko-Institut

4.2.4 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Sowohl durch die Maßnahme zur Weiterentwicklung und umfassenden Modernisierung der KWK als auch durch eine weitere Maßnahme, die das Ziel verfolgt, Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umzustellen, ist eine Wirkung auf die ungekoppelte Wärmebereitstellung in Heizwerken und eine Wirkung auf die Verluste in Wärmenetzen zu erwarten.⁶⁶ Für die Parametrisierung der Wärmenetze-Maßnahme wird davon ausgegangen, dass vor allem Projekte im Bereich von Solarthermie-, Wärmepumpen, und Abwärmenetzen angeschoben werden und außerdem Wärmeverluste im Bestandsnetz verringert werden. Es wird angenommen, dass für die Förderfälle eine gewisse Sättigung einsetzt, so dass die Zahl der Projekte, die angeschoben werden können, bis 2025 am höchsten ist und dann sukzessive abnimmt. Andererseits wird angenommen, dass sich damit die Einsparung kumuliert. Für die Parametrisierung der ersteren Maßnahme wird angenommen, dass die hier vorgesehene Förderung vor allem zum Zubau von Power-to-Heat (PtH)-Anlagen und zum vermehrten Einsatz von Großwärmepumpen zur Erhöhung des EE-Anteils in der Fernwärme (EE-Wärme) führt. Im Einzelnen wird angenommen, dass die Wärmebereitstellung aus Groß-Wärmepumpen zwischen 2020 und 2025 um ca. 0,4 TWh und zwischen 2025 und 2030 um ca. 0,6 TWh und zwischen 2030 und 2035 um rund 0,4 TWh pro Jahr ansteigt. Die installierte Leistung an PtH-Anlagen steigt von 500 MW im Jahr 2020 bis 2030 um rund 350 MW pro Jahr; danach um 50 MW pro Jahr. Die resultierende kumulierte installierte Leistung und Wärmebereitstellung durch neue EE-Wärmeerzeuger im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sind in Tabelle 33 und Tabelle 34 aufgeführt.

⁶⁶ Grundsätzlich wirken sich Wärmenetze sowohl auf Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Strom und Wärme, Abschnitt 4.1.5), reine Heizwerke (nur Wärme) und erneuerbare Wärme aus. Diese Maßnahme bezieht sich jedoch vor allem auf erneuerbare Energien und Abwärme, deshalb wird diese Maßnahme nur in diesem Abschnitt diskutiert.

Tabelle 33: Installierte Leistung an neuen EE-Wärmeerzeugern im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2020-2035

Wärmeerzeuger (GW _{th})	2020	2025	2030	2035
Abwärme	0,0	0,0	0,1	0,1
Elektrodenkessel	0,5	2,3	4,0	4,3
Solarthermie	0,3	1,9	3,2	4,2
Summe	0,8	4,2	7,3	8,6

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Tabelle 34: Wärmebereitstellung durch neue EE-Wärmeerzeuger im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2020-2035

Wärmeerzeuger (TWh)	2020	2025	2030	2035
Abwärme	0,0	0,4	0,6	0,8
Elektrodenkessel	1,4	4,6	3,8	6,8
Geothermie	0,6	0,8	1,0	1,2
Großwärmepumpen	0,0	2,4	7,3	9,8
Solarthermie	0,3	2,2	3,9	5,2
Summe	2,3	10,5	16,6	23,8
Reduktion Wärmenetzverluste	0,0	1,8	3,8	5,2

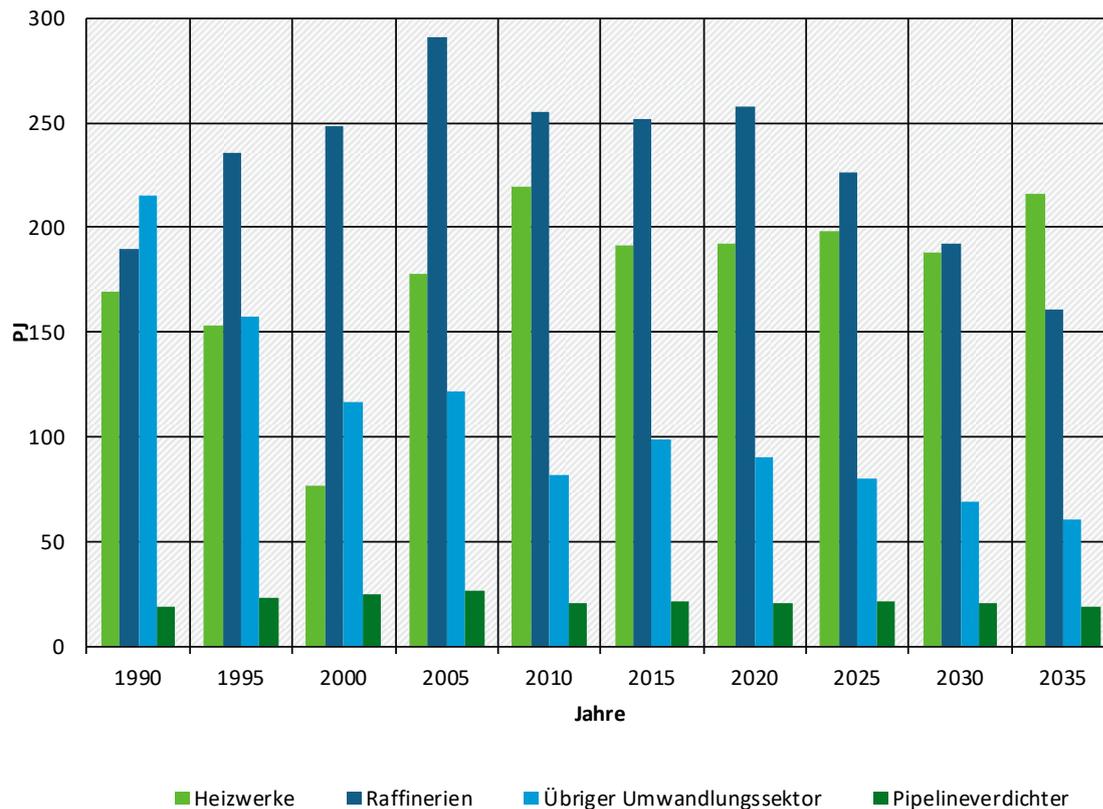
Quelle: Annahmen Öko-Institut

4.2.5 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

4.2.5.1 Gesamtergebnisse

Abbildung 17 zeigt die historische und zukünftige Entwicklung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 des Energieeinsatzes in den unterschiedlichen Bereichen der Energiewirtschaft (mit Ausnahme der Kraftwerke). Die stärkste Veränderung ergibt sich bei den Raffinerien.

Abbildung 17: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellrechnungen des Öko-Institut

Die Nachfrage nach netzgebundener Wärme (Fernwärme sowie industrielle KWK-Wärme) in den Endverbrauchssektoren Szenario Klimaschutzprogramm 2030 erreicht im Jahr 2020 ein Maximum und sinkt anschließend wieder leicht ab. Kurzfristig dominiert der durch das Klimaschutzprogramm 2030 hervorgerufene Wechsel der Endenergienachfrage von fossilen Brennstoffen zu netzgebundener Wärme. Langfristig hingegen dominieren die zusätzliche Energieeinsparungen. Die KWK-Wärmeerzeugung hingegen geht nach einem Maximum im Jahr 2020 zurück und liegt im Jahr 2030 um 6 % niedriger als im Jahr 2016. In Folge wird durch öffentliche Heizwerke ein größerer Anteil der Wärmenachfrage abgedeckt. Im Jahr 2030 liegt der Energieverbrauch der Heizwerke zwar auf dem Niveau des Jahres 2016, nimmt dann bis 2035 aber um 15 % zu, siehe Tabelle 35. Der zusätzliche Energiebedarf wird vor allem durch neue Technologien wie Solarthermie, Geothermie, Wärmepumpen und Elektroheizer gedeckt. Der Einsatz fossiler Energieträger ist stark rückläufig.

Bedingt durch einen Rückgang des Mineralölverbrauchs insgesamt (siehe Primärenergieverbrauch von Mineralöl in Tabelle 126) sinkt die Aktivität der Raffinerien und somit zeigt sich ein Rückgang aller in Raffinerieunterfeuerungen eingesetzten fossilen Brennstoffe wie auch des Strombedarfs der Raffinerien. Insgesamt sinkt der Energieverbrauch der Raffinerien (ohne Raffineriekraftwerke) gegenüber 2016 bis 2030 um 27 % und bis 2035 um 39 %.

Im Bereich des übrigen Umwandlungssektors führt unter anderem der Kohleausstieg dazu, dass der Energieverbrauch bis 2030 um 27 % im Vergleich zu 2016 sinkt.

Der Energieverbrauch der Erdgasverdichterstationen ist rückläufig und sinkt aufgrund sinkender Nachfragen der Erdgasverbraucher bis 2030 um etwa 6 % gegenüber dem Jahr 2016.

Insgesamt sinkt der Energieverbrauch der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 bis 2030 um etwa 17 % gegenüber dem Jahr 2016.

Tabelle 35: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2016-2035

Sektor	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
Heizwerke					
Braunkohlen	2	3	2	1	1
Steinkohlen	13	15	8	3	0
Öl	6	0	0	0	19
Erdgas	88	92	76	48	36
Kokerei-/Stadtgas	1	0	0	0	0
Müll	31	31	31	31	31
Biogas	6	6	6	6	6
(Feste) Biomasse	38	38	38	38	38
Wärmepumpen	0	0	9	26	35
Geothermie	2	2	3	4	4
Solarthermie	0	1	8	14	19
Strom	0	5	17	14	25
Heizwerke gesamt	187	193	199	188	216
<i>Änderung ggü. 2016</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-1,9 %</i>	<i>-14,0 %</i>	<i>-26,8 %</i>	<i>-38,9 %</i>
Raffinerien					
Öl	48	47	41	35	29
Raffineriegas	147	144	126	108	90
Erdgas	40	40	35	30	25
Kokerei-/Stadtgas	1	1	1	1	1
Fern- und Nahwärme	4	4	3	3	2
Strom	22	22	20	17	14
Raffinerien gesamt	263	258	226	192	161

Sektor	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
<i>Änderung ggü. 2016</i>	0,0 %	-1,9 %	-14,0 %	-26,8 %	-38,9 %
Übriger Umwandlungssektor					
Braunkohlen	6	5	3	2	1
Erdgas	5	4	3	2	1
Gichtgas	16	16	16	15	14
Kokerei-/Stadtgas	7	7	7	6	6
Biogas	21	23	22	22	22
(Feste) Biomasse	6	6	6	6	6
Fern- und Nahwärme	9	7	5	3	1
Strom	24	21	17	13	9
Übriger Umwandlungssektor gesamt	96	91	80	69	61
<i>Änderung ggü. 2016</i>	0,0 %	-5,4 %	-16,6 %	-27,4 %	-36,4 %
Pipelineverdichter					
Erdgas	22	21	21	21	19
Pipelineverdichter gesamt	22	21	21	21	19
<i>Änderung ggü. 2016</i>	0,0 %	-4,3 %	-2,8 %	-5,6 %	-13,4 %
Übrige Energiewirtschaft gesamt	568	562	526	471	457
<i>Änderung ggü. 2016</i>	0,0 %	-1,0 %	-7,4 %	-17,1 %	-19,6 %

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellrechnungen des Öko-Institut

4.2.5.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Eine Quantifizierung der Maßnahmen erfolgt zusammen mit den anderen Maßnahmen in der Energiewirtschaft in Abschnitt 4.1.6.2.

4.2.5.3 Einordnung der Unsicherheiten

Im Bereich der übrigen Energiewirtschaft außerhalb der Kraftwerke ist die Unsicherheit größer als in anderen Bereichen des Energiesystems, da die Modellierung über einfache Teilmodelle ohne detaillierte Technologiebasis und ohne Optimierung erfolgt. Zudem ist die Entwicklung der übrigen Energiewirtschaft wesentlich durch die Energieverbräuche des Verkehrs, der Gebäude, der Industrie und der Kraftwerke determiniert.

4.2.6 Vergleich der Szenarien

Das Klimaschutzprogramm 2030 hat auf die Energiewirtschaft außerhalb der Kraftwerke unterschiedliche Auswirkungen, wie der Vergleich der Szenarien zeigt.

Der Energieeinsatz der öffentlichen Heizwerke liegt für das Jahr 2030 im KSPr (Jan 2020) um 24 PJ niedriger als im REF. Da der Energieeinsatz nach 2030 aber wieder steigt, beträgt der Unterschied 2035 nur noch bei 7 PJ. Viel größer als bei den Energieeinsätzen der Heizwerke insgesamt ist aber die Verschiebung der Struktur: Der Einsatz fossiler Energieträger liegt im KSPr (Jan 2020) für das Jahr 2030 um 84 PJ niedriger als im REF. Im Gegensatz dazu decken die neuen Technologien Solarthermie, Geothermie, Wärmepumpen und Elektrokessel im Jahr 2030 im KSPr (Jan 2020) 51 PJ mehr ab als im REF.

Das Klimaschutzprogramm 2030 bewirkt einen deutlichen Rückgang der Nachfrage nach Mineralölprodukten, daher liegt der Energieeinsatz der Raffinerien im Jahr 2030 im KSPr (Jan 2020) um 25 PJ niedriger als im Referenzszenario.

Im übrigen Umwandlungssektor sind die Unterschiede zwischen KSPr (Jan 2020) und dem REF nicht ganz so groß, der Unterschied beträgt 10 PJ für das Jahr 2030.

Bei den Erdgasverdichtern gibt es nur marginale Unterschiede zwischen den beiden Szenarien, da sich Erdgaseinsparung durch Energieeffizienz und Brennstoffwechsel von emissionsintensiven Brennstoffen zu Erdgas im Saldo in etwa aufheben.

In Summe liegt der Energieverbrauch der Energiewirtschaft ohne Kraftwerke durch das Klimaschutzprogramm 2030 im Jahr 2030 um 59 PJ niedriger als im Referenzszenario, wobei sich der Unterschied bis 2035 durch den beschriebenen Anstieg alternativer Technologien bei den Heizwerken etwas abschwächt.

4.3 Diffuse Emissionen aus Brennstoffen

Diffuse Emissionen aus Brennstoffen entstehen während und nach dem Abbau, bei der Aufbereitung, beim Transport und bei der Verteilung, sowie durch Leckagen und bei der Abfackelung fossiler Energieträger (Kohle, Mineralöl und Erdgas). Daher ist die Entwicklung dieser diffusen Emissionen eng mit dem Verbrauch fossiler Energieträger in den Umwandlungs- und Endverbrauchssektoren verbunden.

4.3.1 Methodik

Die Modellierung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen erfolgt in enger Anlehnung an die Berechnungsmethoden des Nationalen Inventarberichts (UBA 2018c). In der Modellierung wird für jede relevante Quellgruppe eine Aktivitätsrate aus der Modellierung der Energiesektoren abgeleitet. Ist dies nicht möglich, so werden Aktivitätsraten auf konstantem Niveau fortgeschrieben. Tabelle 36 gibt einen Überblick über die verwendeten Aktivitätsraten.

Tabelle 36: Relevante Quellgruppen für diffuse Emissionen aus Brennstoffen sowie in der Modellierung verwendete Aktivitätsraten

CRF	Bezeichnung	Verwendete Aktivitätsrate
1.B.1.a.i.1	Aktiver Steinkohlenuntertagebau	Steinkohleförderung
1.B.1.a.i.2	Steinkohlenuntertagebau Nachbetrieb	Fortschreibung
1.B.1.a.i.3	Stillgelegte Steinkohlenuntertagebau	Fortschreibung
1.B.1.a.ii	Braunkohlentagebau	Primärenergieverbrauch Braunkohle
1.B.1.b	Kohleumwandlung	Rohstahlproduktion als Treibergröße für Koksbedarf
1.B.2.a.1	Ölexploration ⁶⁷	Förderprognose Erdöl und Erdgas
1.B.2.a.2	Ölförderung	Förderprognose Erdöl
1.B.2.a.3	Öltransport	Produktion Raffinerien
1.B.2.a.4	Ölraffination	Produktion Raffinerien
1.B.2.a.5	Ölverteilung	Produktion Raffinerien
1.B.2.b.2	Gasförderung	Förderprognose Erdgas
1.B.2.b.3	Gasverarbeitung	Förderprognose Erdgas
1.B.2.b.4	Gastransport	Fortschreibung der Länge des Gastransportnetzes unter Berücksichtigung konkreter Neubauprojekte
1.B.2.b.5	Gasverteilung	Fortschreibung der Länge des Gasverteilnetzes
1.B.2.b.6	Gasverbrauch	Primärenergieverbrauch Erdgas
1.B.2.c.1	Abfackelung und Belüftung von Öl	Produktion Raffinerien
1.B.2.c.2	Abfackelung und Belüftung von Gas	Primärenergieverbrauch Erdgas

Quelle: Darstellung Öko-Institut

4.3.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario

Neben dem nachfragegetriebenen Aufkommen für die verschiedenen Energieträger wurden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- a) Für den Emissionsbeitrag aus dem aktiven Steinkohlenbergbau ist die Entwicklung der Fördermenge entscheidend. Hier wurde in allen Szenarien davon ausgegangen, dass die Förderung in deutschen Bergwerken zum Jahr 2018 aufgrund des Endes der Subventionierung entsprechend § 1 Abs. 1 Steinkohlefinanzierungsgesetz (SteinkohleFinG) (Deutscher Bundestag 2015) vollständig eingestellt wurde.

⁶⁷ Entgegen ihrer Bezeichnung enthält die Quellgruppe CRF 1.B.2.a.1 in Deutschland nicht nur die Exploration nach Erdöl, sondern auch nach Erdgas.

- b) Für die Förderung von Erdöl in Deutschland wurde auf die Energiereferenzprognose (Prognos AG, EWI, GWS 2014) zurückgegriffen. Für die inländische Erdgasförderung wurden auf die bis zum Jahr 2028 reichende Prognose im Entwurf zum Netzentwicklungsplan Gas 2018 (Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas 2018) zurückgegriffen und der dortige Trend bis zum Jahr 2035 extrapoliert. Implizit wird sowohl bei Erdöl als auch bei Erdgas unterstellt, dass Veränderungen in den Verbrauchsniveaus ausschließlich Veränderungen bei den Erdöl- und Erdgasimporten zur Folge haben.
- c) Für das Erdgasnetz wurde vom Stand von 2016 ausgegangen, wobei die im Entwurf zum Netzentwicklungsplan Gas 2018 (Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas 2018) aufgeführten Projekte zum Neubau von Erdgastransportleitungen berücksichtigt wurden.

Darüber hinaus bilden vor allem die Mengengerüste für die Kohle-, Öl- und Gasnachfrage die zentralen Bestimmungsgrößen für die flüchtigen Emissionen des Energiesektors.

4.3.3 Ergebnisse Referenzszenario

Tabelle 37 zeigt die Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen. Im Zeitraum von 1990 bis 2016 sanken diese Emissionen um 74 % von 38,0 Mio. t CO₂e auf 10,0 Mio. t CO₂e. Durch weitere deutliche Emissionsminderungen verbleiben im Jahr 2030 noch 6,7 Mio. t CO₂e, was einer Reduktion von 82 % gegenüber 1990 entspricht.

Im Jahr 1990 war die bedeutendste Emissionsquelle der Kohlenbergbau mit 25,5 Mio. t CO₂e. Bis zum Jahr 2016 sind diese Emissionen bereits um über 90 % auf nur noch 2,4 Mio. t CO₂e zurückgeführt worden. Aufgrund der kompletten Rückführung des deutschen Steinkohlenbergbaus bis zum Ende des Jahres 2018 betragen die Emissionen im Jahr 2030 nur noch 0,2 Mio. t CO₂e, ein Rückgang um über 99 % gegenüber 1990. Braunkohlentagebaue hingegen haben nur sehr geringe diffuse Emissionen.

Die diffusen Emissionen aus der Förderung, Verarbeitung und Verteilung von Erdgas stiegen von 9,3 Mio. t CO₂e im Jahr 1990 zunächst auf 11,9 Mio. t CO₂e im Jahr 1993 an und fielen anschließend auf 5,9 Mio. t CO₂e im Jahr 2016. Bis zum Jahr 2030 ist ein Rückgang auf 5,2 Mio. t CO₂e und damit 44 % niedriger als 1990 zu erwarten. Deutlich rückläufige Emissionen sind einerseits durch eine rückläufige Erdgasförderung und damit verbundene Gasaufarbeitung und andererseits durch sinkende Erdgasverbräuche zu erwarten. Andererseits führt ein Ausbau des Erdgasnetzes zu einem leichten Anstieg der dortigen diffusen Emissionen.

Förderung, Verarbeitung und Verteilung von Öl trägt nur in geringem Umfang zu diffusen Emissionen aus Brennstoffen bei. Hier sanken die Emissionen (CO₂ und CH₄) von 0,7 Mio. t CO₂e im Jahr 1990 auf 0,5 Mio. t CO₂e im Jahr 2016 und werden auf 0,4 Mio. t CO₂e im Jahr 2030 sinken. Ähnliches gilt für die Emissionen aus Abfackelung und Belüftung: Hier sanken die Emissionen von 0,5 Mio. t CO₂e (1990) auf 0,4 Mio. t CO₂e (2016) und werden leicht auf 0,3 Mio. t CO₂e (2035) absinken.

Insgesamt zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Anteile der unterschiedlichen fossilen Brennstoffe an den diffusen Emissionen. Wurden 1990 noch 72 % der diffusen Emissionen durch Kohle und Koks verursacht, sank dieser Anteil bis 2016 auf 32 % und im Jahr 2030 wird er bei nur noch 12 % liegen. Erdgas steigerte seinen Anteil hingegen von 25 % im Jahr 1990 auf 59 % im Jahr 2016 und wird im Jahr 2030 mit einem Anteil von 77 % die diffusen Emissionen dominieren. Der Anteil von Öl an den diffusen Emissionen stieg von unter 2 % (1990) auf 5 % (2016) und wird mit einem Anteil von 5 % (2030) eine ähnlich untergeordnete Bedeutung behalten. Ähnlich stieg der Anteil von Abfackelung und Belüftung von 1 % (1990) auf 4 % (2016), bleiben aber bis zum Jahr 2030 in etwa bei diesem Anteil.

Tabelle 37: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im Referenzszenario (REF), 1990-2035

	1990	2016	2020	2025	2030	2035
Mio. t CO ₂ e						
CO₂-Emissionen						
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Koksproduktion (1.B.1.b)	1,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Gasförderung-, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	1,4	1,1	0,8	0,6	0,4	0,2
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
CO₂-Emissionen gesamt	4,1	2,4	2,1	1,8	1,6	1,3
CH₄-Emissionen						
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	25,5	2,4	0,2	0,2	0,2	0,2
Koksproduktion (1.B.1.b)	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Gasförderung-, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	7,9	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CH₄-Emissionen gesamt	33,9	7,5	5,2	5,2	5,1	5,1
N₂O-Emissionen						
N₂O-Emissionen gesamt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen						
Diffuse Emissionen gesamt	38,0	10,0	7,3	7,0	6,7	6,4
<i>ggü. 2005</i>	<i>131,1 %</i>	<i>-39,4 %</i>	<i>-55,5 %</i>	<i>-57,2 %</i>	<i>-58,9 %</i>	<i>-60,8 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-73,8 %</i>	<i>-80,8 %</i>	<i>-81,5 %</i>	<i>-82,2 %</i>	<i>-83,0 %</i>

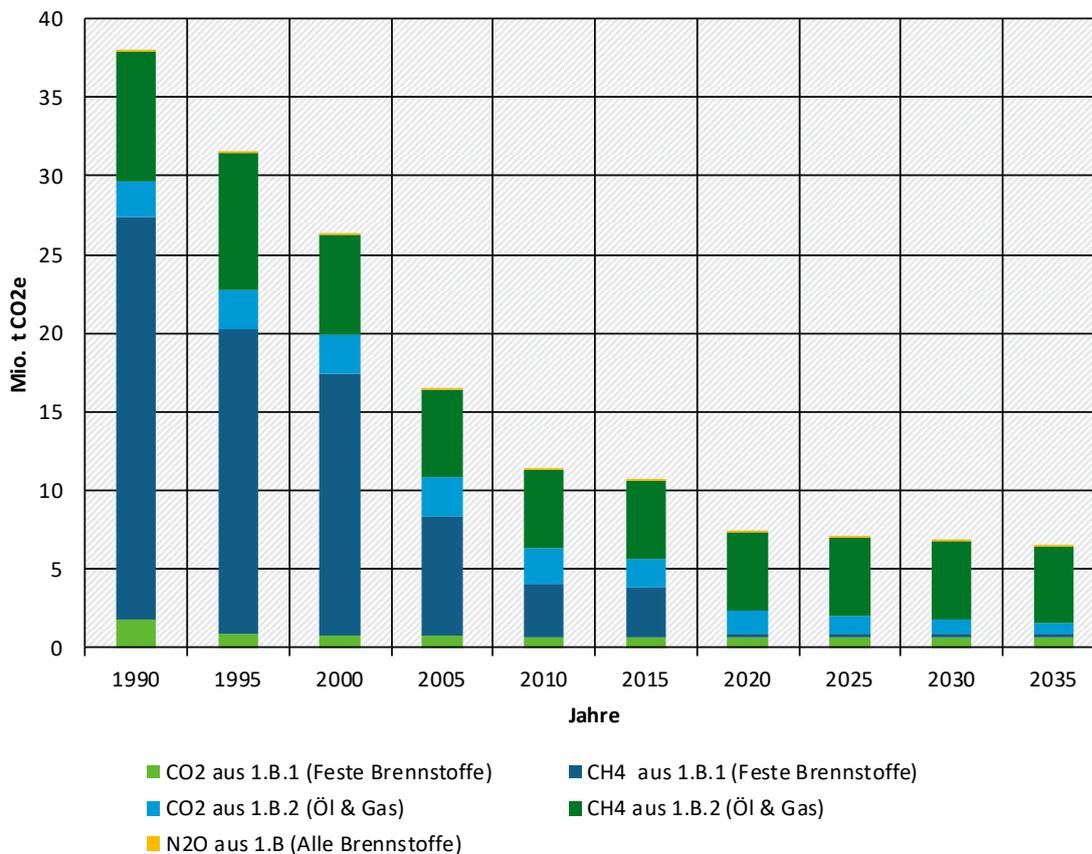
Anmerkung: Emissionen, die in der Tabelle als 0,0 Mio. t CO₂e dargestellt sind, existieren, sind aber kleiner als 0,05 Mio. t CO₂e.

Quelle: Darstellung Öko-Institut

Abbildung 18 stellt die historische und projizierte Entwicklung der diffusen Emissionen grafisch dar. Deutlich zu erkennen ist, dass der historische Rückgang der Emissionen vor allem aus ei-

nem Rückgang der Festbrennstoffe herrührt. Für die Zukunft zeigt das Diagramm, dass der Ausstieg aus der Steinkohleförderung noch einen kurzfristigen Emissionsminderungseffekt (Rückgang der CH₄ Emissionen aus festen Brennstoffen) auf die diffusen Emissionen hat und die diffusen Emissionen dann auf etwa konstantem Niveau verbleiben.

Abbildung 18: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im Referenzszenario (REF), 1990-2035



Quelle: 2005 - 2015: (UBA 2018b); 2020 - 2035: Berechnungen des Öko-Instituts

4.3.4 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Die Annahmen und Parameter unterscheiden sich im KSP (Jan 2020) nicht von denen der Referenz. Die Unterschiede der Ergebnisse ergeben sich daher aus den unterschiedlichen Nachfragen an fossilen Energieträgern.

4.3.5 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

4.3.5.1 Gesamtergebnisse

Tabelle 38 zeigt die Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030. Im Zeitraum von 1990 bis 2016 sanken diese Emissionen um 74 % von 38 Mio. t CO_{2e} auf 10 Mio. t CO_{2e}. Durch weitere deutliche Emissionsminderungen verbleiben im Jahr 2030 noch 6,6 Mio. t CO_{2e}, was einer Reduktion von 83 % gegenüber 1990 entspricht.

Aufgrund des Kohleausstiegs sinken die Emissionen aus dem Kohlenbergbau im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 etwas schneller als im Referenzszenario. Wegen einer teilweisen Umstellung der Stahlproduktion und einem damit zurückgehenden Koksverbrauch liegen die Emissio-

nen aus der Koksherstellung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 niedriger als im Referenzszenario. Ebenso haben die Veränderungen an Verbräuchen von Öl und Gas geringfügige Auswirkungen auf die zugehörigen diffusen Emissionen. Die Veränderungen gegenüber dem Referenzszenario sind aber jeweils kleiner als 0,1 Mio. t CO₂e und somit marginal.

Tabelle 38: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

	1990	2016	2020	2025	2030	2035
Mio. t CO ₂ e						
CO₂-Emissionen						
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Koksproduktion (1.B.1.b)	1,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Gasförderung-, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	1,4	1,1	0,8	0,6	0,4	0,2
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
CO₂-Emissionen gesamt	4,1	2,4	2,1	1,8	1,5	1,2
CH₄-Emissionen						
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	25,5	2,4	0,2	0,2	0,1	0,1
Koksproduktion (1.B.1.b)	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
Gasförderung-, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	7,9	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CH₄-Emissionen gesamt	33,9	7,5	5,2	5,2	5,1	5,1
N₂O-Emissionen						
N₂O-Emissionen gesamt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen						
Diffuse Emissionen gesamt	38,0	10,0	7,3	7,0	6,6	6,2
<i>ggü. 2005</i>	131,1 %	-39,4 %	-55,6 %	-57,4 %	-59,8 %	-62,2 %
<i>ggü. 1990</i>	0,0 %	-73,8 %	-80,8 %	-81,6 %	-82,6 %	-83,6 %

Anmerkung: Emissionen, die in der Tabelle als 0,0 Mio. t CO₂e dargestellt sind existieren, sind aber kleiner als 0,05 Mio. t CO₂e.

Quelle: Darstellung Öko-Institut

Da die Unterschiede bei den diffusen Emissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 nur gering gegenüber dem Referenzszenario sind, wird auf eine graphische Darstellung verzichtet.

4.3.5.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Im Bereich der diffusen Emissionen gibt es im Klimaschutzprogramm 2030 keine direkten Maßnahmen. Die Unterschiede zwischen den beiden Szenarien beruhen daher auf indirekten Wirkungen von Maßnahmen in anderen Bereichen.

In den Jahren 2020 und 2025 ist die Wirkung der Maßnahmen auf die flüchtigen Emissionen vernachlässigbar. Im Jahr 2030 beträgt die Minderungswirkung in Summe etwa 0,1 Mio. t CO₂e und verdoppelt sich bis zum Jahr 2035 auf 0,2 Mio. t CO₂e.

4.3.5.3 Einordnung der Unsicherheiten

Die Wirkungen von Maßnahmen in anderen Bereichen auf die diffusen Emissionen sind recht klein. Bedeutender für die absolute Höhe der Emissionen der diffusen Emissionen sind die Modellierungsannahmen, insbesondere

- ▶ zur Weiterentwicklung der Erdgasinfrastruktur und
- ▶ zur zukünftigen Erdöl- und Erdgasförderung.

4.3.6 Vergleich der Szenarien

Die Bedeutung und zeitliche Entwicklung der drei Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas aus diffusen Quellen ist sehr unterschiedlich. Bis 2016 sind die diffusen Kohlendioxidemissionen aus Brennstoffen bereits um 41 % gegenüber 1990 gesunken und werden sich bis 2030 noch einmal um ein gutes Drittel reduzieren und dann im Referenzszenario 61 % niedriger als 1990 liegen. Im Szenario KSP_r (Jan 2020) ist der Emissionsrückgang etwas stärker und liegt 2030 bei -64 % gegenüber 1990. Die diffusen Methanemissionen sind bis 2016 bereits um 78 % gegenüber 1990 gesunken und werden bis 2030 in beiden Szenarien weiter auf -85 % sinken. Dennoch verbleibt Methan das in der Treibhauswirkung dominierende Gas bei den diffusen Emissionen der Energiewirtschaft. Die diffusen Lachgasemissionen (diese entstehen bei der Öl- und Erdgasförderung) waren nahezu irrelevant und werden dies auch weiter bleiben.

4.4 Gesamtergebnisse Energiewirtschaft

Im Folgenden werden die Resultate für den Sektor Energiewirtschaft zusammengefasst. Sowohl für das Referenzszenario als auch für das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 wird die zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen dargestellt.

4.4.1 Referenzszenario

Bezogen auf die Treibhausgasemissionen stellt im Sektor Energiewirtschaft die öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung die größte Quellkategorie dar (Tabelle 39). Zwischen 2016 und 2030 nehmen die Treibhausgasemissionen im Referenzszenario um 21 % und bis 2035 um 23 % ab. Wesentliche Treiber ist hierbei die deutliche Zunahme der erneuerbaren Energien durch die Förderung im Rahmen des EEG, vor allem On- und Offshore-Windkraft und Photovoltaik (Tabelle 21). Weitere Treiber sind die Förderung der KWK sowie die CO₂-Bepreisung durch den europäischen Emissionshandel. Neben den öffentlichen (Heiz-)Kraftwerken stellen auch die öffentlichen Heizwerke eine bedeutende Emissionsquelle dar. Dort ändern sich die Emissionen aber nur wenig; zusätzlicher Energiebedarf wird zum größten Teil durch Erdgas gedeckt.

In den restlichen Kategorien im Sektor Energiewirtschaft haben sich die Energieverbräuche in der Vergangenheit sehr unterschiedlich entwickelt. Bedingt durch einen Rückgang des Mineralölverbrauchs insgesamt, sinkt die Aktivität der Raffinerien und somit zeigt sich ein Rückgang der in Raffinerieunterfeuerungen eingesetzten fossilen Brennstoffe und der damit verbundenen Emissionen. Im Bereich der Kokereien und sonstigen Kohleumwandlung sinken die Energieverbräuche bedingt durch eine sinkende Nachfrage nach Koks (in der Stahlherstellung) und Briquettes. Die Emissionen der Erdgasverdichterstationen bleiben zwischen 2016 und 2035 auf ähnlichem Niveau.

Diffuse Emissionen entstehen in erster Linie im Kohlebergbau, diese nahmen im Zeitraum ab 1990 stark ab. Aufgrund der kompletten Rückführung des deutschen Steinkohlenbergbaus bis zum Ende des Jahres 2018 werden die Emissionen weiter sinken. Braunkohlentagebaue hingegen weisen nur sehr geringe diffuse Emissionen auf.

Insgesamt sinken in der Referenzentwicklung zwischen 1990 und 2030 die Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft um 42 % auf 269,0 Mio. t CO₂e.

Tabelle 39: Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft im Referenzszenario (REF), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
Mio. t CO ₂ e								
Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	341,0	336,1	319,3	302,9	264,4	271,7	238,1	233,9
Mineralölraffinerien	20,3	22,5	20,8	19,9	19,5	17,9	16,4	14,9
Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger	66,0	20,8	16,8	9,4	8,3	7,3	6,7	6,2
Erdgasverdichterstationen	1,1	1,5	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1
Diffuse Emissionen	38,0	16,4	11,3	10,0	7,3	7,0	6,7	6,4
Gesamt	466,4	397,4	369,4	343,4	300,7	305,2	269,0	262,5
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz ⁶⁸					280		175	
Abweichung vom Sektorziel*					20,7		94,0	

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

4.4.2 Szenario Klimaschutzprogramm 2030

Bezogen auf die Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 kommt es im Vergleich zum Referenzszenario zu sehr weitreichenden Emissionsminderungen (Tabelle 40). Im Bereich der öffentlichen Elektrizitäts- und Wärmeversorgung liegen die Treibhausgasemissionen mit 157,7 Mio. t CO₂e im Jahr 2030 rund 34 % unter dem Wert des Referenzszenarios (238,1 Mio. t CO₂e). Wesentliche Treiber sind hierbei der Kohleausstieg sowie die deutliche Zunahme der erneuerbaren Energien, vor allem On- und Offshore-Windkraft und Photovoltaik (Tabelle 27).

⁶⁸ Für das Jahr 2025 wurde im Bundes-Klimaschutzgesetz keine zulässige Jahresemissionsmenge für die Energiewirtschaft festgelegt.

Insgesamt sinken zwischen 1990 und 2030 die Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft um 60 % auf 186,1 Mio. t CO₂e, womit das im Bundes-Klimaschutzgesetz vorgesehene Sektorziel (175 Mio. t CO₂e im Jahr 2030) um 11 Mio. t CO₂e verfehlt wird.

Es ist darauf hinzuweisen, dass ein Verfehlen des Zielkorridors für den Ausbau der Windenergie an Land durch die im Klimaschutzprogramm 2030 vorgesehene Abstandsregelung zu Mehrmissionen von 5 bis 21 Mio. t CO₂e führen könnte (siehe Abschnitt 4.1.6.1 und Anhang A.1) ⁶⁹.

Tabelle 40: Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	341,0	336,1	319,3	302,9	263,6	208,8	157,7	107,3
Mineralö Raffinerien	20,3	22,5	20,8	19,9	19,5	17,1	14,6	12,2
Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger	66,0	20,8	16,8	9,4	8,0	6,9	6,0	5,3
Erdgasverdichterstationen	1,1	1,5	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1
Diffuse Emissionen	38,0	16,4	11,3	10,0	7,3	7,0	6,6	6,2
Gesamt	466,4	397,4	369,4	343,4	299,5	241,0	186,1	132,1
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz ⁷⁰					280		175	
Abweichung vom Sektorziel*					19,5	14,7	11,1	

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

4.4.3 Vergleich der Szenarien

Tabelle 41 zeigt einen Vergleich der CO₂-, CH₄-, N₂O- und THG-Emissionen der Energiewirtschaft zwischen dem Referenzszenario und den Szenario Klimaschutzprogramm 2030.

Die CO₂-Emissionen nehmen den Hauptteil der gesamten THG-Emissionen ein, da sie sich direkt aus dem Kohlenstoffanteil des Brennstoffs (v.a. Kohle, Erdgas) bei der Verbrennung ergeben. Die CO₂-Emissionen machen im Jahr 2030 in beiden Szenarien 96 % der gesamten THG-Emissionen der Energiewirtschaft aus. Die Gase CH₄ und N₂O, die sich vor allem aus technologiebedingten Verbrennungsbedingungen ergeben, machen nur einen kleinen Teil der Gesamtemissionen aus.

Die gesamten THG-Emissionen sinken im Referenzszenario von 466,4 Mio. t CO₂e im Jahr 1990 auf 269,0 Mio. t CO₂e im Jahr 2030 und damit um 42,3 %. Die Minderung gegenüber 2005 beläuft sich auf 32,3 %. Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sinken die Emissionen bis 2030 auf 186,1 Mio.t CO₂e und damit um 60,1 % gegenüber 1990 bzw. 53,2 % gegenüber 2005.

⁶⁹ Eine Berücksichtigung des zwischen den Regierungsfractionen im Mai 2020 gefundenen Kompromisses zur Umsetzung der Abstandsregelung nach Klimaschutzprogramm 2030 konnte im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen.

⁷⁰ Für das Jahr 2025 wurde im Bundes-Klimaschutzgesetz keine zulässige Jahresemissionsmenge für die Energiewirtschaft festgelegt.

Tabelle 41: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Sektor Energiewirtschaft zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
CO₂-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	429,1	380,6	356,4	330,2				
REF					290,0	294,6	258,6	252,4
KSP _r (Jan 2020)					289,5	232,0	178,2	125,5
CH₄-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	34,2	14,1	10,3	10,6				
REF					8,3	8,3	8,2	8,1
KSP _r (Jan 2020)					7,6	7,0	6,4	5,3
N₂O-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	3,2	2,7	2,8	2,6				
REF					2,4	2,4	2,1	2,1
KSP _r (Jan 2020)					2,4	2,0	1,5	1,2
Summe CO₂+CH₄+N₂O								
Entwicklung 1990 – 2016	466,4	397,4	369,4	343,4				
REF					300,7	305,2	269,0	262,5
KSP _r (Jan 2020)					299,5	241,0	186,1	132,1
Summe CO₂+CH₄+N₂O	Veränderung ab 1990 in %							
Entwicklung 1990 – 2016		-14,8	-20,8	-26,4				
REF					-35,5	-34,6	-42,3	-43,7
KSP _r (Jan 2020)					-35,8	-48,3	-60,1	-71,7
Summe CO₂+CH₄+N₂O	Veränderung ab 2005 in %							
Entwicklung 2005 – 2016			-7,0	-13,6				
REF					-24,3	-23,2	-32,3	-33,9
KSP _r (Jan 2020)					-24,6	-39,3	-53,2	-66,8

Quelle: (UBA 2018b, 2018c), Modellrechnungen Öko-Institut

5 Projektionen Sektor Industrie

5.1 Energieverbrauch (ohne KWK)

5.1.1 Methodik

Für die Erstellung von Szenarien zur Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energiebedarf in den Sektoren Industrie, GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) sowie Haushaltsgeräte wird das Energienachfragemodell FORECAST⁷¹ eingesetzt. Die Bewertung von Einzelmaßnahmen erfolgt je nach Datenlage und Maßnahmenausgestaltung ebenfalls mit dem Modell FORECAST oder über eine Einzelbewertung anhand von Maßnahmenkennwerten.

Methodisch basiert das Modell FORECAST auf einem technologiespezifischen Bottom-up-Ansatz, welcher erlaubt, die zukünftige Entwicklung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen an die technologische Entwicklung in den Sektoren zu knüpfen. Dieser Ansatz ermöglicht zum einen, technologische Trends und ihre Auswirkungen auf die Dynamik des Energieverbrauchs zu berücksichtigen. Zum anderen erlaubt er Rückschlüsse auf die Realitätsnähe der Energieszenarien, indem jedem Szenario eine spezifische technologische Entwicklung zugrunde liegt.

Das Modell FORECAST ist entsprechend der Energiebilanzen auf der Ebene der Endenergie in die Sektoren Industrie, GHD und Haushalte unterteilt. Wenngleich die generelle Methodik der Modellierung in den jeweiligen Sektormodulen vergleichbar ist (bottom-up, Simulation), so unterscheidet sich der Aufbau der Sektormodule teils deutlich, abhängig von Datenverfügbarkeit und technologischer Struktur. Die einzelnen Module berücksichtigen somit die strukturellen Charakteristika der Sektoren.

Die Struktur der Sektormodule basiert für alle Sektoren auf einem vergleichbaren Vorgehen, welches in zwei generelle Schritte unterteilt werden kann.

- a) Zunächst werden die wesentlichen Bestimmungsfaktoren (Aktivitätsgrößen) festgelegt, deren Entwicklung eine möglichst direkte Korrelation mit dem Energieverbrauch aufweist (Anzahl Haushalte, industrielle Produktion, Anzahl Beschäftigte). Prognosen dieser Aktivitätsgrößen ermöglichen eine Projektion des Energieverbrauchs, die zunächst technologischen Wandel zu gesteigerter Energieeffizienz unberücksichtigt lässt (Frozen-Efficiency).
- b) In einem zweiten Schritt wird die Entwicklung der Technologiestruktur modelliert, welche sich auf die Energieintensität auswirkt. Jedes der drei Modelle berücksichtigt die Charakteristika von Technologiestruktur und Energieverbrauch des jeweiligen Sektors. Während für die Haushalte der Bestand an Geräten über Verschiebungen zwischen den Effizienzklassen explizit modelliert wird, wird der technische Wandel in der Industrie über die Diffusion von neuen und effizienteren Techniken oder Verfahren modelliert. Die Diffusionsgeschwindigkeit hängt direkt mit der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zusammen. Um jedoch auch die Tatsache zu berücksichtigen, dass aufgrund verschiedener Hemmnisse selbst wirtschaftliche Maßnahmen mit kurzer Amortisationszeit nur langsam Verbreitung finden, wird das Kriterium für die Wirtschaftlichkeit deutlich ambitionierter als für andere Investitionen angenommen (etwa 50 % der Maßnahmen mit 2-3 Jahren Amortisationszeit werden umgesetzt).

FORECAST-Industry ist hierarchisch aufgebaut und unterteilt die Industrie anhand der Energiebilanzen in einzelne Wirtschaftszweige bzw. Subsektoren. Diesen sind Prozessen zugeordnet,

⁷¹ Weitere Informationen siehe <http://www.forecast-model.eu>.

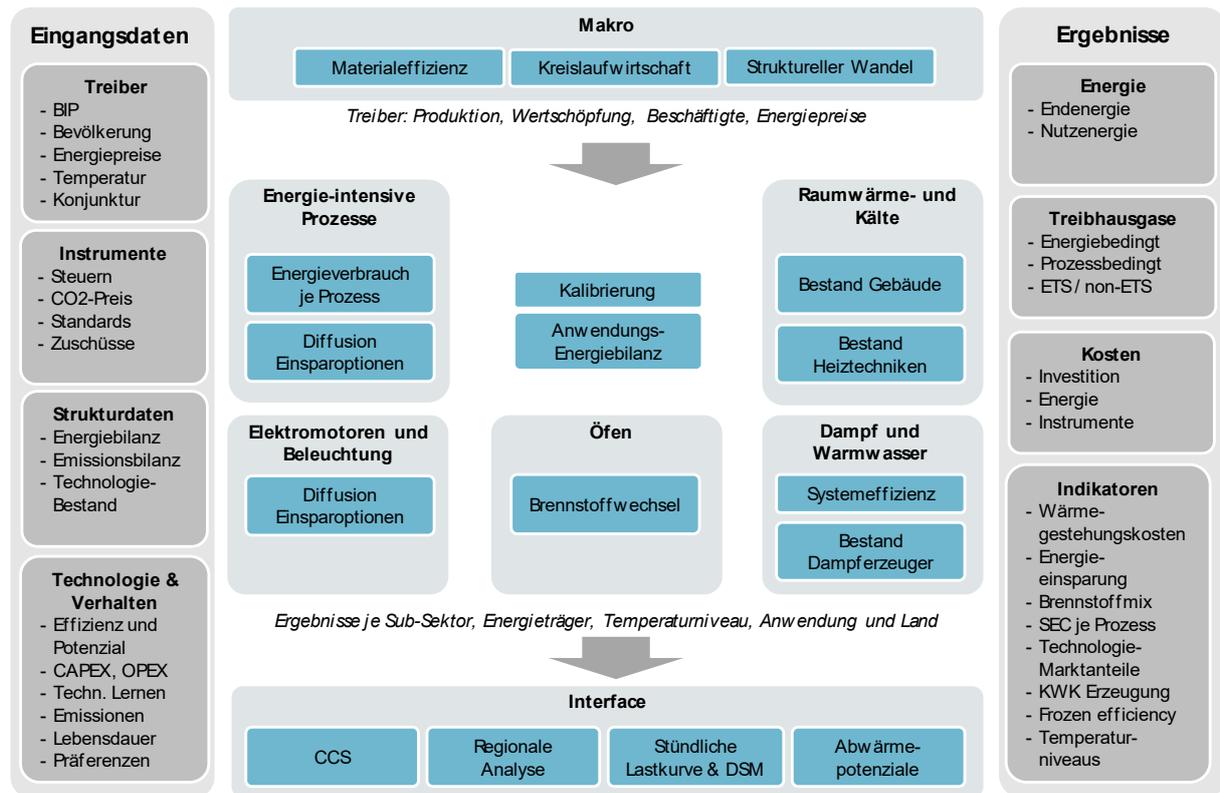
welche durch einen spezifischen Energieverbrauch und eine Aktivitätsgröße beschrieben werden.

Eine große Herausforderung bei der bottom-up-Modellierung der Industrie ist die große Vielfalt an unterschiedlichen Prozessen und Unternehmen, welche technologisch im Modell abgebildet werden müssen. Entsprechend orientiert sich die Struktur des Modells zum einen an der Struktur des Industriesektors, wobei möglichst homogene Bereiche (z.B. Raumwärme) zusammengefasst werden, und zum anderen an der Datenverfügbarkeit. Bezüglich der Technologiestruktur können die Technologiefelder/Module energieintensive Prozesse, Elektromotorsysteme (und Beleuchtung), Raumwärme, Industrieöfen (Brennstoffwechsel) sowie Warmwasser- und Dampferzeugung und Verteilung unterschieden werden (siehe auch Abbildung 19 zur grundlegenden Struktur des Modells):

Energieintensive Prozesse bilden die Struktur der energieintensiven Subsektoren auf Prozessebene ab – als Beispiel kann der Hochofenprozess bei der Stahlherstellung genannt werden. In diesem Modul wird die Diffusion von Effizienztechniken basierend auf ihrer Amortisationsdauer simuliert. Annahmen und Methodik sind ausführlich in (Fleiter et al. 2012; Fleiter et al. 2013) zusammengefasst.

- a) *Elektromotorsysteme und Beleuchtung* finden in sämtlichen Branchen und verschiedenen Prozessen Anwendung: Elektromotoren werden zum Beispiel sowohl in der Papierherstellung als auch in der Stahlherstellung eingesetzt. Beiden Technologiegruppen sind Einsparmaßnahmen zur Effizienzverbesserung zugeordnet, in der Regel in der Form neuer Technologien oder organisatorischer Maßnahmen.
- b) Der *Raumwärmebedarf* wird über Flächenkennwerte je Subsektor berechnet. Dies beruht auf einem Bestandsmodell, in dem die Gebäude- und Anlagenumwälzung anhand der Altersstruktur modelliert wird. Es werden die Bereiche Gebäudehülle und Heizungssystem unterschieden. Eine detaillierte Modellbeschreibung findet sich in Biere (2015).
- c) Der Wärmebedarf in *Industrieöfen* liegt vorwiegend im Temperaturniveau über 500°C vor und beruht auf den Berechnungen des Moduls *Energieintensive Prozesse*. In diesem Modul wird der Brennstoffwechsel je Subsektor simuliert, wobei Parameter wie die Energiepreise, der CO₂-Preis sowie die historischen Trends berücksichtigt werden (Rehfeldt et al. 2018).
- d) *Warmwasser- und Dampferzeugung und -verteilung* werden in einer Vielzahl von Prozessen vor allem in der chemischen Industrie, dem Papier- und dem Nahrungsmittelgewerbe benötigt. Aufgrund der Ähnlichkeit der technischen Systeme wird die Dampferzeugung in FORECAST im Sinne einer Querschnittstechnik modelliert. Dabei wird sowohl ein Effizienzfortschritt bei den häufig schlecht gedämmten Dampfsystemen wie auch eine Bestandsmodellierung der Dampferzeuger berücksichtigt. Der technische Wandel wird anhand von alternativen Wärmeerzeugern abgebildet, deren Einsatz mittels „discrete choice“-Methode simuliert wird. Eine umfassende Beschreibung des Moduls findet sich in Biere (2015).

Abbildung 19: Überblick des Modells FORECAST-Industry



Quelle: Darstellung Fraunhofer ISI

Die Branchenstruktur des Industriemodells (Tabelle 42) orientiert sich an der Einteilung der Energiebilanzen. Nach Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2008) umfasst sie die beiden Sektoren „Verarbeitendes Gewerbe“ (WZ 2008 Nr. „C“) und Teile des Sektors „Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden“ (WZ 2008 „B“), die nicht der Energiegewinnung dienen.

Tabelle 42: Branchenstruktur von FORECAST-Industry (angelehnt an AGEb)

Wirtschaftsbereiche Industrie	WZ 2008
Gew. v. Steinen und Erden, sonst. Bergbau	8
Ernährung und Tabak	10, 11, 12
Papiergewerbe	17
Grundstoffchemie	20.1
Sonstige chemische Industrie	20 und 21 ohne 20.1
Gummi- u. Kunststoffwaren	22
Glas u. Keramik	23.1, 23.2, 23.31, 23.4
Verarbeitung v. Steine u. Erden	23 ohne 23.1, 23.2, 23.31 und 23.4
Metallerzeugung	24.1
NE-Metalle, -gießereien	24.4 und 24.5
Metallbearbeitung	24.2, 24.3 und 25

Wirtschaftsbereiche Industrie	WZ 2008
Maschinenbau	28 ohne 28.23
Fahrzeugbau	29, 30
Sonstiges Verarbeitendes Gewerbe	übrige Nummern außer 5.1, 5.2, 6, 9, 19.1 und 19.2

Quelle: Fraunhofer ISI

Für eine weitergehende Modellbeschreibung wird an Fleiter et al. (2018) verwiesen.

Die Wirkung von politischen Maßnahmen kann entsprechend über eine vergleichende Analyse alternativer Modellläufe berechnet werden, in denen ausgewählte Parameter, wie z.B. die Energiepreise oder Technologiekosten entsprechend der Maßnahmen variiert werden. Wenngleich dieser Ansatz für bestimmte Maßnahmentypen sehr gut geeignet ist (z.B. CO₂-Preise, Steuern, Mindeststandards), so kann er bei anderen Maßnahmen (z.B. Energieberatung oder Energiemanagement) nicht belastbar genutzt werden, da die adressierten Wirkmechanismen nicht im Modell abgebildet sind. Für diese Maßnahmen wird eine Einzelmaßnahmenbewertung durchgeführt, die sich nach Möglichkeit an vorhandenen Maßnahmenevaluationen orientiert.

In jedem Fall wird das Modell FORECAST genutzt, um Technologie- und Emissionspfade bis zum Jahr 2035 zu berechnen. Somit wird sichergestellt, dass die resultierende Technologieentwicklung einem möglichst realitätsnahen Rahmen folgt, selbst wenn viele Maßnahmen über Einzelbewertungen quantifiziert werden.

Tabelle 43 gibt an, für welche Maßnahmen die Einzelbewertung bzw. die Modellbewertung mit dem Modell FORECAST durchgeführt wurde. Weiterhin wird für Maßnahmen mit Einzelbewertung angegeben, welche Abzüge für Mitnahmeeffekte und Überschneidungen mit anderen Maßnahmen berücksichtigt wurden. Für Maßnahmen, die mit FORECAST bewertet wurden, werden entsprechende Effekte in den Modellrechnungen auch berücksichtigt, können jedoch nicht ausgewiesen werden. Mitnahmeeffekte berücksichtigen, dass z.B. Effizienzinvestitionen auch ohne Förderprogramm durchgeführt worden wären. Überschneidungen berücksichtigen die vielen (häufig gewollten) Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen. Dies ist z. B. der Fall, wenn Effizienzinvestitionen im Rahmen einer Energieberatung identifiziert wurden und dann in der Umsetzung von einem Förderprogramm profitieren. Diese Überschneidung stellt keine Doppelförderung dar, muss jedoch bei der Maßnahmenwirkung korrigiert werden (die Einsparwirkung der Effizienzinvestition wird jeder Maßnahme nur zur Hälfte zugerechnet). Die angegebenen Prozentwerte für Überschneidungen und Mitnahmeeffekte reduzieren entsprechend der Bruttowirkung der Maßnahmen. Die Herleitung der Annahmen zu Mitnahmeeffekten und Überschneidungen wird in den Abschnitten zu den einzelnen Maßnahmen diskutiert. Unsicherheiten bei Überschneidungen und Mitnahmeeffekten sind noch sehr hoch und die empirische Datenlage ist sehr lückenhaft. Es steht jedoch außer Frage, dass die Bedeutung von entsprechenden Überschneidungseffekten bei der Bewertung des gesamten Policy Mixes aufgrund der steigenden Anzahl an Maßnahmen immer stärker wird. Ein einfaches Aufsummieren der Einzelwirkung der Maßnahmen würde das Gesamtpotenzial deutlich überschätzen.

Tabelle 43: Übersicht der Maßnahmen in den Sektoren Industrie und GHD: Methodik und Annahmen zu Überschneidungen und Mitnahmeeffekten

Szenario	Maßnahme	Methode	Überschneidung	Mitnahmeeffekte
REF	Emissionshandel	FORECAST	n.V.	n.V.
REF	Ökologische Steuerreform	FORECAST	n.V.	n.V.
REF	Spitzenausgleich	Einzelbewertung	20-39 %	10 %
REF	EEG-Umlage	FORECAST	n.V.	n.V.
REF	Besondere Ausgleichsregelung (BesAR)	Einzelbewertung	45 %	10 %
REF	Energieberatung Mittelstand	Einzelbewertung	20 %	n.V.
REF	Mindeststandards I	FORECAST	n.V.	n.V.
REF	Förderung Querschnittstechniken	Einzelbewertung	30 %	25 %
REF	Förderung von Kälte und Klimaanlage im Gewerbe	Einzelbewertung	15%	20%
REF	500 Effizienznetzwerke	Einzelbewertung	30 %	0 %
REF	Wettbewerbliche Ausschreibung (STEP up! Strom)	Einzelbewertung	20 %	15 %
REF	Energieaudit Nicht-KMU	Einzelbewertung	30 %	10 %
REF	Richtlinie Abwärmevermeidung und -nutzung	Einzelbewertung	15 %	15 %
REF	KfW-Energieeffizienzprogramm	Einzelbewertung	30 %	30 %
REF	NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen	Einzelbewertung	0 %	n.v.
KSPr (Jan 2020)	Investitionsprogramm – Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft	FORECAST (+ Einzelbewertung)	n.v.	n.v.
KSPr (Jan 2020)	Wettbewerbliche Ausschreibungen für Energieeffizienz: Förderprogramm	FORECAST (+ Einzelbewertung)	n.v.	n.v.
KSPr (Jan 2020)	Ressourceneffizienz und -substitution	FORECAST	n.v.	n.v.

Szenario	Maßnahme	Methode	Überschneidung	Mitnahmeeffekte
KSPr (Jan 2020)	Neue Konstruktionstechniken und Werkstoffe für eine emissionsarme Industrie	FORECAST	n.v.	n.v.
KSPr (Jan 2020)	Beschleunigte Umsetzung von Maßnahmen aus dem Energieaudit und den Energiemanagementsystemen (EMS) und wirksame Fortschreibung des Spitzenausgleichs	FORECAST	n.v.	n.v.
KSPr (Jan 2020)	EU-Ökodesign-Richtlinie – Ausweitung von Mindeststandards	FORECAST	n.v.	n.v.
KSPr (Jan 2020)	EU-ETS Innovationsfonds: Weiterentwicklung des NER300-Programms	FORECAST (+ Einzelbewertung)	n.v.	n.v.
KSPr (Jan 2020)	Nationales Dekarbonisierungsprogramm	FORECAST (+ Einzelbewertung)	n.v.	n.v.
KSPr (Jan 2020)	Programm CO ₂ -Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien	FORECAST (+ Einzelbewertung)	n.v.	n.v.
KSPr (Jan 2020)	CO ₂ -Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr	FORECAST	n.v.	n.v.

Quelle: Fraunhofer ISI

5.1.2 Rahmendaten

Die Kombination von Bruttowertschöpfung und Produktionsmengen vermittelt einen guten Überblick über die als Grundlage angenommene gesamtwirtschaftliche Entwicklung der Industrie. Der Fokus der Untersuchung und der Maßnahmen liegt dabei auf den energieintensiven Branchen, für welche die Produktionsentwicklung einzelner wichtiger Produkte ausführlicher beschrieben wird. Diese Entwicklung gilt für das Referenzszenario, bildet aber auch die Basis für die im Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) wirkenden Maßnahmen.

Die Entwicklung der Bruttowertschöpfung orientiert sich dabei an der hinterlegten BIP-Entwicklung und nimmt darüber hinaus einen strukturellen Wandel von der energieintensiven Grundstoffindustrie hin zu weniger energieintensiven Branchen wie dem Maschinen- oder Fahrzeugbau an. Letztere Branchen weisen also ein höheres jährliches Wachstum auf.

Tabelle 44: Entwicklung der Bruttowertschöpfung der Industrie je Wirtschaftszweig (Mrd. €₂₀₁₀)

Wirtschaftszweig der Industrie	2015	2020	2025	2030	2035
Gew. v. Steinen und Erden, sonst. Bergbau	1,4	1,1	0,9	0,7	0,6
Ernährung und Tabak	56,5	57,3	57,9	58,0	58,5
Papiergewerbe	9,5	9,6	9,7	9,6	9,7

Wirtschaftszweig der Industrie	2015	2020	2025	2030	2035
Grundstoffchemie	24,1	25,2	26,6	27,4	28,4
Sonstige chemische Industrie	29,2	30,9	32,8	34,3	35,8
Gummi- u. Kunststoffwaren	23,5	25,1	27,0	28,3	29,8
Glas u. Keramik	5,5	5,5	5,4	5,3	5,3
Verarbeitung v. Steine u. Erden	7,1	7,1	7,1	6,9	6,9
Metallerzeugung	6,9	6,7	6,7	6,7	6,7
NE-Metalle, -gießereien	9,4	9,2	9,2	9,1	9,1
Metallbearbeitung	42,1	43,9	45,8	46,9	48,4
Maschinenbau	71,9	79,0	87,0	93,9	101,2
Fahrzeugbau	103,6	111,7	119,9	126,4	133,5
Sonstiges Verarbeitendes Gewerbe	95,9	103,3	111,6	118,4	125,9
Industrie Summe	486,5	515,7	547,6	572,1	599,8

Quelle: (Statistisches Bundesamt 2015), eigene Fortschreibung

Eine entsprechende Entwicklung wird für die Produktionsmengen energieintensiver Branchen angenommen, wobei zusätzlich ein Trend zu höherwertigen Produkten unterstellt wird.

Dadurch entwickelt sich die mengenbezogene Produktion in einigen Branchen anders als die Bruttowertschöpfung (Tabelle 45). Insgesamt befindet sich die Produktion allerdings 2030 auf einem mit 2020 vergleichbarem Niveau.

In Tabelle 45 sind die Produktionsmengen ausgewählter industrieller Produkte von besonderer Bedeutung für die Energienachfrage dargestellt. Auch hier zeigt sich eine eher kontinuierliche Entwicklung. Bei einigen Produkten wird von einem leichten Rückgang bis 2035 ausgegangen, während andere einen leichten Anstieg zeigen.

Tabelle 45: Produktionsmengen ausgewählter Produkte

Branche	Produkt	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2035/ 2015
Eisen und Stahl	Walzstahl	38,1	36,6	35,7	34,6	34,3	34,7	95 %
NE-Metalle	Aluminium	1,0	1,2	1,3	1,3	1,2	1,3	108 %
	Kupfer	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	95 %
Papier	Papier	23,1	22,6	22,3	22,3	22,0	23,1	102 %
Nicht-Metallische Mineralien	Glas	6,9	7,4	7,5	7,5	7,4	7,3	98 %
	Zement	29,9	31,2	30,8	29,7	28,3	27,3	87 %
	Kalk	5,1	5,0	4,8	4,7	4,7	4,8	95 %
	Ziegel	12,3	13,5	12,8	12,4	11,8	11,4	84 %

Branche	Produkt	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2035/ 2015
Chemie	Adipinsäure	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	115 %
	Ammoniak	2,7	2,7	2,6	2,7	2,7	2,9	105 %
	Chlor	4,5	4,8	4,6	5,1	5,2	5,3	111 %
	Ethylen	5,1	5,1	5,0	5,2	5,2	5,3	104 %
	Salpetersäure	2,5	2,5	2,5	2,7	2,8	3,0	119 %
	Polycarbonat	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	104 %
	Polyethylen	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	104 %
	Polypropylen	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	104 %
Nahrungsmittel	Zucker	3,4	3,9	4,1	4,2	4,2	4,4	114 %
	Molkereiprodukte	17,5	17,8	19,0	19,3	19,4	18,6	104 %
	Bier	8,7	9,6	10,1	10,1	10,1	10,7	112 %
	Fleischprodukte	11,6	12,0	12,7	13,1	13,4	12,8	107 %
	Backwaren	5,5	5,8	6,1	6,3	6,3	6,1	105 %
	Stärke	17,1	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4	112 %

Quelle: Fraunhofer ISI

5.1.3 Annahmen und Parameter Referenzszenario

Für die detaillierte Beschreibung der in Abschnitt 5.1.4 genannten Instrumente im Referenzszenario sowie der verwendeten Annahmen und Parameter sei auf das MMS des Projektionsberichts 2019 verwiesen (Bundesregierung 2019d).

5.1.4 Ergebnisse Referenzszenario

Die im Sektor Industrie und GHD quantifizierten Maßnahmen sind in Tabelle 46 aufgelistet und beschrieben. Bis auf die Maßnahme „Förderung von Kälte- und Klimaanlage im Gewerbe“ adressieren alle Maßnahmen (u.a.) den Sektor Industrie.

Tabelle 46: Übersicht der Maßnahmen in den Sektoren Industrie und GHD im Referenzszenario (REF)

Maßnahme	Typ	Beschreibung/Ziele (Wirkungsbereich)	Umsetzungsstand (Wirkungsbeginn)
Emissionshandel	E	Handel mit Emissionszertifikaten (Cap and trade). Betrifft vorwiegend energieintensive Industrie.	Wirkung berechnet ab 2010
Ökologische Steuerreform	E	Steuer auf Strom und weitere Energieträger (viele Industrieprozesse sind ausgenommen bzw. erhalten Vergünstigungen)	Wirkung berechnet ab 2010
Spitzenausgleich	V	Vergünstigungen bei der Strom- und Energiesteuer sind geknüpft an Energiemanagementsysteme und Selbstverpflichtung der Industrie zum Effizienzfortschritt.	Wirkung berechnet ab 2010
Besondere Ausgleichsregelung (BesAR)	F	Vergünstigungen bei der EEG-Umlage durch die Einführung von Energiemanagementsystemen	In Kraft seit 2008
Energieberatung Mittelstand	F	Koppelung von bezuschusster Energieberatung mit zinsgünstigen Investitionskrediten für Maßnahmenumsetzung. Zielgruppe: KMU	In Kraft seit 2008
Mindeststandards	R	Mindeststandards für energieverbrauchende Produkte auf Basis der Durchführungsmaßnahme bzw. niedrigste Lebenszykluskosten	Umsetzung schrittweise 2010-2014
Förderung Querschnittstechniken	F	Finanzielle Förderung von Investitionen in Querschnittstechniken (Pumpen, Motoren, Abwärme, etc.)	In Kraft seit 2014
Förderung von Kälte und Klimaanlageanlagen im Gewerbe	F	Förderprogramm zur Finanzierung von Energieeffizienzmaßnahmen und Beratung im Bereich gewerbliche Kälte	Wirkung berechnet ab 2014
500 Effizienznetzwerke	F	Förderung und Aufbau von insgesamt 500 Effizienznetzwerken	ab 2014
Wettbewerbliche Ausschreibung (STEP up! Strom)	E	Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen durch offene Ausschreibungen	Wirkung berechnet ab 2017

Maßnahme	Typ	Beschreibung/Ziele (Wirkungsbereich)	Umsetzungsstand (Wirkungsbeginn)
Energieaudit Nicht-KMU	R	Verpflichtende Energieaudits für Nicht-KMU (Umsetzung Artikel 8 Energieeffizienzrichtlinie)	In Kraft seit 2015
Richtlinie Abwärmevermeidung und -nutzung	F	Finanzielle Förderung von Investitionen in Abwärmevermeidung und -nutzung	Wirkung berechnet ab 2016
KfW-Energieeffizienzprogramm	F	Zinsgünstige Darlehen für die Investition in Energieeffizienzmaßnahmen	Wirkung berechnet ab 2012
NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen	F	Zuschüsse für investive Maßnahmen in Kommunen im Rahmen der Kommunalrichtlinie der Nationalen Klimaschutzinitiative	Wirkung berechnet ab 2012

Quelle: Fraunhofer ISI

Die Wirkung der einzelnen Maßnahmen ist in den folgenden Tabellen getrennt nach Strom- und Brennstoffeinsparungen sowie die aus dem reduzierten Brennstoffverbrauch resultierende Vermeidung von direkten CO₂-Emissionen ausgewiesen. Die ausgewiesene Maßnahmenwirkung ist bereits um mögliche Mitnahmeeffekte und Überschneidungen zwischen Instrumenten reduziert und zeigt die Nettowirkung (siehe Tabelle 43).

Die Stromeinsparungen im Referenzszenario (Tabelle 47) teilen sich auf insgesamt 13 einzelne Maßnahmen auf. Durch den Emissionshandel verursachte Stromeinsparungen können nicht ausgewiesen werden, da in der Modellierung indirekte Effekte über einen erhöhten Strompreis und durchgereichte EUA-Preise nicht berücksichtigt wurden. Besonders hohe Einsparungen verzeichnen die Einführung von Energiemanagementsystemen im Rahmen des Spitzenausgleichs und der Besonderen Ausgleichsregelung des EEG (BesAR). Bei Spitzenausgleich wie auch BesAR wurde für die Berechnung davon ausgegangen, dass die eingeführten Energiemanagementsysteme konsequent umgesetzt werden. Empirische Untersuchungen zur Wirkung beider Instrumente sind derzeit noch nicht verfügbar. Entsprechend ist die geschätzte Wirkung mit hohen Unsicherheiten verbunden. Die Höhe der Wirkung deutet dennoch auf ein großes Potenzial hin, welches die Instrumente bei konsequenter Umsetzung entfalten können. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Einsparungen durch den Spitzenausgleich nur möglich sind, da vorher Energiesteuern eingeführt wurden. Auch die EEG-Umlage führt bei den nicht-privilegierten Unternehmen zu deutlichen Stromeinsparungen bis 2035, indem Effizienzmaßnahmen aufgrund des höheren Strompreises wirtschaftlicher werden. Bei vielen Maßnahmen zeigt sich über den Zeitverlauf ein ansteigender Trend, obwohl die Intensität der Maßnahmen nach 2020 häufig nicht weiter zunimmt (z.B. Ökologische Steuerreform, Spitzenausgleich). Dies ist darauf zurückzuführen, dass von den Instrumenten in jedem Jahr zusätzliche Investitionen angestoßen werden, welche in ihrer jährlichen Wirkung kumulieren.

Auch Maßnahmen wie die Energieeffizienznetzwerke und die Energieaudits in KMUs zeigen bis 2035 eine deutliche Einsparwirkung.

Die Wirkung der Mindeststandards im Rahmen der EU-Ökodesign-Richtlinie ist deutlich geringer als in den Sektoren Haushalte oder GHD, was darauf zurückzuführen ist, dass bisher nur wenige Verordnungen für den Industriesektor in Kraft getreten sind und der Geräte- / Komponentenaustausch im Industriesektor eher geringe Einsparpotenziale aufweist. Eine stärkere Ausschöpfung der Einsparpotenziale in der Industrie könnte vor allem durch eine Systemoptimierung erreicht werden, die mit der Ökodesign-Richtlinie nicht adressiert wird.

Tabelle 47: Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im Referenzszenario (REF) - Stromeinsparungen

Maßnahme	Strom-Einsparungen				
	2015	2020	2025	2030	2035
	TWh				
Emissionshandel	Nicht modelliert*				
Ökologische Steuerreform	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
Spitzenausgleich	2,7	4,7	6,0	7,0	8,0
EEG-Umlage	-	3,3	5,9	6,5	5,8
Besondere Ausgleichsregelung (BesAR)	1,3	2,8	3,7	4,5	5,2
Energieberatung Mittelstand	0,9	1,2	0,7	0,7	0,7
Mindeststandards I	3,2	4,5	4,9	4,3	3,8
Förderung Querschnittstechniken	0,1	0,4	0,7	0,8	0,8
500 Effizienznetzwerke	0,2	0,8	2,1	3,3	3,8
Wettbewerbliche Ausschreibung (Step Up)	-	0,1	0,3	0,4	0,4
Pilotprogramm Einsparzähler	-	0,0	0,1	0,1	0,1
Energieaudit Nicht-KMU	0,2	1,4	2,5	2,7	2,7
Richtlinie Abwärmevermeidung und -nutzung	-	0,5	1,2	1,4	0,9
KfW-Effizienzprogramm	0,2	0,8	1,4	1,8	1,8
Summe	8,9	21,0	30,3	34,6	35,6

* Für den Emissionshandel wurde die Wirkung, die der EUA-Preis über einen höheren Strompreis auf die Stromnachfrage hat, nicht berücksichtigt. Entsprechend können mögliche Stromeinsparungen durch den EU-Emissionshandel nicht bewertet werden.

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Bei den Brennstoffeinsparungen zeigt sich ein heterogenes Bild (siehe Tabelle 48). Hier entfällt ein Großteil der Wirkung auf die Maßnahmen Emissionshandel, Spitzenausgleich, Effizienznetzwerke, Energieaudit Nicht-KMU, die Richtlinie zur Abwärmevermeidung und -nutzung und das KfW-Effizienzprogramm. Bei den anderen Maßnahmen steht der Strombedarf im Mittelpunkt.

Beim Emissionshandel ist die im Verhältnis zu den Brennstoffeinsparungen sehr hohe CO₂-Vermeidung auffällig. Diese ist zum Großteil nicht auf Energieeffizienz, sondern auf Brennstoffwechsel hin zu weniger CO₂-intensiven Energieträgern zurückzuführen.

Tabelle 48: Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im Referenzszenario (REF) – Einsparungen von Brennstoffen und CO₂-Emissionen

Maßnahme	Brennstoff-Einsparungen					Vermeidung von CO ₂ -Emissionen				
	2015	2020	2025	2030	2035	2015	2020	2025	2030	2035
	PJ/a					Mio. t CO ₂ e/a				
Emissionshandel	0,8	1,8	7,1	13,7	19,6	-	0,6	1,7	3,0	4,6
Ökologische Steuerreform	-	1,5	2,0	2,7	3,1	-	0,2	0,2	0,2	0,2
Spitzenausgleich	6,2	11,4	14,6	17,3	19,9	0,7	1,4	1,5	1,4	1,3
EEG-Umlage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Besondere Ausgleichsregelung (BesAR)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Energieberatung Mittelstand	10,3	13,4	8,1	7,6	7,6	1,2	1,6	0,8	0,6	0,5
Mindeststandards I	0,1	0,8	1,1	1,1	0,6	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
Förderung Querschnittstechniken	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Förderung von Kälte und Klimaanlageanlagen im Gewerbe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500 Effizienznetzwerke	1,7	8,5	23,0	36,1	41,3	0,2	1,0	2,3	3,0	2,6
Wettbewerbliche Ausschreibung (Step Up)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pilotprogramm Einsparzähler	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Energieaudit Nicht-KMU	1,7	10,0	18,3	19,9	19,9	0,2	1,2	1,8	1,6	1,3
Richtlinie Abwärmevermeidung und -nutzung	-	16,4	38,4	43,9	28,1	-	2,0	3,8	3,6	1,8
KfW-Effizienzprogramm	2,8	9,8	17,8	22,0	22,6	0,3	1,2	1,8	1,8	1,4
NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Summe	23,7	73,7	130,7	164,7	163,1	2,7	9,2	14,1	15,4	13,8

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Tabelle 49 zeigt die Emissionsentwicklungen für CO₂, CH₄ und N₂O im Sektor Industrie (ohne Industriekraftwerke, aber einschließlich bauwirtschaftlichen Verkehrs⁷²) im Referenzszenario von 1990 bis 2035 sowie die seit 1990 bzw. 2005 erzielten Minderungen im Überblick. Bis zum Jahr 2035 sinken die Emissionen im Referenzszenario auf ca. 57 Mio. t CO₂e. Dies entspricht einer Reduktion von etwa 51 % gegenüber 1990 im Referenzszenario. Es ist zu beachten, dass ein Großteil des Rückgangs seit 1990 bereits in den 90er Jahren stattgefunden hat. Demnach war bereits im Jahr 2005 eine Minderung von 37 % ggü. 1990 zu verzeichnen. Im Zeitraum 2005 bis 2016 sind die Emissionen relativ konstant geblieben. Gegenüber dem Jahr 2005 sinken die Emissionen im Referenzszenario bis 2035 um 22 %. Somit spiegelt das Referenzszenario eine deutlich ambitionierte Entwicklung wider, als in den vergangenen 10 Jahren zu beobachten war. Haupttreiber für die Entwicklung der Industrieemissionen sind die industrielle Produktion und der Wechsel auf recyclingbasierte Produktionsrouten sowie der Wechsel auf andere Energieträger und der Einsatz energieeffizienter Technologien. Die Produktionsentwicklung ist für die meisten Grundstoffe bis 2035 relativ konstant. Ein Wechsel z.B. des Anteils an Elektrostahl von 42 % im Jahr 2015 auf 46 % im Jahr 2035 führt zur Reduktion der Emissionen in der Stahlindustrie. Über alle Branchen hinweg findet ein ambitionierter Fortschritt der Energieeffizienz statt, der die Emissionen aller Industriebranchen senkt. Brennstoffwechsel findet hauptsächlich von Öl oder Kohle zu weniger CO₂-intensivem Erdgas statt und wirkt sich auch leicht dämpfend auf die CO₂-Emissionen aus. Der Brennstoffwechsel hin zu Gas ist getrieben durch Trends der vergangenen Jahre und eine hohe Attraktivität dieses Energieträgers für Industrieunternehmen. Die angenommenen CO₂-Preise reichen noch nicht aus, um einen Brennstoffwechsel zu Biomasse wirtschaftlich attraktiv zu machen.

Betrachtet man die einzelnen Gase, ist zu erkennen, dass für diesen Bereich lediglich die CO₂-bedingten Emissionen relevant sind. Für eine Übersicht relevanter Emissionsmengen anderer Treibhausgase in der Industrie wird an die separaten Kapitel zu Industrieprozessen und Produktverwendung verwiesen (Kapitel 5.3 und 5.4). Die energiebedingten Emissionen aus Industrie-KWK-Anlagen sind in Kapitel 5.2 enthalten.

Tabelle 49: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Sektor Industrie (ohne Industriekraftwerke) zwischen 1990 und 2035 im Referenzszenario (REF)

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
CO₂-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	116,6	73,6	77,6	73,0				
Referenzszenario					69,7	65,1	60,4	57,0
CH₄-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	0,2	0,1	0,1	0,1				
Referenzszenario					0,1	0,1	0,1	0,1
N₂O-Emissionen								

⁷² Entsprechend CRF-Kategorien der 2006 IPCC Guidelines ist der bauwirtschaftliche Verkehr dem Sektor 1.A.2 Industrie (Englisch *manufacturing industries and construction*) zugeordnet.

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
Entwicklung 1990 – 2016	0,8	0,4	0,4	0,4				
Referenzszenario					0,4	0,4	0,4	0,3
Summe CO₂+CH₄+N₂O								
Entwicklung 1990 – 2016	117,6	74,1	78,2	73,5				
Referenzszenario					70,2	65,6	60,9	57,4
Summe CO₂+CH₄+N₂O	Veränderung ab 1990 in %							
Entwicklung 1990 – 2016		-37,0	-33,5	-37,5				
Referenzszenario					-40,3	-44,2	-48,2	-51,2
Summe CO₂+CH₄+N₂O	Veränderung ab 2005 in %							
Entwicklung 1990 – 2016			5,5	-0,7				
Referenzszenario					-5,2	-11,4	-17,8	-22,5

Quelle: (UBA 2018b, 2018c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Anmerkung: Nur energiebedingte Emissionen in der Abgrenzung des NIR, ohne Brennstoffeinsatz in den Industriekraftwerken des Verarbeitenden Gewerbes; mit bauwirtschaftlichem Verkehr

5.1.5 Annahmen und Parameter Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Für die Projektionen im Industriesektor werden die im Klimaschutzprogramm 2030 der Industrie zugeordneten Maßnahmen (3.4.4.1 - 3.4.4.9⁷³) sowie die übergreifende Maßnahme "CO₂-Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr" (3.2.1) mit Hilfe des Industriesektor-Modells FO-RECAST quantifiziert. Tabelle 50 zeigt alle quantifizierten Maßnahmen, ihre Zuordnung zu den jeweiligen Bündeln sowie eine kurze Beschreibung des Wirkungsbereichs.

Tabelle 50: Übersicht der Maßnahmen im Industriesektor im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) und ihre Zuordnung zur Maßnahmenbündeln

Bündel	Kapitel KSP	Maßnahme	Typ	Beschreibung/Ziele (Wirkungsbereich)	Wirkungsbeginn
1	3.4.4.1	Investitionsprogramm – Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft	F	Das Investitionsprogramm bündelt fünf bisher bestehende Förderprogramme und entwickelt sie weiter zu einem "one-stop-shop"	2021
1	3.4.4.2	Wettbewerbliche Ausschreibungen für Energieeffizienz: Förderprogramm	F	Die Maßnahme ist ein Förderprogramm, das sich dadurch auszeichnet, dass die Verteilung der Fördermittel wettbewerblich ermittelt wird. Basierend auf den Erfahrungen des Ausschreibungspiloten zur	2020

⁷³ Die Nummerierung erfolgt entsprechend der Darstellung im Klimaschutzprogramm 2030. Die Maßnahme 3.4.4.10 (Batteriezellenfertigung) ist nicht berücksichtigt, da sie nicht auf eine Minderung von Treibhausgasemissionen des Industriesektors abzielt.

Bündel	Kapitel KSP	Maßnahme	Typ	Beschreibung/Ziele (Wirkungsbereich)	Wirktungsbeginn
2	3.4.4.3	Ressourceneffizienz und -substitution	F	Stromeffizienz wird die wettbewerbliche Vergabe von Fördermitteln im Rahmen des Programms weitergeführt und auf den Bereich Wärme ausgeweitet. Ziel einer erhöhten Ressourceneffizienz und -substitution ist es, das Prinzip der Kreislauf- bzw. Stromstoffwirtschaft in Produktionsprozessen zu verankern und so bislang nicht ausgeschöpfte Emissionsminderungspotenziale zu erschließen.	2021
2	3.4.4.4	Neue Konstruktionstechniken und Werkstoffe für eine emissionsarme Industrie	F	Förderung des material- und branchenbezogenen Technologie- und Wissenstransfer unter Berücksichtigung geschlossener Kreisläufe mit einem Fokus auf Materialeffizienz.	2021
1	3.4.4.5	Beschleunigte Umsetzung von Maßnahmen aus dem Energieaudit und den Energiemanagementsystemen (EMS) und wirksame Fortschreibung des Spitzenausgleichs	R	Beschleunigte Umsetzung von empfohlenen Maßnahmen aus dem Energieaudit bzw. EMS im Rahmen einer Selbstverpflichtung der Industrie deren Ausgestaltung so effektiv sein sollte wie eine verpflichtende Maßnahme.	2023
1	3.4.4.6	EU-Ökodesign-Richtlinie – Ausweitung von Mindeststandards	R	Ausweitung von Mindeststandards für gewisse Produktgruppen, um das Effizienzniveau von Technologien zu regulieren.	2021
3	3.4.4.7	EU-ETS Innovationsfonds: Weiterentwicklung des NER300-Programms	D	Weiterentwicklung des bestehenden NER300 Programms der EU. Umbenennung in Innovationsfonds und Förderfähigkeit nun auch für innovative CO2-arme Herstellungsverfahren im Industriesektor	2021
3	3.4.4.8	Nationales Dekarbonisierungsprogramm	F	Förderung von Leuchtturm-Projekten im Bereich der energieintensiven Industrien, die zum Ziel haben, prozessbedingte Treibhausgasemissionen, die nach heutigem Stand der Technik nicht oder nur schwer vermeidbar sind, möglichst weitgehend und dauerhaft zu reduzieren.	2021
3	3.4.4.9	Programm CO2-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien	D	Förderung von innovativen Projekten zur CO2-Minderung in der Grundstoffindustrie mit Schwerpunkt CCS und CCU.	2021
4	3.2.1	CO2-Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr	E	CO2-Preis im Nicht-ETS Sektor	2021

Quelle: Fraunhofer ISI/ FORECAST Modell

Die Maßnahmen lassen sich anhand ihrer beabsichtigten Wirkung spezifischen Modellbereichen bzw. Vermeidungshebeln zuordnen. Dabei werden Maßnahmen, die sich auf zusammengehörige Modell- und Wirkungsbereiche beziehen, gebündelt berechnet und ausgewertet. Eine zentrale Größe für die Quantifizierung der Maßnahmenwirkung ist das angenommene zur Verfügung stehende Budget, da die meisten Maßnahmen als Förderprogramme umgesetzt sind. Tabelle 51 zeigt die angenommene Bündelung von Maßnahmen sowie das für den Zeitraum von 2020-2030 angenommene zur Verfügung stehende Budget. Die hinterlegten Förderbudgets der Maßnahmen orientieren sich am Wirtschaftsplan des Energie- und Klimaschutzfonds vom Oktober 2019 und wurden vor der Berechnung mit dem BMU abgestimmt. Es wurde grundsätzlich eine dynamische Modellierung der Maßnahmen unterstellt, d.h. davon ausgegangen, dass die Budgets auch über den aktuellen Haushaltsplan hinaus auf ähnlichem Niveau wie 2021 verbleiben.⁷⁴ Eine ausführliche Erläuterung zu den einzelnen hinterlegten Budgets der Maßnahmenbündel findet sich im Folgenden in den jeweiligen Abschnitten.

Tabelle 51: Bündelung von Maßnahmen für die Quantifizierung im Industriesektor

Vermeidungshebel im Modell bzw. Maßnahmenbündel	Maßnahme	Budget 2020-2030 (Mio. €)
Förderung der Energieeffizienz	Investitionsprogramm (3.4.4.1) Wettbewerbliche Ausschreibungen für Energieeffizienz (3.4.4.2) Beschleunigte Umsetzung von Maßnahmen (3.4.4.5) EU-Ökodesign-Richtlinie Ausweitung (3.4.4.6)	1.515
Förderung der Materialeffizienz	Ressourceneffizienz und -substitution (3.4.4.3) Neue Konstruktionstechniken und Werkstoffe (3.4.4.4)	540
Markteinführung CO ₂ -armer Herstellungsverfahren inkl. CCS und CCU	EU-ETS Innovationsfonds Nationales Dekarbonisierungsprogramm Programm CO ₂ -Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien	7.125
CO ₂ -Bepreisung	CO ₂ -Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr (3.2.1)	-

Quelle: Fraunhofer ISI

Aus dieser ersten Zuordnung ergibt sich die Implementierung der Maßnahmen in der Modellierung. Im Folgenden wird die Implementierung näher beschrieben.

Maßnahmenbündel 1: Förderung der Energieeffizienz

Bestehend aus folgenden Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030:

- ▶ 3.4.4.1: Investitionsprogramm - Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft
- ▶ 3.4.4.2: Wettbewerbliche Ausschreibungen für Energieeffizienz: Förderprogramm
- ▶ 3.4.4.5: Beschleunigte Umsetzung von Maßnahmen aus dem Energieaudit und den Energiemanagementsystemen (EMS)

⁷⁴ Teilweise sinken die Budgets der Verpflichtungsermächtigungen im Haushaltsplan nach 2021 sehr stark ab. Dies ist nicht als Obergrenze der Budgets angesetzt, da die Verpflichtungsermächtigungen für die Folgejahre eher als mindestens verfügbare Mittel anzusehen sind. Aus diesem Grunde wurde das starke Absinken nicht in die Bewertung der Maßnahmen aufgenommen.

► 3.4.4.6: EU-Ökodesign-Richtlinie - Ausweitung von Mindeststandards

Die in diesem Bündel enthaltenen Maßnahmen adressieren den Bereich der Energieeffizienz und zielen darauf ab, Hemmnisse bei der Identifizierung und Hebung von Energieeffizienzpotenzialen zu reduzieren. Dies wird durch die Bündelung existierender Förderprogramme und angepasster Förderbedingungen und Fördersätzen (Investitionsprogramm), die Erweiterung wettbewerblicher Ausschreibungen auf den Wärmebereich (Wettbewerbliche Ausschreibungen) sowie eine beschleunigte Umsetzung von im Rahmen eines Energieaudits oder Energiemanagementprogrammes empfohlenen Maßnahmen (Energieaudit / EMS) umgesetzt.

Die hinterlegten Förderbudgets der Maßnahmen orientieren sich am Wirtschaftsplan des Energie- und Klimaschutzfonds vom Oktober 2019 (BMF 2019), verfügbaren Informationen aus Beratungsprojekten und wurden vor der Berechnung mit dem BMU abgestimmt. Für die Maßnahmen dieses Bündels sind zwischen 2020 und 2030 in Summe 1.515 Mio. € Förderbudget angesetzt, sowie weitere 750 Mio. € bis 2035. Diese Gesamtsumme setzt sich wie folgt zusammen. Für das Investitionsprogramm ist ein jährliches Budget von 200 Mio. € angenommen, welches damit 50 Mio. € über dem Referenzszenario liegt. Für die Wettbewerbliche Ausschreibung wurde angenommen, dass die abgerufenen Mittel bei 20 Mio. € im Jahr 2019 beginnen und linear auf 100 Mio. € im Jahr 2024 steigen. Sie verbleiben bis 2030 auf diesem Niveau. Darüber hinaus wird wie bei allen modellierten Maßnahmen angenommen, dass die Mittel bis 2030 auf diesem Niveau bleiben. Zum Vergleich, der Wirtschaftsplan des Energie- und Klimaschutzfonds gibt für das Jahr 2021 die Summe von 300 Mio. € für den Bereich "Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe", schlüsselt diese jedoch nicht weiter auf einzelne Maßnahmen auf.

Für die Maßnahme "Beschleunigte Umsetzung von Maßnahmen aus dem Energieaudit und den Energiemanagementsystemen (EMS)" wurde kein Förderbudget hinterlegt, da diese Maßnahme über Ordnungsrecht die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen beschleunigt.

Im Modell wirken diese Maßnahmen durch eine bessere Wirtschaftlichkeit der einzelnen technischen Effizienzoptionen sowie das Überwinden von Hemmnissen, die der Realisierung wirtschaftlicher Effizienzmaßnahmen im Weg stehen. Die Wirkung wird dabei als Kombination berechnet und beinhaltet alle genannten Maßnahmen. So steigt der Anteil von realisierten Energieeffizienzmaßnahmen mit einer Amortisationszeit unter 3 Jahren von 50 % im Referenzszenario auf 85 % im Szenario KSPR (Jan 2020). Auch Energieeffizienzmaßnahmen mit längerer Amortisationszeit werden häufiger realisiert. Konkret hinzu kommt eine stärkere Förderung der Investitionen in auf Biomasse und Umgebungswärme/Strom basierender Prozess- und Raumwärmelerzeugung sowie eine stärkere Verbesserung der Energieeffizienz von gewerblichen Gebäuden.

Die Ausweitung von Mindeststandards im Rahmen der EU-Ökodesign-Richtlinie erhöht die Energieeffizienz der Industrie, indem besonders ineffiziente Anlagen aus dem Markt gedrängt werden. In FORECAST wird dies durch die Mindestdiffusion bestimmter Effizienzoptionen abgebildet, die die Effizienzsteigerung zwischen Bestand und Mindestanforderungen abbilden. Darüberhinausgehende Effizienzverbesserungen sind nicht ausgeschlossen. Beispielhaft davon betroffen sind Querschnittstechnologien wie Kompressoren (Los: ENER 31), Werkzeugmaschinen (Los: ENTR 5), aber auch und Industrieöfen, (Los ENTR 4). Für die Maßnahme Mindeststandards sind keine Haushaltsmittel angesetzt.

Maßnahmenbündel 2: Förderung der Materialeffizienz

Bestehend aus:

► 3.4.4.3: Ressourceneffizienz und -substitution

► 3.4.4.4: Neue Konstruktionstechniken und Werkstoffe für eine emissionsarme Industrie

Die in diesem Bündel enthaltenen Maßnahmen zielen auf die Verfügbarmachung von Wissen und Information sowie die Förderung konkreter Projekte im Bereich der Ressourcen- und Materialeffizienz ab. Dies beinhaltet Leichtbau, Kreislaufwirtschaft und neue Materialien. Ziel dieses Maßnahmenbündels ist die Reduktion des Ressourceneinsatzes insbesondere in der Grundstoffindustrie, ohne dadurch die bereitgestellte Dienstleistung zu verringern.

Im untersuchten Szenario wird davon ausgegangen, dass diese Maßnahmen in den energieintensiven Grundstoffindustrien wirken und die dort verzeichnete Aktivität im Vergleich zum Referenzszenario um 2 % senken. Die Reduktion beginnt im Jahr 2021 und erlangt bis 2035 ihre volle Wirkung. Dies erzeugt direkte Einsparungen bei Energieverbrauch und THG-Emissionen. Für die Implementierung im Modell FORECAST wird angenommen, dass die folgenden Bereiche adressiert sind und dort eine Verbesserung der Materialeffizienz erzielt wird:

- Stahlherstellung und -verarbeitung
- Papierherstellung
- Zementherstellung
- Flachglasherstellung
- Olefin- und Kunststoffherstellung

Zur Einordnung dieser Abschätzung ist darauf hinzuweisen, dass aufgrund noch fehlender Informationen zur konkreten Umsetzung dieser Maßnahmen und ihrer Wirkung für die Quantifizierung eine Annahme zur Wirkung der beiden Maßnahmen getroffen werden musste. Die Quantifizierung ist daher – und das gilt grundsätzlich für alle Maßnahmen –entsprechend als "Wenn-dann"-Bewertung zu sehen: "Wenn es gelingt, mit dieser Maßnahme effektive Materialeffizienzverbesserungen in relevanten Bereichen zu erzielen, dann sind die berechneten THG-Einsparungen realisierbar". D.h., wenn diese Maßnahme nicht in Richtung einer effektiven CO₂-Minderung implementiert wird, dann kann auch eine deutlich geringere Wirkung eintreten als hier angenommen.

Insgesamt sind für dieses Maßnahmenbündel zwischen 2020 und 2030 540 Mio. € angesetzt, sowie weitere 270 Mio. € bis 2035. Diese Summe beruht auf einer jährlichen Mittelvergabe von 54 Mio. € für beide Maßnahmen zusammen und entspricht damit der Summe, die im Wirtschaftsplan des Energie- und Klimaschutzfonds für die Maßnahmen für das Jahr 2021 ausgewiesen wird. Wie für alle Maßnahmen des Klimaschutzplans wurde auch hier davon ausgegangen, dass beide Maßnahmen bis 2035 auf dem Förderniveau von 2021 bleiben.

Maßnahmenbündel 3: Markteinführung CO₂-armer Verfahren

Bestehend aus:

- 3.4.4.7: EU-ETS-Innovationsfonds: Weiterentwicklung des NER300-Programms
- 3.4.4.8: Nationales Dekarbonisierungsprogramm
- 3.4.4.9: Programm CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien

Die in diesem Bündel enthaltenen Maßnahmen sollen die Forschung, Entwicklung und Markteinführung innovativer, CO₂-armer Produktionsprozesse auf industriellem Maßstab unterstützen.

Damit wird insbesondere die Grundstoffindustrie (u.a. Chemie, Eisen und Stahl, nicht-metallische Mineralien) angesprochen. Neben neuen Produktionsprozessen sind im EU-Innovationsfonds und im Programm zur CO₂-Vermeidung und -Nutzung auch neue Produkte sowie CCU und CCS förderfähig.

Das angenommene verfügbare Förderbudget aller drei Maßnahmen dieses Bündels beläuft sich für den Zeitraum zwischen 2020 und 2030 bis auf 7,125 Mrd. €. Im Einzelnen sind folgende Annahmen für die verfügbaren Förderbudgets der einzelnen Maßnahmen getroffen.

- ▶ Beim EU-ETS Innovationsfonds wird von insgesamt 11 Mrd. € Fördermittel ausgegangen. Auf Deutschland entfallen hiervon (anteilig anhand der Bevölkerung) 16 % (1,76 Mrd. €). Verteilt bis 2030 ergibt sich daraus ein jährliches Budget von 175 Mio. € (ab 2021). Entsprechend EUA-Preis und in Deutschland umgesetzten Projekten kann das Förderbudget natürlich abweichen.
- ▶ Für das Nationale Dekarbonisierungsprogramm wird ab 2023 von jährlich 500 Mio. € verfügbaren Mitteln ausgegangen. Bis 2030 wird ein stetiger Anstieg hinterlegt (2020: 80 Mio. €; 2021: 145; 2022: 300, 2023-2035: je 500). Die Gesamtfördersumme des Dekarbonisierungsprogramms bis 2030 ergibt sich so zu 4,525 Mrd. €. Diese Werte liegen in Abstimmung mit dem BMU etwas höher als im Wirtschaftsplan des Energie- und Klimaschutzfonds (Anstieg bis 2023 auf 300 Mio. €).
- ▶ Für das "Programm CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien" wird ab 2021 bis 2030 ein jährliches Budget von 0,084 Mrd. € angenommen. Diese Summe entspricht den Mitteln des Energie- und Klimaschutzfonds für die Jahre 2021 und 2022. Darüber hinaus wird die Annahme getroffen, dass zukünftig die gleichen jährlichen Mittel verfügbar sein werden.

Um Unsicherheiten in der Programmumsetzung sowie in der Investition, aber auch möglichen zusätzlichen Investitionsbedarf (Infrastruktur) oder scheiternde F&E Projekte zu berücksichtigen, wird das vorhandene Budget in der Modellierung lediglich zu 50 % ausgeschöpft.

Im Folgenden wird beschrieben, wie die mögliche Vermeidungswirkung des Maßnahmenbündels bei den oben gegebenen Förderbudgets berechnet wird. Im Hinblick auf die Einordnung der hier vorgenommenen Quantifizierung ist wiederum zu berücksichtigen, dass die genaue Ausgestaltung der Programme noch weitgehend offen ist und keine empirischen Daten zur Wirkung vergleichbarer Programme vorliegen. Entsprechend müssen – wie beim vorhergehenden Maßnahmenbündel – wieder Annahmen zur möglichen Wirkung getroffen werden. Dafür wird zunächst im Modell festgelegt, welche Verfahren vom Programm adressiert werden. In einem weiteren Schritt werden Annahmen dazu getroffen, in welchem Umfang Produktionskapazitäten umgestellt werden. Ausgewählt wurden Verfahren mit langfristig hohem THG-Minderungspotenzial. Der Umfang der umgestellten Produktionskapazität der neuen Anlagen wurde entsprechend des jährlich für das Maßnahmenbündel vorgesehenen verfügbaren Budgets und von Literaturwerten zu den erforderlichen Investitionen für die ausgewählten Verfahren geschätzt. Diese Annahmen wurden dann in das Modell FORECAST übertragen, um Auswirkungen auf Energieverbrauch und THG-Emissionen zu berechnen.

In FORECAST wird dieses Maßnahmenbündel durch die Einführung CO₂-armer Produktionsverfahren für Methanol (wasserstoffbasiert), Behälterglas (vollelektrisch) und direktreduziertes Ei-

sen (wasserstoffbasiert) realisiert. Eine wichtige Größe sind hierbei die angenommenen spezifischen Investitionen der Anlagen. Diese basieren auf Literaturwerten, sind allerdings noch sehr unsicher, da entsprechende Anlagen bisher nicht im industriellen Maßstab errichtet wurden. Tabelle 52 fasst die entsprechenden Annahmen zusammen. Die berücksichtigten Investitionen beinhalten bei Methanol und Eisenreduktion auch die Investitionen in die nötigen Elektrolysekapazitäten. Dargestellt und in der Berechnung hinterlegt sind immer die Vollkosten der neuen Anlagen. Eine Berechnung über Differenzkosten würde voraussetzen, dass anstatt der Investition in neue Verfahren ansonsten ggfs. eine Re-Investition in bestehende Verfahren oder zumindest eine Modernisierung stattgefunden hätte. Eine Berechnung über Differenzkosten würde zwar zu deutlich niedrigeren nötigen Fördersummen führen, für die Markteinführung scheint allerdings ein Ansatz über Vollkosten zunächst plausibler, da hier nicht unbedingt von einer Re-Investition ausgegangen werden kann.

Der Innovationsfonds ermöglicht grundsätzlich auch die Förderung von CCU- und CCS-Technologien mit Mitteln des EU-ETS. Das Programm zur CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien zielt sogar darauf ab, CCU- und CCS-Technologien in industriellen Produktionsverfahren einsetzbar zu machen. Im Rahmen des Einsatzes dieser Technologien sind zwar auch Maßnahmen zur direkten Emissionsvermeidung einbezogen, anders als bei den beiden anderen Maßnahmen im Bündel steht hier die Vermeidung allerdings deutlich im Hintergrund.

Für die Untersuchung der potenziellen Maßnahmenwirkung wird davon ausgegangen, dass erste CCS/CCU-Anlagen in der Kalk- und Klinkerherstellung bis 2030 im industriellen Maßstab technisch, politisch und gesellschaftlich möglich sind. Diese würden 2030 6 % (Klinker) und 3 % (Kalk) der Gesamtkapazität umfassen (bis 2035 11 % und 5 %). Diese Verbreitung ergibt sich aus den Annahmen zum hinterlegten Budget sowie den spezifischen Investitionen der Anlagen. Für die Investitionen wird von etwa 330 €/t Kapazität⁷⁵ (davon etwa 150€/t Kapazität Differenz zu konventionellen Technologien) ausgegangen. Die für die CCU-Anwendung notwendigen Senken (Verwender) von CO₂ wurden insofern berücksichtigt, dass ergänzend zu den emissionsmindernden Kapazitäten wasserstoffbasierter Methanolerzeugung (1. Zeile in Tabelle 52), weitere Kapazitäten in Höhe der für die CO₂-Verwendung notwendigen Produktionsmenge angenommen werden⁷⁶. Diese wirken nicht zusätzlich emissionsmindernd, da ihre Minderung der CO₂-Abscheidung (also der Zement- und Kalkherstellung) zugerechnet werden.

Allerdings bestehen zu laufenden Kosten sowie zu Transport des CO₂ und etwaiger CCU-Konzepte hohe Unsicherheiten. Dazu zählt insbesondere die Bereitstellung einer geeigneten Senke für die Nutzung aus der Klinker- und Kalkproduktion abgeschiedenen CO₂-Mengen. Obschon Kohlenstoff in einer dekarbonisierten Wirtschaft 2050 als wertvoller Rohstoff anzusehen ist, ist dies bis 2030 noch nicht der Fall. Wirtschaftliche Konzepte für den Betrieb von CCU stehen also zunächst weiterhin vor einem Entsorgungsproblem, dass ein wirtschaftlicher Nutzen aus der Vermarktung des abgeschiedenen CO₂ gezogen werden kann, wurde hier daher nicht angenommen. Mögliche zukünftige Senken innerhalb des Industriesektors umfassen die Grundstoffchemie, darin insbesondere eine mögliche methanolbasierte Ethylenherstellung sowie in geringerem Umfang die Stahlherstellung. Für die Übergangszeit kann auch die inländische Herstellung von PtG/PtL eine relevante Verwendung für das abgeschiedene CO₂ sein, solange es mit dem PtL noch möglich ist fossile Brennstoffe zu ersetzen bzw. langfristig, falls der CO₂-Kreislauf geschlossen werden kann.

⁷⁵ Kuramochi et al. 2012, CEMCAP 2018.

⁷⁶ Aus einer Tonne CO₂ können, stöchiometrisch auf Basis des Kohlenstoffgehaltes gerechnet, 0,72 Tonnen Methanol hergestellt werden.

Bei allen Verfahren wird für die Berechnung der nötigen Investitionssummen davon ausgegangen, dass die Vollkosten⁷⁷ der Anlagen zu tragen sind. Es wird ferner angenommen, dass etwa 50 % der Investitionskosten gefördert werden. D.h. es wird angenommen, dass zusätzlich zum bereitgestellten Budget die gleiche Summe aus anderen Quellen zur Verfügung steht. Dieser Fördersatz entspricht möglicherweise nicht der tatsächlichen Ausgestaltung der beiden nationalen Maßnahmen innerhalb des hier untersuchten Bündels. Dies ist auch auf mögliche Inkompatibilitäten mit dem derzeitigen EU-Beihilferecht zurückzuführen. Entsprechend sind die berechneten Wirkungen als mögliche Größenordnung zu verstehen, die im Einzelnen von der genauen Ausgestaltung der Programme abhängt. Der EU-Innovationsfonds ermöglicht bereits heute eine Zuschussung von bis zu 60 % der förderfähigen Kosten (sowohl Kapital- als auch Betriebskosten; siehe Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019), S. 97). Die realisierbare Produktionskapazität hängt, nebst Unsicherheiten der spezifischen Investitionen, maßgeblich an den letztlich effektiv eingesetzten Investitionssummen. Näherungsweise kann davon ausgegangen werden, dass die Minderungswirkung linear mit der Investitionssumme skaliert.

Die Annahmen zu notwendigen Investitionen werden auf Basis von Abschätzungen in wissenschaftlichen Veröffentlichungen (Tabelle 52) getroffen⁷⁸. Inbegriffen sind dabei notwendige Investitionen in Nebenanlagen (z.B. Elektrolyseur für die wasserstoffbasierte Direktreduktion). Nicht berücksichtigt sind zu vermutende zusätzliche Investitionen in Strom- und Wasserstoffinfrastruktur sowie etwaige Infrastruktur für Transport und Speicherung von CO₂⁷⁹. Dadurch ergibt sich für das Maßnahmenbündel 3 bis 2030 ein Gesamtinvestitionsvolumen von etwa 7 Mrd. €. Berücksichtigt man, dass ein großer Teil der Investitionen von privaten Investoren getragen wird (Annahme ~50 %), dann würden hierfür etwa 3,5 Mrd. € öffentliche Fördermittel notwendig sein.

Tabelle 52: Kennwerte für die Quantifizierung des Programmbündels für die Markteinführung CO₂-armer Verfahren

Referenzprozess	Innovativer Prozess	Kapazität 2030 (Mio. t)	Kapazität 2035 (Mio. t)	Spez. Investition (€/t Kap.)	Investitionssumme 2020-2030 (Mrd. €)	Quellen
Methanol erdgasbasiert	Methanol H ₂ (Inkl. Elektrolyse)	0,6	0,9	1.450	1,28	[1]
Glasschmelze Gasbrenner	Vollelektrisch, cold top	1,1	1,9	571	0,91	[2]
Hochofen	DRI H ₂ (Inkl. Elektrolyse)	1,7	3,1	725	1,81	[3]
Zementherstellung	CCS/CCU	1,2	2,1	330	0,59	[4]

⁷⁷ In Abgrenzung zu den anlegbaren Differenzkosten, wenn Nachrüstungen an bestehenden Anlagen durchführbar wären. Es wird also davon ausgegangen, dass aufgrund des Innovationscharakters der Technologien zu errichtende Anlagen als vollständig neu bewertet werden müssten.

⁷⁸ Zwischen Mittelbereitstellung und Realisierung der Einsparung ist eine Verzögerung von 3 Jahren berücksichtigt, die den Verzug zwischen Projektbeginn und Inbetriebnahme abbilden soll.

⁷⁹ Die Kosten eines pipelinebasierten Transportes von CO₂ werden auf etwa 10 €/t geschätzt (Rubin et al. 2015). Allerdings hängt dies stark vom Umfang der Anwendung an. Für die hier zugrunde gelegten Mengen von jährlich etwa 1,5 Mio. t im Jahr 2030 ist der Aufbau eines umfassenden Netzes (z.B. zu potenziellen Abnehmern an Chemiestandorten) nicht notwendig. Sollte die Option CCU perspektivisch weiterverfolgt werden, ist aufgrund des zu erwartenden reduzierten CO₂-Angebotes eine ausführlichere Betrachtung notwendig.

Referenzprozess	Innovativer Prozess	Kapazität 2030 (Mio. t)	Kapazität 2035 (Mio. t)	Spez. Investition (€/t Kap.)	Investitionssumme 2020-2030 (Mrd. €)	Quellen
Kalkherstellung	CCS/CCU	0,5	0,9	330	0,25	[4]
Methanol erdgasbasiert	Methanol H2 (CCU-Senke)	1,07	1,84	1.450	2,2	[1]
Summe					7,04	

Quelle: 1: (Perez-Fortes und Tzimas 2016), (Dechema 2019), (Perez-Fortes et al. 2016)
 2: (European Commission 2018), (Hibscher et al. 2005)
 3: (Vogl et al. 2018), (European Commission 2018)
 4: (Bundeskartellamt 2017), (European Commission 2018), (Kuramochi et al. 2012), (CEMCAP 2018)

Für die tatsächliche Umsetzung und Markteinführung CO₂-armer Verfahren sind neben den nötigen Investitionen auch die laufenden Kosten eine zentrale Größe. Viele Verfahren beruhen auf einer Umstellung der Energieträgernutzung von Kohle oder Erdgas auf höherwertige Sekundärenergieträger wie erneuerbar erzeugter Strom oder Wasserstoff. Es ist derzeit davon auszugehen, dass diese Energieträger nur zu höheren Kosten verfügbar sind und bei vielen Verfahren durch die Umstellung zu einer deutlichen Steigerung der Betriebskosten führen. Langfristig können steigende CO₂-Zertifikatepreise des Emissionshandels die Finanzierungslücke bei den Betriebskosten mindern. Im Zeitraum bis 2030 ist jedoch noch nicht davon auszugehen, dass der CO₂-Preis ausreichend hoch sein wird. Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 erreicht der CO₂-Preis des Emissionshandels im Jahr 2030 einen Wert von knapp 35 €/t CO₂. Dies genügt für die meisten Verfahren nicht, um die höheren Betriebskosten zu decken. Aus den Annahmen zu CO₂-Preis und Energieträgerpreisen⁸⁰ sowie den angenommenen Kapazitäten aller Verfahren ergibt sich eine Finanzierungslücke bei den Betriebskosten in der Größenordnung von 3 bis 4 Mrd. € bis 2030. Entsprechend stellt der Umgang mit den Betriebskosten eine hohe Unsicherheit für die Quantifizierung dieses Maßnahmenbündels dar. Wenn diese "Betriebskostenlücke" weiterhin bestehen bleibt, ist bei den meisten Verfahren nicht davon auszugehen, dass in industriellem Maßstab wirtschaftlich produziert werden kann. Wie das hier untersuchte Maßnahmenbündel im Hinblick auf die Berücksichtigung der Betriebskosten vor dem Hintergrund beihilferechtlicher Beschränkungen konkret ausgestaltet werden konnte, ist derzeit jedoch noch unklar.

Maßnahmenbündel 4: CO₂-Bepreisung

Bestehend aus:

- Maßnahme: 3.2.1 CO₂-Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr

Ergänzend zu den sektorspezifischen Maßnahmen wirkt sich die sektorübergreifende Einführung der CO₂-Bepreisung im Bereich der Wärmeerzeugung und dem Verkehr im Rahmen des nationalen Emissionshandelssystems (nEHS) auch auf die Emissionen des Industriesektors aus. Für die Industrie bedeutet das, dass bislang nicht im europäischen Emissionshandel (EU-ETS) erfasste Quellen von Emissionen aus fossilen Brenn- und Kraftstoffen ein Preissignal und damit einen Anreiz zur Emissionsminderung erhalten. Die erwartete Wirkung entfaltet sich über die

⁸⁰ Im Mittel 2020-2030 für Strom 15,3 €/GJ, für Kohle 4,2 €/GJ, für Erdgas 7 €/GJ. Für die strom- oder wasserstoffbasierten Prozesse wird angenommen, dass die maximal möglichen bestehenden Entlastungsregelungen des Strompreises (EEG-Umlage, Netzentgelt, Stromsteuer) greifen. Dadurch reduziert sich der Strompreis auf etwas mehr als die Hälfte des Durchschnittswertes industrieller Großabnehmer gemäß Eurostat Energiepreisband IE (BDEW Strompreisanalyse 2019).

preisgetriebene Konkurrenz von Technologien zur Wärmebereitstellung: klimaschonende Technologien werden durch die Verteuerung von CO₂-Emissionen attraktiver. Zwischen 2021 und 2025 werden Emissionszertifikate zu einem ansteigenden Festpreis ausgegeben, danach innerhalb einer Mengenbegrenzung gehandelt. Nach der Übergangsphase bis 2026, in dem ein Preiskorridor gilt (vgl. Kapitel 3.4), wird grundsätzlich von einer freien Preisbildung ausgegangen⁸¹.

Für die Umsetzung der Maßnahme im für die Industrie verwendeten Simulationsmodell FORECAST sind drei Zusammenhänge relevant: Preisannahmen, Anwendungsbereich und Wirkmechanismus. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

- ▶ Preisannahmen: Die Modellrechnung verwendet die im Vermittlungsausschuss im Dezember 2019 gefundene Einigung auf einen Preispfad bis 2025. 2026 wird das obere Ende der Preisspanne angenommen. Bis 2035 steigt der Zertifikatepreis linear auf 200 €/t (nominal). Die nominal angegebenen Werte werden für die Modellierung zum Inflationsausgleich an reale Preise angepasst. Es ergibt sich somit folgender Preispfad: 2021: 23,8, 2025: 50,2, 2030: 108,6, 2035: 165,2 €/t CO₂ abgezinst.
- ▶ Anwendungsbereich: Entsprechend dem Ziel, Überschneidungen mit dem EU-Emissionshandel zu vermeiden, werden mit dem nEHS exakt jene Emittenten im Modell adressiert, die nicht vom EU-ETS erfasst werden. Die Zuordnung erfolgt auf Prozessebene (z.B. Roheisenerzeugung im Hochofen, Ammoniakproduktion). In der bislang bestehenden Modellierung wurden dazu industrielle Prozesse den Aktivitäten des EU-ETS zugewiesen. Alle dort nicht erfassten Quellen energiebedingter Emissionen sind nun im nEHS vertreten⁸². Dies betrifft ganz überwiegend die nicht-energieintensive Industrie, da die großen Verwender fossiler Energieträger der energieintensiven Industrie bereits im EU-ETS erfasst sind.
- ▶ Wirkmechanismus
 - In welchem Umfang Brennstoffe und damit verbundene Technologien in FORECAST Verwendung finden, wird über ihre Attraktivität definiert. Diese setzt sich aus empirisch ermittelten Verhaltensparametern und Preissignalen zusammen. Grundsätzlich gilt, dass steigende Preise die entsprechenden Technologien und Energieträger unattraktiver machen. In welchem Maße Preisänderungen Wirkung haben, ist von den Modellparametern abhängig, die unter Anderem sektorspezifische Besonderheiten widerspiegeln. Ist ein Sektor auf einen bestimmten Energieträger angewiesen (z.B. Kohle/Koks in der Stahlerzeugung im Hochofen), wirken Preissignale weniger stark als in Sektoren mit hoher Brennstoffflexibilität.
 - Ein durch CO₂-Bepreisung höherer effektiver Preis für fossile Energieträger steigert die relative Attraktivität von CO₂-armen Energieträgern. Die Energieträger (und Technologien) stehen in Konkurrenz. Energieträger gleicher Attraktivität werden im Markt gleich

⁸¹ Der Vorbehalt eines über 2026 verlängerten Preiskorridors ist politisch vorgesehen.

⁸² Im Rahmen der Modellgenauigkeit sind Anlagen zu Energieerzeugung, die aufgrund ihrer Kapazität gemäß Anhang I von Richtlinie 2009/29 unter den EU-ETS fallen würden, berücksichtigt. Dies erfolgt ebenfalls auf Prozessebene, so dass eine Unschärfe der Zuordnung zu EU-ETS und nEHS besteht. Es kommt so weder zu Lücken noch zu Doppelzählungen. Die Wirkung des nEHS kann durch diese Unsicherheit dennoch über- oder unterschätzt werden.

stark vertreten sein. Sind Energieträger allerdings deutlich attraktiver (oder deutlich weniger attraktiv) als ihre Konkurrenz, wirken Preissignale nur geringfügig; der Zusammenhang ist nicht durchgehend linear. Daher können geringe Preissignale kaum Wirkung erzeugen, höhere Preisniveaus aber Kipppbereiche erreichen, an denen Technologien oder Energieträger für den Markt interessant werden. Mit den angelegten Preisen im nEHS wird z.B. Biomasse in vielen industriellen Prozessen attraktiver, in denen sie bereits heute eine Rolle spielt, also attraktiv ist. Die Wirkung auf die Nutzung von Strom zur Erzeugung von Prozesswärme ist allerdings über einen langen Zeitraum kaum wahrnehmbar, da die Preisdifferenz zum de facto Referenzenergieträger Erdgas zu groß ist, um durch das Preissignal des nEHS relevant beeinflusst zu werden. Erst späte Preisstufen beeinflussen die Attraktivität strombasierter Technologien in relevantem Umfang. Die Wirkung auf die tatsächlichen Emissionen entfaltet sich dann aber erst durch den an die Lebensdauer gekoppelten Austausch von Bestandsanlagen. Daraus folgen zwei mögliche Pfade für stärkere Emissionsminderungen: Einerseits frühe starke Preissignale, die lock-in Effekte und vorzeitige Abschreibungen durch angepasstes Investitionsverhalten verhindern. Alternativ späte starke Preissignale verbunden mit beschleunigtem Bestandsaustausch. Damit würden dann auch Anlagen aus dem Bestand entfernt, die das Ende ihrer Lebensdauer noch nicht erreicht haben.

- Weiterhin wird angenommen, dass Unternehmen nicht den zukünftigen CO₂-Preis antizipieren, sondern vom jeweiligen Preis im Jahr der Investition ausgehen. Das hat zur Folge, dass besonders die hohen Preise in späteren Jahren des Modellierungszeitraumes nur geringen Einfluss haben. Würde man annehmen, dass Unternehmen bei den Investitionen zukünftige (höhere) Preise bereits antizipieren, würde die Wirkung der Maßnahme höher ausfallen. Der Vorteil dieser Annahme ist die transparente Abbildung der Entscheidung, da keine Annahmen zu Erwartungshorizonten oder Eintrittswahrscheinlichkeiten der Erwartung getroffen werden müssen. Ohnehin ist die empirische Datenlage zum Investitionsverhalten der Unternehmen und der Einbindung des CO₂-Preises schlecht und erlaubt kaum Rückschlüsse. Bei der aktuellen Datenlage ist diese Unsicherheit nur über eine Sensitivität adressierbar, welche ein Investitionsverhalten mit Vorausschau unterstellt und so die mögliche Bandbreite angibt.
- Wettbewerbliche Effekte, besonders bei Produkten im internationalen Wettbewerb sowie generell Rückwirkungen auf Wertschöpfungsketten und Industriestruktur sind im Modell nicht berücksichtigt, können die Wirkung aber stark beeinflussen - besonders bei einem hohen CO₂-Preisniveau.

5.1.6 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

5.1.6.1 Gesamtergebnisse

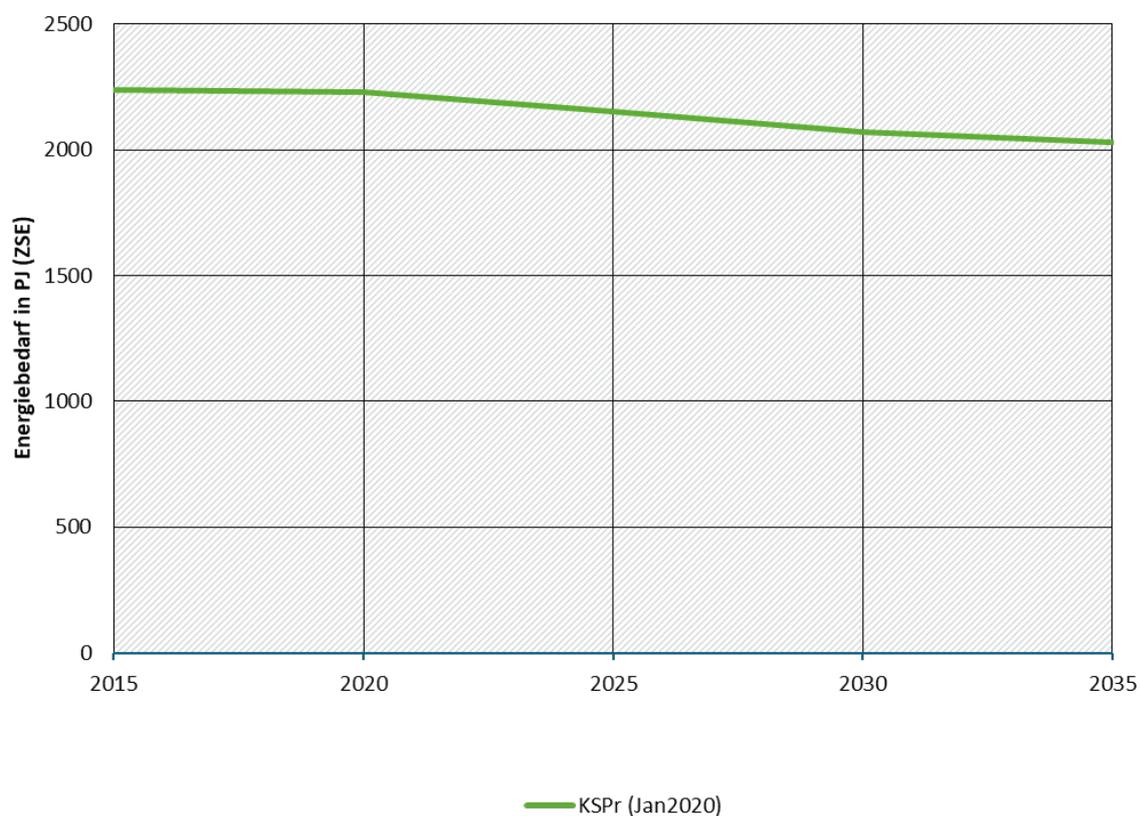
Die modellierten Maßnahmen beeinflussen das Niveau von Brennstoff- und Stromverbrauch (Energie- und Materialeffizienz, Prozesswechsel), sowie die Anteile der einzelnen Energieträger (Brennstoff- und Prozesswechsel) am Endenergieverbrauch und entsprechend die energiebedingten Treibhausgasmissionen. Einige Maßnahmen wirken über die Einführung neuer Prozesse

bzw. Veränderungen in den Produktionsmengen auch direkt auf die prozessbedingten Emissionen.

Sowohl der Endenergiebedarf als auch der Energieträgermix stellen darüber hinaus wichtige Verknüpfungen zum aktuellen Stand der Energienutzung und damit zur Plausibilisierung der Ergebnisse dar. Ihre Entwicklung wird daher in den folgenden Absätzen kurz an drei ausgewählten Dimensionen erläutert: Gesamtniveau der Endenergienutzung, verstärkter Einsatz von Strom und Wasserstoff, sowie Brennstoffwechsel.

Fortschritte in Energieeffizienz, Materialeffizienz und Prozesswechsel reduzieren den Endenergiebedarf bis 2030 um etwa 200 PJ, 9 %. Besonders großen Einfluss hat die hinterlegte Produktionsmenge der jeweiligen energieintensiven Güter (siehe Tabelle 45) und allgemein die wirtschaftliche Entwicklung.

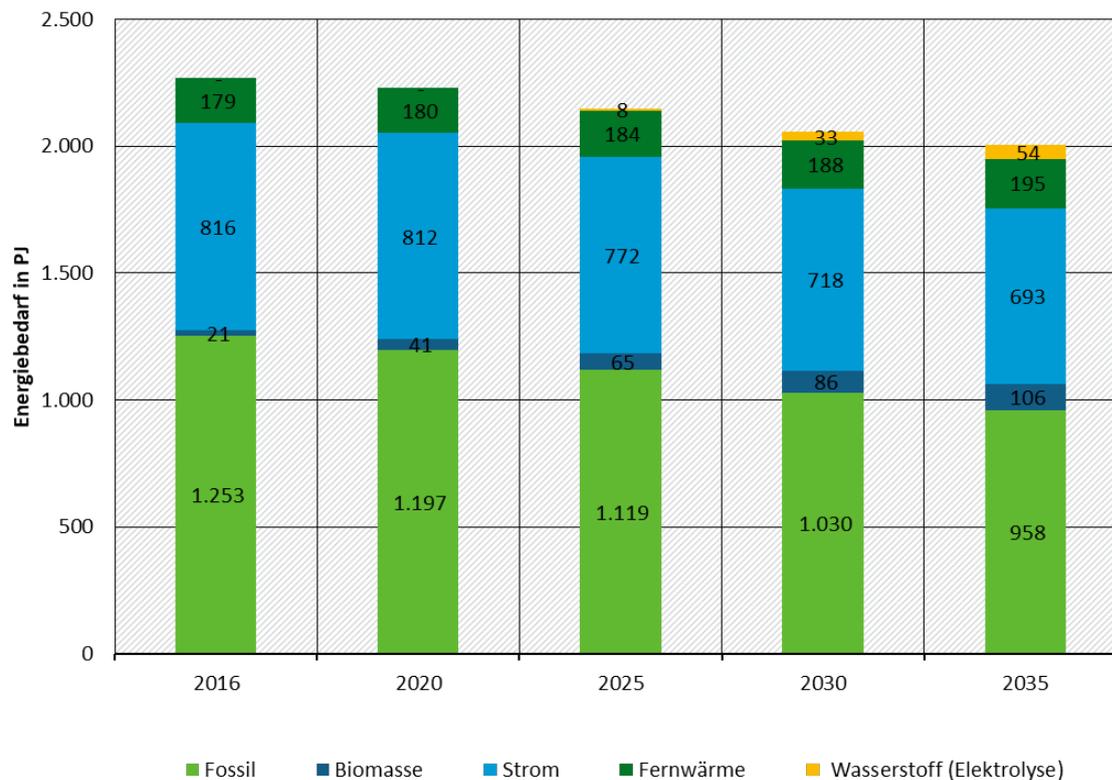
Abbildung 20: Entwicklung Endenergiebedarf im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))



Quelle: Fraunhofer ISI/ FORECAST Modell

Der Rückgang des Endenergieverbrauchs geschieht überwiegend in der Gruppe der fossilen Energieträger; Kohle, Erdgas, Kuppelgase, Öl (Abbildung 21). Ihre Nutzung sinkt zwischen 2016 und 2030 um 223 PJ (18 %). Darüber hinaus sinkt der Stromverbrauch um 123 PJ (15 %). Hinzu kommt eine verstärkte Nutzung von Biomasse (+65 PJ, +158 %) und Wasserstoff (+54 PJ). Fernwärmenutzung steigt leicht an (+15 PJ, +8 %).

Abbildung 21: Entwicklung des Energieträgermix im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))



Quelle: Fraunhofer ISI/ FORECAST Modell

Tabelle 53 zeigt den Strombedarf der Industrie nach Anwendungsbereichen. Unterschieden werden Industrieöfen, Wasserstoffherstellung sowie die restlichen vorwiegend klassischen Stromanwendungen wie die mechanische Energienutzung. Bei den Industrieöfen zeigt sich ein deutlicher Zuwachs (allerdings auch relativ niedrigem Ausgangsniveau) von 32 PJ bis 2030, während andere (konventionelle) Stromnutzung um 178 PJ sinkt. Hinzu kommen 78 PJ Stromnutzung⁸³ in Elektrolyseuren für die Produktion von Wasserstoff zur Anwendung durch Prozesswechsel in der Chemie- Stahlindustrie (H₂-DRI und H₂-Methanol).

Tabelle 53: Zusammensetzung des Stromverbrauchs im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) (PJ Strom)

Anwendung	2016	2020	2025	2030	2035
Prozesswärme in Industrieöfen	32	39	45	64	88
Wasserstoffherzeugung (elektrolytisch)	0	0	11	48	78
Andere Stromnutzung	783	774	728	655	605
Summe	816	812	783	766	771

Quelle: Fraunhofer ISI/ FORECAST Modell

⁸³ Es wird eine feste Elektrolyseureffizienz von 70 % angenommen.

5.1.6.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Im Folgenden sind die Ergebnisse hinsichtlich Energieeinsparung und THG-Minderung der einzelnen Maßnahmenbündel ausgewiesen und diskutiert.

1. Förderung der Energieeffizienz
2. Förderung der Materialeffizienz
3. Markteinführung CO₂-armer Herstellungsverfahren inkl. CCS und CCU
4. CO₂-Bepreisung

Im Folgenden sind die Stromeinsparungen (Tabelle 54) sowie die Brennstoff- und CO₂-Einsparungen (Tabelle 55) der Maßnahmenbündel gezeigt. Die Wirkung ist als "Einsparung" ggü. dem jeweiligen Jahr des Referenzszenarios gezeigt. Ein positiver Wert gibt demnach an, dass der Verbrauch oder die Emissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) unter dem Referenzszenario liegen.

Insgesamt zeigt sich für das Jahr 2030 eine Emissionsminderung von etwa 9 Mio. t CO₂e im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan2020) ggü. dem Referenzszenario. Während der gesamte Endenergieeinsatz im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) niedriger als im Referenzszenario liegt, ist beim Stromverbrauch (durch elektrolytische Wasserstoffherzeugung und Elektrifizierung der Prozesswärme) sogar ein Anstieg zu verzeichnen.

Das Maßnahmenbündel "Förderung der Energieeffizienz" bewirkt bis 2030 zusätzliche Stromeinsparungen von 4,4 TWh sowie Brennstoffeinsparungen von 32 PJ. Zusammen mit der auch im Bündel geförderten Steigerung des Anteils erneuerbarer Energieträger für die Prozesswärme ergeben sich damit Emissionseinsparungen von etwa 2 Mio. t CO₂.

Das Maßnahmenbündel "Förderung der Materialeffizienz" weist eine Emissionsminderung von etwa 1,1 Mio. t CO₂ bis 2030 ggü. dem Referenzszenario aus. Diese gehen auf Materialeffizienzverbesserungen in vielen Branchen zurück. Hierdurch ergibt sich auch eine Einsparung von etwa 13 PJ Brennstoffen und 0,7 TWh Strom.

Die Markteinführung CO₂-armer Herstellungsverfahren und der dadurch angestoßene Prozesswechsel führt zu einem Anstieg des Stromverbrauchs von knapp 7 TWh in 2030 ggü. dem Referenzszenario. Dieser Anstieg ist auf den Einsatz von Wasserstoff in Anlagen der Chemie- und Stahlindustrie und den damit verbundenen Stromverbrauch für die Wasser-Elektrolyse zurückzuführen. Gleichzeitig ergibt sich eine deutlich Brennstoffeinsparung von nahezu 30 PJ bis 2030 und eine resultierende Emissionsminderung von 4,7 Mio. t CO₂.

Der CO₂-Preis in den Sektoren Wärme- und Verkehr adressiert im Industriesektor Unternehmen, welche bisher nicht vom CO₂-Preis des Emissionshandels betroffen waren. Dies sind vorwiegend weniger energieintensive Unternehmen und insgesamt ist der Großteil der industriellen CO₂-Emissionen bereits im Emissionshandel abgedeckt. Vor diesem Hintergrund ist auch die Wirkung dieses zusätzlichen CO₂-Preises zu beurteilen. Bis zum Jahr 2030 ist eine CO₂-Vermeidung von etwa 1,2 Mio. t zu verzeichnen. Wichtigste Ursache der CO₂-Vermeidung ist der durch den CO₂-Preis induzierte Energieträgerwechsel: Besonders von Kohle und Gas zu Biomasse, aber auch der Einsatz von Wärmepumpen im Niedertemperaturbereich nimmt zu, entsprechend steigt der Stromverbrauch leicht.

Tabelle 54: Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP_r (Jan 2020)) - Stromeinsparungen ggü. Referenzszenario

Maßnahmenbündel	Strom-Einsparungen		
	2025	2030	2035
	TWh/a		
1: Förderung der Energieeffizienz	2,8	4,4	5,8
2: Förderung der Materialeffizienz	0,4	0,7	0,9
3: Markteinführung CO ₂ -armer Herstellungsverfahren	-1,8	-6,6	-12,6
4: CO ₂ -Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr	-0,0	-0,2	-0,4
Summe	1,3	-1,7	-6,3

Quelle: Fraunhofer ISI/ FORECAST Modell

Tabelle 55: Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP_r (Jan 2020)) – Einsparungen von Brennstoffen und CO₂-Emissionen ggü. Referenzszenario (REF)

Maßnahmenbündel	Brennstoff-Einsparungen ggü. REF			Vermeidung von CO ₂ -Emissionen ggü. REF		
	2025	2030	2035	2025	2030	2035
	PJ/a			Mio. t CO ₂ /a		
1: Förderung der Energieeffizienz	20,6	32,8	41,0	1,0	2,0	2,8
2: Förderung der Materialeffizienz	6,9	13,3	19,6	0,4	1,1	1,7
3: Markteinführung CO ₂ -armer Herstellungsverfahren*	10,8	28,7	48,6	2,1	4,7	8,1
4: CO ₂ -Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr	0	0,1	0,2	0,3	1,2	2,4
Summe Maßnahmen	38,3	74,9	109,4	3,8	9,0	14,9

* Die Minderungswirkung in den jeweiligen Jahren berücksichtigt bei allen Maßnahmen keine Umsetzungszeiträume, sondern geht von einer sofortigen Mittelverwendung aus. Besonders bei Maßnahmenbündel 3 ist jedoch davon auszugehen, dass es einen größeren Zeitversatz zwischen der Mittelvergabe und der realisierten CO₂-Einsparung geben wird. Entsprechend kann sich die CO₂-Minderung durchaus um 1 bis 2 Jahre nach hinten verschieben. Dies gilt besonders für den 2025 ausgewiesenen Wert.

Quelle: Fraunhofer ISI/ FORECAST Modell

5.1.6.3 Einordnung der Unsicherheiten

Die Modellierung enthält geschätzte Parameter, die als unsicher einzustufen sind. Die gezeigte Entwicklung der Treibhausgasemissionen setzt voraus, dass:

- Der Anteil Elektrostahl bis 2030 ansteigt und Oxygenstahl sinkt;

- ▶ Die bereits im Referenzszenario implementierten umfassenden Energieeffizienz-Maßnahmen wirksam sind;
- ▶ Maßnahmen zur Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft effektiv umgesetzt werden und auf die relevanten Produkte fokussieren;
- ▶ Die im Klimaschutzprogramm 2030 enthaltenen Maßnahmen zur Dekarbonisierung und CO₂-Nutzung zu einer schnellen Markteinführung CO₂-armer Verfahren im industriellen Maßstab führen.

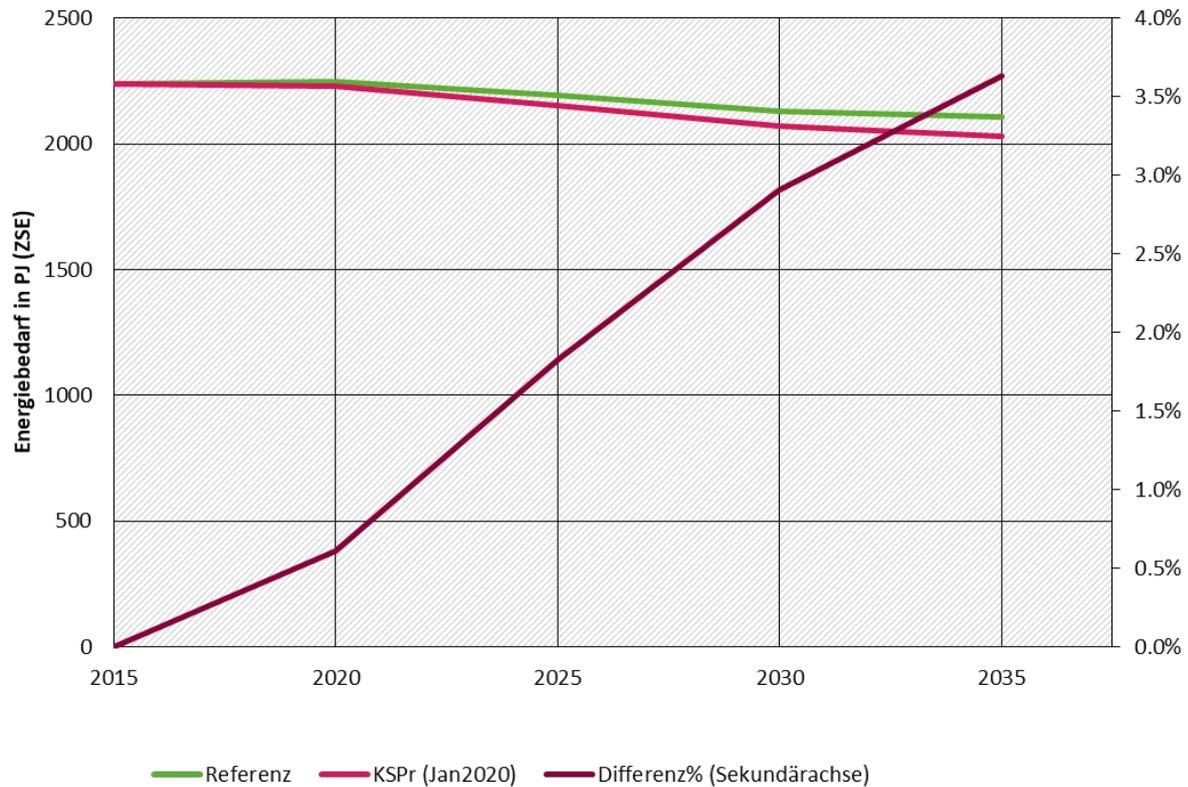
Es gibt großen Spielraum bei der konkreten Umsetzung einiger Maßnahmen. Es wurde eine konsequent auf Dekarbonisierung ausgerichtete Ausgestaltung angenommen. Bei weniger zielgerichteter Ausgestaltung sind deutlich niedrigere Wirkungen denkbar, bis hin zur (noch) weitgehenden Unwirksamkeit einzelner Maßnahmen im mittelfristigen Zeithorizont bis 2030.

5.1.7 Vergleich der Szenarien

Die Wirkungen der zusätzlichen Maßnahmen des Szenarios Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) auf den Endenergiebedarf können im direkten Vergleich mit dem Referenzszenario dargestellt werden. Auch hierfür werden die bereits bei der Darstellung der Einzelergebnisse verwendeten Dimensionen Gesamtenergiebedarf, Einsatz von Strom (und Wasserstoff) in Industrieöfen und Brennstoffwechsel vorgestellt.

Die Kombination der Maßnahmen bewirkt bis 2035 eine Reduktion der Endenergienachfrage um 3,6 % gegenüber dem Referenzszenario. Dabei ist ein Abflachen der Entwicklung nach 2030 zu beobachten (Abbildung 22). Dies ist hauptsächlich darauf zurück zu führen, dass aus heutiger Sicht Energieeffizienzpotentiale in vielen Prozessen an ihre Grenzen geraten. Insgesamt ist der Effizienzgewinn gegenüber dem Referenzszenario vergleichsweise moderat (im Mittel 0,2 % pro Jahr), da bereits das Referenzszenario hohe Ansprüche an Energieeffizienz beinhaltet.

Abbildung 22: Endenergiebedarf von Referenzszenario (REF) und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)) sowie Differenz der beiden Szenarien



Quelle: Fraunhofer ISI/ FORECAST Modell

In Szenario Klimaschutzprogramm 2030 entsteht durch innovative direktelektrische Anwendungen (elektrischer Glasschmelzofen) und beginnende Elektrifizierung weiterer Prozesswärmebereitstellung neue Stromnachfrage. Diese kompensiert einen Teil der Stromeinsparungen durch Effizienzgewinne (Tabelle 56). Hinzu kommt Strombedarf für die Bereitstellung von Wasserstoff als Reduktionsmittel in der Stahlindustrie (H₂-DRI). Während im Referenzszenario die Nutzung von Strom in Industrieöfen bis 2035 nur geringfügig (13 PJ) steigt, verdreifacht sie sich in KSPPr (Jan 2020) bis 2035 fast auf 88 PJ. Dabei verbleibt sie allerdings, im Vergleich zur Nutzung fossiler Energieträger (958 PJ in 2035), noch immer auf niedrigem Niveau. Eine ähnliche Menge (78 PJ) wird für die Bereitstellung von Wasserstoff verwendet⁸⁴.

⁸⁴ Es wird pauschal eine Umwandlungseffizienz der Elektrolyseure von 70 % angenommen.

Tabelle 56: Strom- und Wasserstoffnutzung im Technologiebereich Industrieöfen in Referenzszenario (REF) und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))

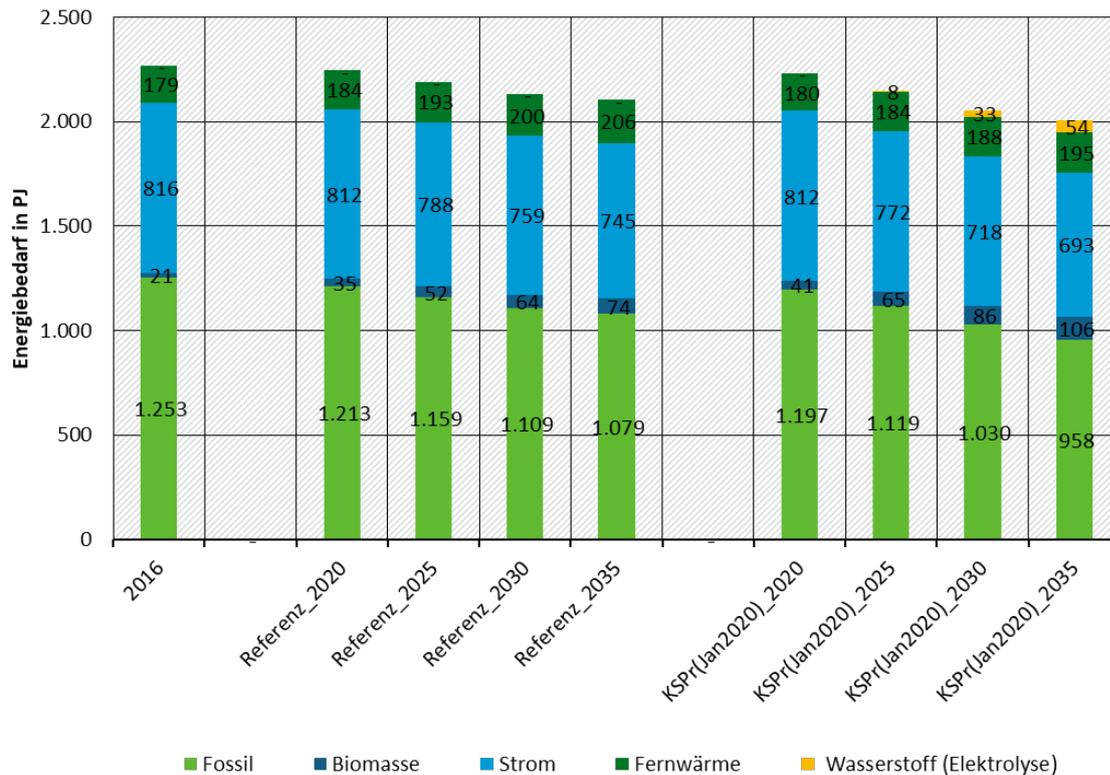
Stromnutzung in PJ	Anwendung	2016	2020	2025	2030	2035
Referenzszenario	Prozesswärme in Industrieöfen	32	37	39	42	45
	Andere Stromnutzung	783	776	748	718	701
	Summe	816	812	788	759	745
KSPr (Jan2020)	Prozesswärme in Industrieöfen	32	39	45	64	88
	Wasserstofferzeugung (elektrolytisch)	0	0	11	48	78
	Andere Stromnutzung	783	774	728	655	605
	Summe	816	812	783	766	771

Quelle: Fraunhofer ISI/ FORECAST Modell

Zusätzlich zur und in Kombination mit der Einführung neuer Prozesse findet ein kontinuierlicher Brennstoffwechsel in allen Branchen statt (Abbildung 23). Dadurch wird in KSPr (Jan 2020) bis 2030 im Vergleich zu 2016 die Nutzung fossiler Brennstoffe um etwa 25 % reduziert. Die Nutzung von Biomasse steigt von 21 PJ auf 106 PJ, während die Nutzung von Fernwärme etwa konstant bleibt. Hinzu kommt die Nutzung von Wasserstoff mit 54 PJ⁸⁵. Relativ zum Referenzszenario sind nur geringe zusätzliche Effekte zu beobachten (+32 PJ Biomasse, - 121 PJ fossil). Zu den Auswirkungen auf den Strombedarf sei auf Tabelle 56 verwiesen.

⁸⁵ Diese 54 PJ Wasserstoff korrespondieren mit den vorher erwähnten 78 PJ Stromnutzung für die Wasserstoffproduktion.

Abbildung 23: Entwicklung von Energieträgergruppen im Referenzszenario (REF) und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))



Quelle: Fraunhofer ISI/ FORECAST Modell

5.2 Industriekraftwerke

5.2.1 Methodik

Der Modellierungsansatz ist, zunächst sämtliche Kraftwerke mit den gesamten Strom- und Wärmenachfragen insgesamt zu modellieren und anschließend die Brennstoffeinsätze in einem Top-down-Ansatz auf die vier für das Treibhausgasinventar relevanten Quellgruppen aufzuteilen:

- ▶ CRF 1.A.1.a Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung beinhaltet alle öffentlichen Kraftwerke,
- ▶ CRF 1.A.b Mineralölraffinerien beinhaltet Raffineriekraftwerke
- ▶ CRF 1.A.1.c Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger beinhaltet sonstige Kraftwerke der Energiewirtschaft
- ▶ CRF 1.A.2 Verarbeitende Industrie beinhaltet alle Industriekraftwerke außerhalb der Energiewirtschaft.

In diese Aufteilung fließen unter anderem Daten zur Fernwärme- und industriellen KWK-Nachfrage, aber auch die Entwicklung wichtiger industrieller Aktivitäten wie Stahlerzeugung, Raffinerieaktivität und Herstellung von Kohlenprodukten (Koks und Brikett) ein.

Aufgrund des gewählten Modellierungsansatzes sind individuelle Kraftwerkskapazitäten der Industrie kein relevanter Parameter und sind daher in der Modellierung nicht enthalten.

5.2.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario

Wichtige spezifische Treiber sind für die Entwicklung der Industriekraftwerke (IKW) die KWK-Wärmeerzeugung zur Eigenversorgung der Industrie sowie der aus der Stahlerzeugung resultierende Gichtgaseinsatz in IKW. Auch wird ein konstanter Einsatz von Müll als Brennstoff in IKW angenommen. Des Weiteren wirken sich die Maßnahmen im Kraftwerkssektor (Abschnitt 4.1.3), auch auf die Industriekraftwerke aus.

Tabelle 57: Parameter der Industriekraftwerke im Referenzszenario (REF), 2016-2035

	Einheit	2016	2020	2025	2030	2035
KWK-Wärmeerzeugung in IKW	PJ	292	247	238	226	223
Gichtgaseinsatz in IKW	PJ	75	75	73	73	74
Mülleinsatz in IKW	PJ	46	46	46	46	46

Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

5.2.3 Ergebnisse Referenzszenario

Im Referenzszenario ergibt sich insgesamt ein Rückgang der Brennstoffeinsätze in Industriekraftwerken um 20 % bis 2035 gegenüber dem Jahr 2016, wobei sich die Anteile der einzelnen Brennstoffe nur geringfügig verschieben. Erdgas als dominierender Brennstoff erhöht seinen Anteil von 47 % im Jahr 2016 auf 50 % im Jahr 2030. Ein rückläufiger Anteil zeichnet sich bei fester Biomasse, dem zweitwichtigsten Brennstoff ab: Deckte feste Biomasse 2016 noch 20 % des Brennstoffeinsatzes ab, so sinkt dieser Anteil bis 2030 auf 17 %. Der nahezu konstante Gichtgaseinsatz wird durch die Entwicklung der Stahlerzeugung determiniert, entsprechendes gilt für das Kokereigas. Die Kohlen (Braun- und Steinkohle zusammen) deckten 2016 etwa 8 % des Brennstoffeinsatzes in Industriekraftwerken, dieser Anteil sinkt bis 2035 geringfügig auf 7 %. Der konstante Mülleinsatz ist kein Modellierungsergebnis, sondern eine Annahme. Die Beiträge der übrigen Brennstoffe liegen jeweils unter 5 %.

Tabelle 58: Brennstoffeinsätze der Industriekraftwerke im Referenzszenario (REF), 2016-2035

	2016	2020	2025	2030	2035
PJ					
Braunkohlen	32	25	23	22	21
Steinkohlen	26	20	19	18	17
Öl	30	0	2	14	15
Raffineriegas	2	2	2	2	2
Erdgas	350	331	318	302	299
Gichtgas	75	75	73	73	74
Kokereigas	24	19	17	16	16
Sonstige Gase	5	5	5	5	5

	2016	2020	2025	2030	2035
Müll	46	46	46	46	46
Biogas	2	2	1	1	1
(Feste) Biomasse	151	118	112	103	100
Flüssige Biomasse	1	1	1	0	0
Summe	743	642	620	602	595
<i>ggü. 2016</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-13,6 %</i>	<i>-16,6 %</i>	<i>-19,0 %</i>	<i>-20,0 %</i>

Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Zwischen 1990 und 2016 sanken die Treibhausgasemissionen der Industriekraftwerke von 69 Mio. t CO₂e auf 53 Mio. t CO₂e, was einem Rückgang um 23 % entspricht. Im Referenzszenario sinken die Emissionen dann auf 48 Mio. t CO₂e im Jahr 2020. Der anschließende Rückgang ist deutlich langsamer: Im Jahr 2025 liegen die Emissionen bei 47 Mio. t CO₂e und in den Jahren 2030 und 2035 dann bei 46 Mio. t CO₂e, was ein Drittel niedriger ist als 1990.

5.2.4 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Wie auch im Referenzszenario sind im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 die KWK-Wärmeerzeugung zur Eigenversorgung der Industrie und der aus der Stahlerzeugung resultierende Gichtgaseinsatz die entscheidenden Parameter für die spezifische Entwicklung. Darüber hinaus wird analog zum Referenzszenario ein konstanter Einsatz von Müll als Brennstoff in IKW angenommen. Des Weiteren wirken sich die Maßnahmen im Kraftwerkssektor (Abschnitt 4.1.5), auch auf die Industriekraftwerke aus.

Tabelle 59: Parameter der Industriekraftwerke im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2016-2035

	Einheit	2016	2020	2025	2030	2035
KWK-Wärmeerzeugung in IKW	PJ	292	247	237	222	214
Gichtgaseinsatz in IKW	PJ	75	75	72	68	65
Mülleinsatz in IKW	PJ	46	46	46	46	46

Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

5.2.5 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

5.2.5.1 Gesamtergebnisse

Durch das Klimaschutzprogramm 2030 ergibt sich gegenüber dem Jahr 2016 insgesamt ein Rückgang der Brennstoffeinsätze in Industriekraftwerken um knapp 22 % bis 2030. Die Entwicklung ist dabei bei den unterschiedlichen Brennstoffen durchaus divers. Erdgas als dominierender Brennstoff erhöht seinen Anteil von 47 % im Jahr 2016 auf 51 % im Jahr 2030. Auch im KSPr (Jan 2020) ergibt sich ein rückläufiger Biomasseeinsatz. Durch eine teilweise Umstellung der Stahlerzeugung von der Hochofenroute auf alternative Prozesse ergibt sich ein deutlich rückläufiger Einsatz an Gicht- und Kokereigas. Der Kohleausstieg betrifft nicht nur die öffentlichen Kraftwerke, sondern auch die Industriekraftwerke. Daher sinkt der Anteil der Kohlen

(Braun- und Steinkohle zusammen) von 8 % im Jahr 2016 auf knapp 5 % im Jahr 2030. Der deutliche Rückgang zwischen 2030 und 2035 betrifft dabei vor allem die Steinkohle. Der konstante Mülleinsatz ist kein Modellierungsergebnis, sondern eine Annahme. Die Beiträge der übrigen Brennstoffe liegen jeweils unter 5 %.

Tabelle 60: Brennstoffeinsätze der Industriekraftwerke im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2016-2035

	2016	2020	2025	2030	2035
PJ					
Braunkohlen	32	25	23	21	21
Steinkohlen	26	20	19	17	0
Öl	30	0	0	6	13
Raffineriegas	2	2	2	1	1
Erdgas	350	330	316	297	303
Gichtgas	75	75	72	68	65
Kokereigas	24	18	17	16	15
Sonstige Gase	5	5	5	5	5
Müll	46	46	46	46	46
Biogas	2	2	1	1	1
(Feste) Biomasse	151	118	112	103	99
Flüssige Biomasse	1	1	1	0	0
Summe	743	642	615	583	569
<i>ggü. 2016</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-13,6 %</i>	<i>-17,3 %</i>	<i>-21,6 %</i>	<i>-23,4 %</i>

Modellierung Öko-Institut

Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) sinken die Treibhausgasemissionen kontinuierlich. Lagen sie 2016 noch bei 53 Mio. t CO_{2e}, sinken sie auf 48 Mio. t CO_{2e} im Jahr 2020, 46 Mio. t CO_{2e} im Jahr 2025, 44 Mio. t CO_{2e} im Jahr 2030 und 42 Mio. t CO_{2e} im Jahr 2035. Die Emissionen liegen somit 2030 gut 36 % und 2035 sogar 39 % niedriger als 1990.

5.2.5.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Eine gesonderte Einzelmaßnahmenbewertung für die Industriekraftwerke erfolgt nicht, da es keine IKW-spezifischen Maßnahmen gibt. Die Maßnahmen des Kraftwerkssektors (Abschnitt 4.1.6.2) insgesamt wirken jedoch auch auf die Industriekraftwerke.

5.2.5.3 Einordnung der Unsicherheiten

Zur generellen Unsicherheit der Modellierung der Kraftwerke im Modell PowerFlex siehe Abschnitt 4.1.6.3.

Bei der Berechnung des Anteils der Industriekraftwerke an den Brennstoffeinsätzen und Emissionen der Kraftwerke insgesamt kommen mehrere Parameter mit unterschiedlich Unsicherheiten zum Einsatz:

- ▶ Der Brennstoffeinsatz insgesamt wird vor allem durch die Wärmenachfrage aus industrieller KWK-Eigenerzeugung bestimmt. Dieses ist als relativ robust anzusehen, da diese Wärmenachfrage detailliert über das Modell FORECAST-Industry bestimmt wird.
- ▶ Die Verteilung der unterschiedlichen Brennstoffe hat unterschiedliche Unsicherheiten. Der Gichtgaseinsatz ist dabei am robustesten anzusehen, da er direkt aus der Entwicklung der Eisen- und Stahlerzeugung des Modells FORECAST-Industry abgeleitet ist. Der Mülleinsatz ist eine reine Annahme. Die Einsätze der übrigen Brennstoffe außer Erdgas werden direkt aus den PowerFlex-Ergebnissen abgeleitet, alle Unsicherheiten aus PowerFlex schlagen sich also hier direkt durch. Da Erdgas als Residualgröße zur Deckung der Wärmenachfrage dient, ist hier von einer zusätzlichen Unsicherheit auszugehen.
- ▶ Eine weitere Unsicherheit ergibt sich dadurch, dass die brennstoffspezifischen Quotienten aus Brennstoffeinsätzen für Wärmeerzeugung und Stromerzeugung des Jahres 2016 für die Szenarienjahre fortgeschrieben wurde.

Insgesamt ist die Emissionsentwicklung mit größeren Unsicherheiten behaftet als die Entwicklung des Brennstoffeinsatzes über alle Industriekraftwerke. Ursache hierfür sind die sehr unterschiedlichen Emissionsfaktoren der einzelnen Brennstoffe.

5.2.6 Vergleich der Szenarien

Im Vergleich der Szenarien zeigt sich, dass der Brennstoffeinsatz im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) etwas stärker zurückgeht als im Referenzszenario (REF) (-23 % gegenüber -20 %). Die größten Unterschiede gibt es vor allem bei Braun- und Steinkohle sowie Gicht- und Kokereigas, wo die Brennstoffeinsätze in IKW im KSPr (Jan 2020) jeweils niedriger als im REF liegen. Der deutliche Rückgang der Kohlen im KSPr (Jan 2020) gegenüber dem REF führt nur zu geringen gegenläufigen Entwicklungen beim Erdgas. Bei den übrigen Brennstoffen ergeben sich absolut gesehen nur kleine Effekte durch das Klimaschutzprogramm 2030.

Diesen Unterschieden der Brennstoffeinsätze (siehe Tabelle 58 und Tabelle 60) folgt eine unterschiedliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen. Sind diese 2020 noch identisch, so steigert sich der Abstand im Laufe der Szenarienjahre: Beträgt der Unterschied zwischen KSPr (Jan 2020) und REF für das Jahr 2025 noch weniger als 1 Mio. t CO₂, so steigt der Unterschied auf gut 2 Mio. t CO₂e im Jahr 2030 und fast 4 Mio. t CO₂e im Jahr 2035.

5.3 Industrieprozesse und Produktverwendung (CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen)

5.3.1 Methodik

Für die Erstellung der Projektionen für die prozessbedingten Kohlendioxid-, Methan- und Lachgas-Emissionen wurde ein dreistufiger Ansatz verfolgt:

1. Die detaillierteste Berechnung von Prozessemissionen erfolgt im Bereich der Eisen- und Stahlindustrie mit einer besonderer Bedeutung der Primärstahlerzeugung über die Hochofenroute: Hier gehen als Eingangsparameter in die Emissionsberechnung einerseits die

Brennstoffeinsätze in Hochöfen (v.a. Steinkohle, aber auch Mineralölprodukte und Braunkohle) und die entstehenden Kuppelgase (Gichtgas) und andererseits die Produktionsmengen an Primärstahl ein. Anschließend werden die gesamten entstehenden Emissionen in Anlehnung an die Methodik im Nationalen Treibhausgasinventar (UBA 2018a) in energiebedingte Emissionen (CRF 1.A.2) und prozessbedingte Emissionen (CRF 2.C.1) aufgeteilt, um diese korrekt zuordnen zu können.

2. Für die meisten weiteren (sehr relevanten) Quellbereiche ist die Fortschreibung der Entwicklung über Annahmen zur Entwicklung der Produktionsniveaus entsprechend Tabelle 45 für eindeutig identifizierbare Produkte bzw. Produktgruppen unter der Annahme konstanter Emissionsfaktoren möglich. Für nicht in Tabelle 45 aufgeführte Prozesse wurden – sofern vorhanden – alternative Aktivitätsdaten verwendet.
3. Für einige (weniger relevante) Quellbereiche wurden die historischen Aktivitätsraten (in der Regel Produktionsmengen) der Emissionen analysiert. Sofern eindeutige Trends in den Aktivitätsraten vorliegen, wurden diese – bei konstanten Emissionsfaktoren – in die Zukunft fortgeschrieben. Andernfalls wurden die Aktivitätsraten und die Emissionen in den Szenarien auf dem Niveau von 2016 konstant gehalten.

Die prozessbedingten CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen ergeben sich damit stets aus den zu Grunde gelegten Produktionsmengen, die entweder exogen vorgegeben sind oder konstant gehalten werden bzw. über die modellendogen ermittelten Produktionsniveaus ermittelt werden.

Für die Ermittlung der indirekten CO₂-Emissionen aus NMVOC-Emissionen im Bereich der Lösemittel und anderer Produktverwendung wurden NMVOC-Emissionsprojektionen aus dem Aktuelle-Politik-Szenario des Projekts *Luft 2030* (Öko-Institut et al. 2014) übernommen und bis zum Jahr 2035 fortgeschrieben.

Die N₂O-Emissionen aus der Produktverwendung wurden auf dem Niveau des Jahres 2016 fortgeschrieben.

Die Anwendung von Carbon Capture and Storage (CCS) wurde entsprechend den Inventarregeln bilanziert, so dass ein Teil der Emissionsminderung bei den energetischen Emissionen erscheint, ein anderer Teil bei den Emissionen aus Industrieprozessen.

5.3.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario

Die für den Industrieprozesse entscheidenden Parameter sind die in Tabelle 45 dokumentierten Produktionsdaten. Darüber hinaus wurden konstante Emissionsfaktoren angenommen, d.h. die Emissionsfaktoren des Jahres 2016 wurden fortgeschrieben.

5.3.3 Ergebnisse Referenzszenario

Zwischen 1990 und 2016 sind die Kohlendioxid-, Methan- und Lachgasemissionen in Summe bereits um mehr als 44 % von knapp 84 Mio. t CO₂e auf gut 46 Mio. t CO₂e zurückgegangen. Der historische Rückgang entfällt dabei hauptsächlich auf den Rückgang der Lachgasemissionen der chemischen Industrie (insbesondere bei Adipinsäureproduktion), die um 97 % zurückgegangen sind. Ebenfalls sehr deutlich zurückgegangen sind zwischen 1990 und 2016 die CO₂-Emissionen aus der Eisen- und Stahlproduktion.

Bis 2025 sinken die CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen dann noch deutlich und liegen dann 2025 bei der Hälfte der Emissionen des Jahres 1990. Am stärksten sinken zwischen 2016 und 2025 die CO₂-Emissionen aus der Eisen- und Stahlherstellung.

Zwischen 2025 und 2035 sinken die Emissionen dann nur noch langsam und liegen dann 2035 knapp 53 % niedriger als 1990. Zum einen sinken die CO₂-Emissionen aus Zementproduktion

sowie Eisen- und Stahlherstellung langsam, andererseits steigen einige Emissionen (z.B. CO₂ aus Ammoniakherstellung und N₂O aus Salpetersäure) bedingt durch das Wirtschaftswachstum und sich daraus ergebenden steigenden Produktionsleistungen.

Tabelle 61: Entwicklung der CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Referenzszenario (REF), 1990-2035

	1990	2016	2020	2025	2030	2035
Mio. t CO ₂ e						
Mineralische Industrie (2.A)	23,5	19,6	19,5	18,9	18,1	17,6
<i>Zement (2.A.1)</i>	15,3	12,7	12,7	12,2	11,5	11,0
<i>Kalk (2.A.2)</i>	6,0	4,9	4,8	4,7	4,7	4,7
<i>Glas (2.A.3)</i>	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
<i>Keramik (2.A.4.a)</i>	1,1	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
<i>Sonstige Sodaverwendung (2.A.4.b)</i>	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Chemische Industrie (2.B)	8,1	5,6	5,1	5,2	5,2	5,6
<i>Ammoniak (2.B.1)</i>	6,0	4,2	3,7	3,8	3,8	4,1
<i>Carbid (2.B.5)</i>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Soda (2.B.7)</i>	0,7	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5
<i>Industrieruß (2.B.8)</i>	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0
Metallproduktion (2.C)	25,1	17,1	14,9	13,0	12,0	11,4
<i>Eisen & Stahl (2.C.1)</i>	22,8	16,0	13,7	11,8	10,9	10,3
<i>Ferrolegerungen (2.C.2)</i>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Aluminium (2.C.3)</i>	1,0	0,7	0,8	0,8	0,7	0,8
<i>Blei (2.C.5)</i>	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Zink (2.C.6)</i>	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nichtenergetische Verwendung (2.D)	3,3	2,5	2,9	3,1	3,2	3,3
<i>Schmiermittel (2.D.1)</i>	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
<i>Paraffinwachse (2.D.2)</i>	0,2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
<i>Lösemittel (2.D.3.a)</i>	2,6	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5
<i>AdBlue (2.D.3.d.1)</i>	NA	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2
CO₂-Emissionen gesamt	60,0	44,9	42,4	40,2	38,5	37,9

	1990	2016	2020	2025	2030	2035
CH₄-Emissionen gesamt	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Chemische Industrie (2.B)	21,3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
<i>Salpetersäure (2.B.2)</i>	3,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6
<i>Adipinsäure (2.B.3)</i>	18,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Metallproduktion (2.C)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nichtenergetische Verwendung (2.D)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sonstige Produktherstellung & -verwendung (2.G)	2,0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
N₂O-Emissionen gesamt	23,4	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2
Industrieprozesse (CO₂, CH₄, N₂O) gesamt	83,8	46,5	44,0	41,8	40,2	39,6

Anmerkung: Emissionen, die in der Tabelle als 0,0 Mio. t CO₂e dargestellt sind, existieren, sind aber kleiner als 0,05 Mio. t CO₂e.

Quelle: Darstellung Öko-Institut

5.3.4 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Die für den Industrieprozesse entscheidenden Parameter sind die in Tabelle 45 dokumentierten Produktionsdaten, die sich nicht zwischen den beiden Szenarien unterscheiden. Darüber hinaus wurden, wie auch im Referenzszenario, konstante Emissionsfaktoren angenommen, d.h. die Emissionsfaktoren des Jahres 2016 wurden für die Szenarienjahre fortgeschrieben.

Es gibt keine Maßnahmen, die ausschließlich industrielle CO₂-, CH₄- oder N₂O-Prozessemissionen adressieren. Maßnahme 3.4.4.8 Nationales Dekarbonisierungsprogramm fokussiert prozessbedingte THG-Emissionen insgesamt, die nach heutigem Stand der Technik nicht oder nur schwer vermeidbar sind. Zu maßnahmenspezifischen Annahmen und Parametern siehe daher Kapitel 5.1.3.

5.3.5 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

5.3.5.1 Gesamtergebnisse

Zwischen 1990 und 2016 sind die Kohlendioxid-, Methan- und Lachgasemissionen in Summe bereits um mehr als 44 % von knapp 84 Mio. t CO₂e auf gut 46 Mio. t CO₂e zurückgegangen. Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)) sinken diese Emissionen bis 2030 auf gut 36 Mio. t CO₂e (-57 % ggü. 1990).

Die Emissionsrückgänge entfallen dabei auf CO₂, während die N₂O-Emissionen produktionsbedingt insbesondere bei der Salpetersäureherstellung leicht ansteigend sind. Die CH₄-Emissionen verbleiben auf konstantem Niveau. Die größten CO₂-Emissionsrückgänge zwischen 2016 und 2030 sind bei der Eisen- und Stahlherstellung (-6,6 Mio. t) sowie der Zementproduktion (-2,9 Mio. t) zu verzeichnen. Deutliche absolute Rückgänge gibt es aber auch bei den CO₂-Emissionen aus der Kalkproduktion (-0,8 Mio. t). Im Bereich der Emissionen aus Nichtenergetischer Verwendung von Energieträgern gibt es teilweise ansteigende CO₂-Emissionen, insbesondere

bei Paraffinwachsen. Die übrigen Änderungen der CO₂-Emissionen sind sehr gering, was auch daran liegt, dass die übrigen Emissionsquellen nur eine untergeordnete Bedeutung haben.

Tabelle 62: Entwicklung der CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

	1990	2016	2020	2025	2030	2035
Mio. t CO ₂ e						
Mineralische Industrie (2.A)	23,5	19,6	19,5	18,2	15,7	13,3
<i>Zement (2.A.1)</i>	15,3	12,7	12,7	11,7	9,8	8,0
<i>Kalk (2.A.2)</i>	6,0	4,9	4,8	4,5	4,1	3,6
<i>Glas (2.A.3)</i>	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7
<i>Keramik (2.A.4.a)</i>	1,1	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
<i>Sonstige Sodaverwendung (2.A.4.b)</i>	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Chemische Industrie (2.B)	8,1	5,6	5,1	5,2	5,1	5,5
<i>Ammoniak (2.B.1)</i>	6,0	4,2	3,7	3,8	3,8	4,1
<i>Carbid (2.B.5)</i>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Soda (2.B.7)</i>	0,7	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5
<i>Industrieruß (2.B.8)</i>	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0
Metallproduktion (2.C)	25,1	17,1	13,8	11,3	10,5	9,8
<i>Eisen & Stahl (2.C.1)</i>	22,8	16,0	12,7	10,2	9,3	8,7
<i>Ferrolegerungen (2.C.2)</i>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Aluminium (2.C.3)</i>	1,0	0,7	0,8	0,8	0,7	0,8
<i>Blei (2.C.5)</i>	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Zink (2.C.6)</i>	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nichtenergetische Verwendung (2.D)	3,3	2,5	2,9	3,1	3,2	3,2
<i>Schmiermittel (2.D.1)</i>	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
<i>Paraffinwachse (2.D.2)</i>	0,2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
<i>Lösemittel (2.D.3.a)</i>	2,6	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5
<i>AdBlue (2.D.3.d.1)</i>	NA	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
CO₂-Emissionen gesamt	60,0	44,9	41,4	37,8	34,5	31,9

	1990	2016	2020	2025	2030	2035
CH₄-Emissionen gesamt	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Chemische Industrie (2.B)	21,3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
<i>Salpetersäure (2.B.2)</i>	3,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6
<i>Adipinsäure (2.B.3)</i>	18,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Metallproduktion (2.C)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nichtenergetische Verwendung (2.D)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sonstige Produktherstellung & -verwendung (2.G)	2,0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
N₂O-Emissionen gesamt	23,4	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2
Industrieprozesse (CO₂, CH₄, N₂O) gesamt	83,8	46,5	43,0	39,5	36,2	33,6

Anmerkung: Emissionen, die in der Tabelle als 0,0 Mio. t CO₂e dargestellt sind, existieren, sind aber kleiner als 0,05 Mio. t CO₂e.

Quelle: Darstellung Öko-Institut

5.3.5.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Es gibt keine Maßnahmen, die ausschließlich industrielle CO₂-, CH₄- oder N₂O-Prozessemissionen adressieren. Maßnahme 3.4.4.8 Nationales Dekarbonisierungsprogramm fokussiert prozessbedingte THG-Emissionen insgesamt, die nach heutigem Stand der Technik nicht oder nur schwer vermeidbar sind. Die Effekte dieser Maßnahmen auf Prozessemissionen sind in Abschnitt 5.1.6.2 enthalten.

5.3.6 Vergleich der Szenarien

Im Vergleich der Szenarien zeigt sich, dass die Kohlendioxidemissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung bis 2030 im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) um 4,0 Mio. t stärker sinken als im Referenzszenario (REF). Im Gegensatz dazu hat das Klimaschutzprogramm 2030 nahezu keine Auswirkungen auf die Methan- und Lachgasemissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung. Diese sind in den beiden Szenarien nahezu identisch.

Die CO₂-Emissionen unterscheiden sich zwischen den beiden Szenarien bei der mineralischen Industrie und der Metallproduktion, wohingegen die CO₂-Emissionen aus Industrieprozessen der chemischen Industrie und aus nichtenergetischer Verwendung in beiden Szenarien absolut betrachtet sehr ähnlich sind⁸⁶. In der mineralischen Industrie sind die CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung im Jahr 2030 im KSPr (Jan 2020) um 1,7 Mio. t niedriger als im REF. Die CO₂-Emissionen aus der Kalkherstellung liegen im KSPr (Jan 2020) für die Szenarienjahre 2030 um 0,6 Mio. t niedriger als im REF. Einen kleinen Effekt gibt es darüber hinaus bei der Glasherstellung, wo die Emissionen 2030 um 0,1 Mio. t niedriger liegen als im REF. Im Bereich der Metall-

produktion gibt es zwischen den beiden Szenarien ausschließlich bei der Eisen- und Stahlherstellung Unterschiede, wo die CO₂-Emissionen des Jahres 2030 im KSPR (Jan 2020) um 1,5 Mio. t niedriger liegen als im Referenzszenario.

5.4 Industrieprozesse und Produktverwendung (Fluorierte Treibhausgase)

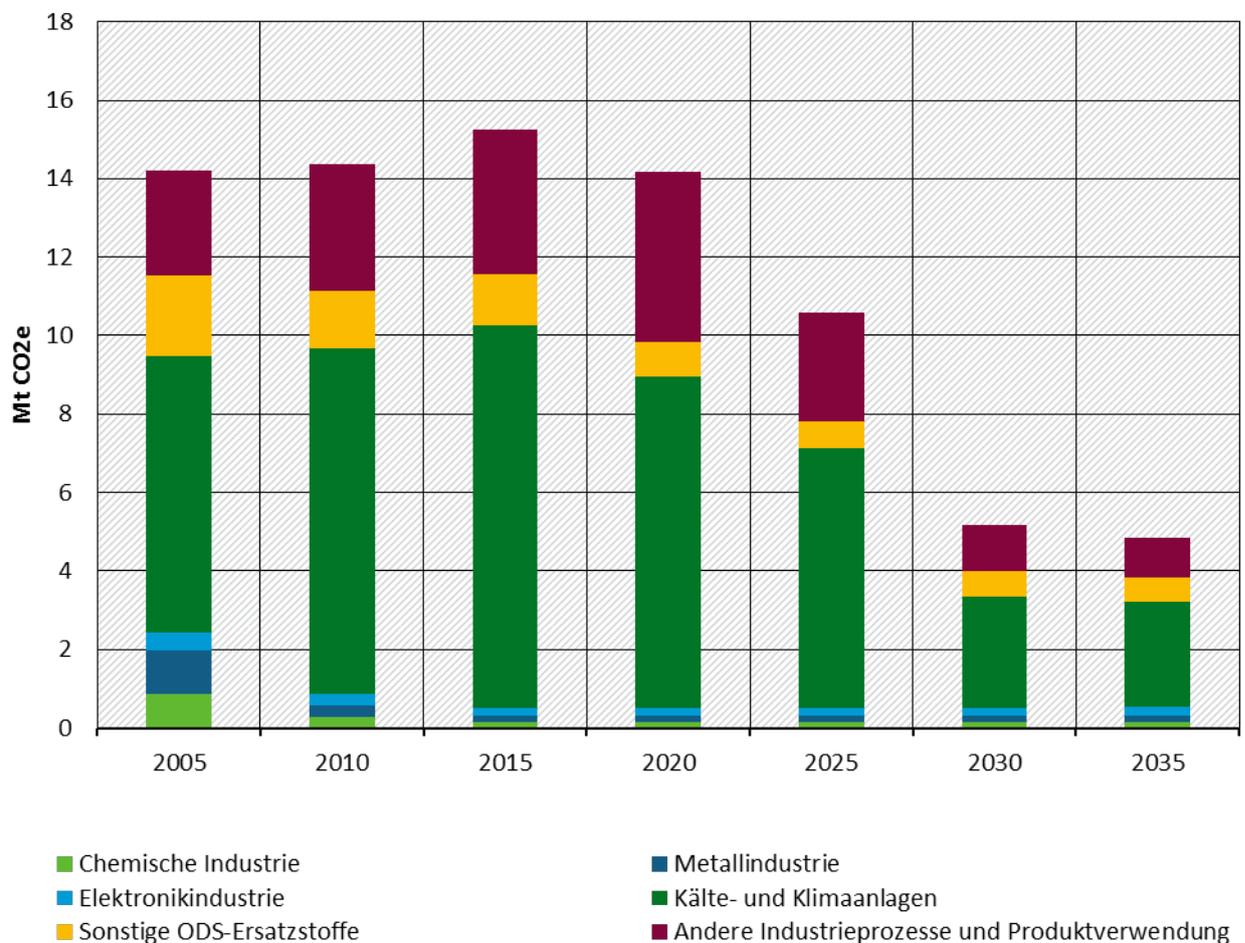
5.4.1 Methodik sowie Annahmen und Parameter im Referenzszenario

Die Methodik sowie die Annahmen und Parameter zum Referenzszenario wurden unverändert dem Projektionsbericht 2019 (Bundesregierung 2019d) entnommen.

5.4.2 Ergebnisse Referenzszenario

Mit dem beschriebenen methodischen Ansatz ergibt sich für das Referenzszenario die in Abbildung 24 und Tabelle 63 gezeigte Emissionsentwicklung für fluorierte Treibhausgase (F-Gase).

Abbildung 24: Entwicklung der Emissionen von F-Gasen im Referenzszenario (REF) nach Quellgruppen, 2005-2035



Anmerkung: ODS: unter dem Montreal-Protokoll adressierte ozonabbauende Stoffe (ozone depleting substances). Einsatzfelder von HFKW als „sonstige“ (d.h. über Kälte- und Klimaanlage hinaus) ODS-Ersatzstoffe sind vor allem Schaumproduktion, Feuerlöschanlagen, medizinische Inhalationssprays und andere Aerosole.

Emissionen aus „anderen“ Industrieprozessen und Produktanwendung sind bis 2025 dominiert von SF₆-Emissionen aus in der Vergangenheit verbauten Schallschutzfenstern

Quelle: 2005 - 2015: (UBA 2018b); 2020 - 2035: Berechnungen des Öko-Instituts

Die Summe der Emissionen der fluorierten Treibhausgase (F-Gase) ist von 2005 bis 2016 auf 8 % über das Niveau von 2005 angestiegen. Ursache waren stetig steigende HFKW-Emissionen von Kälte- und Klimaanlageanlagen sowie SF₆-Emissionen aus alten Schallschutzfenstern bei sinkenden SF₆- und FKW-Emissionen aus der Produktion von fluorierten Chemikalien und der Metallindustrie (Magnesium und Aluminium) sowie sinkenden HFKW-Emissionen aus der Schaumproduktion. Nach 2016 fallen die F-Gas-Emissionen im Referenzszenario bis 2030 deutlich auf 36 % des Niveaus von 2005. Ursachen dieser Emissionsreduktion sind vor allem angesichts MAC-Richtlinie und EU-Phase-down stark sinkenden HFKW-Emissionen aus Kälte- und Klimaanlageanlagen sowie das Auslaufen der SF₆-Emissionen aus in der Vergangenheit verbauten Schallschutzfenstern, deren Neuinstallation schon seit 2008 verboten ist.

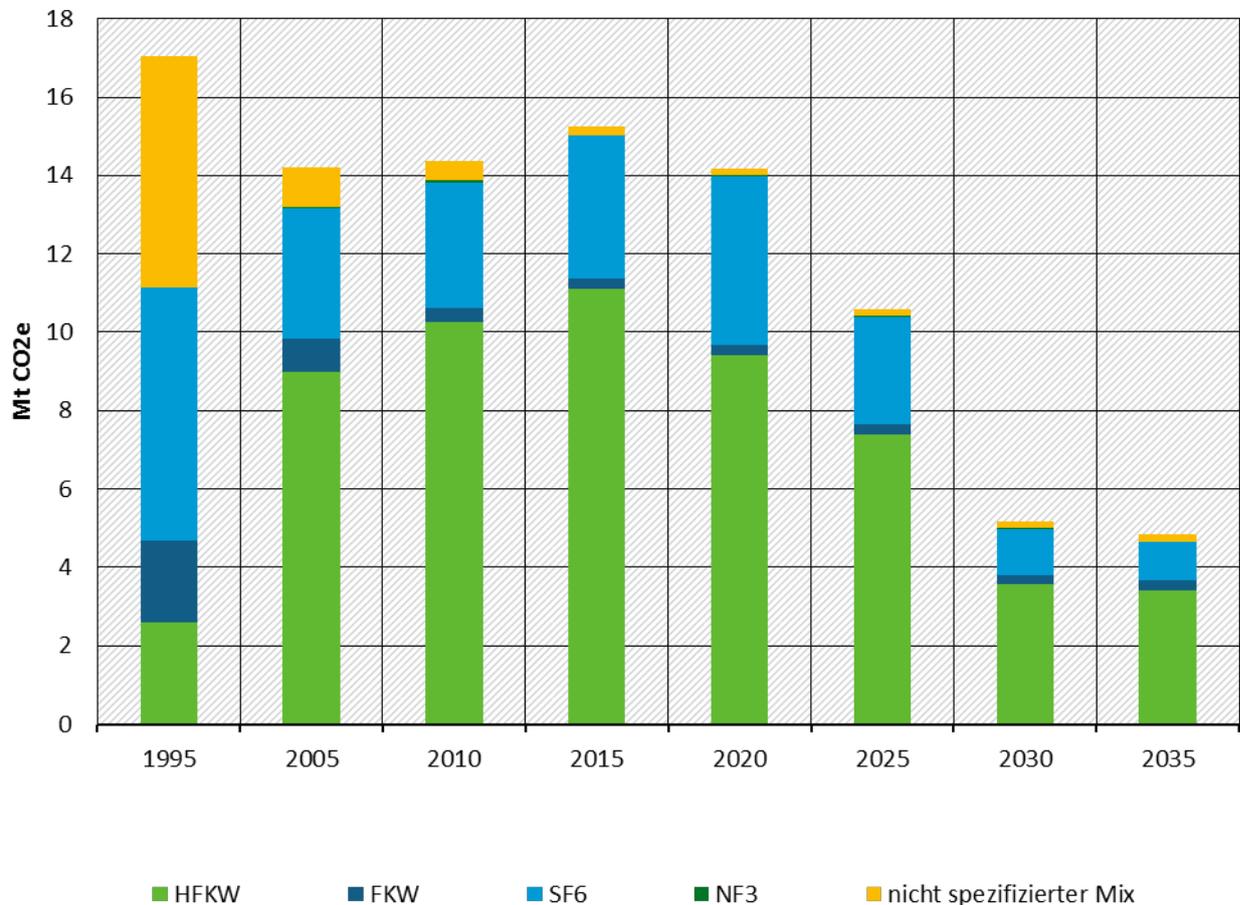
Tabelle 63: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen (fluorierte Treibhausgase) im Referenzszenario (REF), 2005-2035 nach Quellgruppen

Quellgruppe und Gase		2005	2010	2015	2016	2020	2025	2030	2035
		Mio. t CO ₂ e							
Chemische Industrie	HFKW, FKW und SF ₆ aus fluorchemischer Produktion	0,9	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Metallindustrie	FKW aus Primär-Aluminium-Produktion, Einsatz von HFKW und SF ₆ in Aluminium- und Magnesium-Gießereien	1,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Elektronikindustrie	FKW, SF ₆ , NF ₃ und HFKW aus Halbleiter- und Photovoltaikproduktion	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Kälte- und Klimaanlageanlagen	HFKW und geringe Mengen FKW aus stationären und mobilen Kälte- und Klimaanlageanlagen, inklusive Wärmepumpen	7,1	8,8	9,8	9,6	8,4	6,6	2,8	2,7
Sonstige ODS-Ersatzstoffe	HFKW aus Schaumherstellung, Feuerlöschern, Aerosolen und medizinischen Dosiersprays	2,0	1,5	1,3	1,3	0,9	0,7	0,6	0,6
Andere Industrieprozesse und Produktverwendung	SF ₆ , HFKW und FKW aus Schallschutzfenstern, Teilchenbeschleunigern, Produktion optischer Glasfasern, Spürgas, Reifenbefüllung, Radaranlagen, ORC-Anlagen, Schweißen, Sportschuhen, Lösemittelanwendungen und sonstigen medizinischen und kosmetischen Anwendungen	2,7	3,2	3,7	3,9	4,4	2,8	1,2	1,0
Summe fluorierte Treibhausgase		14,2	14,4	15,3	15,3	14,2	10,6	5,2	4,8

Quelle: 2005-2016: (UBA 2018b); 2020-2035: Berechnungen des Öko-Instituts

Eine Darstellung der Emissionsentwicklung im Referenzszenario für fluoridierte Treibhausgase (F-Gase differenziert nach Gasgruppen) wird in Abbildung 25 und Tabelle 64 gezeigt.

Abbildung 25: Entwicklung der Emissionen von F-Gasen im Referenzszenario (REF) nach Gasgruppen



Quelle: 1995 - 2015: (UBA 2018b); 2020 - 2035: Berechnungen des Öko-Instituts

Bis zum Jahr 2030 sinken die Emissionen im Referenzszenario auf ca. 5 Mio. t CO₂e. Dies entspricht einer Reduktion von 70 % gegenüber 1995, dem Basisjahr für F-Gas-Emissionen unter dem Kyoto-Protokoll bzw. 64 % gegenüber 2005. Im Jahr 2020 liegen die Emissionen im Referenzszenario bei rund 14 Mio. t CO₂e, was einem Rückgang von 17 % im Vergleich zum Jahr 1995 entspricht. Durch die verabschiedeten Maßnahmen sinken die Emissionen im Referenzszenario im Fünfjahreszeiträumen zwischen 2020 und 2025 um 25 % und zwischen 2025 und 2030 um 51 %.

Betrachtet man die einzelnen Gasgruppen, ist zu erkennen, dass die Emissionen im Jahr 2030 nur für FKW, SF₆ und den nicht spezifizierten Mix niedriger als 1995 liegen. Die in 1995 besonders relevanten Emissionen des ‚nicht spezifizierten Mixes‘ sind allerdings laut (UBA 2018c) im wesentlichen HFKW-Emissionen aus der fluorchemischen Industrie, so dass inklusive der HFKW im vertraulichen ‚nicht spezifizierten Mix‘ die HFKW-Emissionen 2030 auch unterhalb von 1995 liegen.

Die Zeit zwischen 1995 und 2015 war von einer starken Zunahme der HFKW-Verwendung und HFKW-Emissionen bei gleichzeitigem Rückgang der Emissionen and FKW und SF₆ geprägt. Bis

2030 sind vor allem für HFKW und SF₆ deutliche Emissionsreduktionen zu erwarten. NF₃-Emissionen spielen im Vergleich zu den anderen fluorierten Treibhausgasen quantitativ keine Rolle. Die HFKW-Emissionen machen seit 2005 den Großteil an den Gesamtemissionen aus, 2016 lag der Anteil bei 72 %, im Jahr 2030 liegt ihr Anteil im Referenzszenario bei 71 %.

Haupttreiber für die zukünftige Entwicklung der F-Gas-Emissionen in Deutschland sind zum einen die EU-weite Mengenbeschränkung im Einsatz von HFKW und zum anderen die fortlaufende Wirkung des ebenfalls EU-weiten Verbotes, SF₆ in Schallschutzfenstern einzusetzen.

Tabelle 64: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen (fluorierte Treibhausgase) aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Referenzszenario (REF) zwischen 1990 und 2035 nach Gasgruppen

	1990	1995	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e								
HFKW-Emissionen	0,1	2,6	9,0	10,3	11,0	9,4	7,4	3,6	3,4
FKW-Emissionen	3,1	2,1	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
SF ₆ -Emissionen	4,4	6,5	3,3	3,2	3,9	4,3	2,7	1,2	1,0
NF ₃ -Emissionen	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nicht spezifizierter Mix	5,8	5,9	1,0	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Summe F-Gase	13,4	17,1	14,2	14,4	15,3	14,2	10,6	5,2	4,8
	Veränderung ab 1995 ^a in %								
Summe F-Gase			-16,7	-15,8	-10,3	-16,8	-37,9	-69,9	-71,6
	Veränderung ab 2005 in %								
Summe F-Gase				1,1	7,7	-0,2	-25,4	-63,5	-65,9

Anmerkung: ^a Für die F-Gase HFKW, FKW, SF₆, NF₃ sowie nicht spezifizierter Mix ist 1995 das Basisjahr im Rahmen der Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls.

Quelle: (UBA 2018b), Modellrechnungen Öko-Institut

5.4.3 Annahmen und Parameter sowie Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) und Vergleich der Szenarien

Im Klimaschutzprogramm 2030 sind keine Maßnahmen enthalten, die auf fluorierte Treibhausgase abzielen. Deshalb entspricht für F-Gase das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 dem Referenzszenario.

5.5 Gesamtergebnisse Industrie

Im Folgenden werden die Resultate für den Sektor Industrie zusammengefasst. Sowohl für das Referenzszenario als auch für das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 wird die zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den verschiedenen Kategorien des Sektors dargestellt und diskutiert.

5.5.1 Referenzszenario

Der Industriesektor umfasst verbrennungsbedingte Emissionen (Verarbeitendes Gewerbe (Industriekraftwerke und -kessel, Prozessfeuerungen) und bauwirtschaftlicher Verkehr) sowie Prozessemissionen und Emissionen aus der Produktnutzung (Tabelle 65).

Während in den vergangenen zehn Jahren in etwa konstante Treibhausgasemissionen in der Industrie zu verzeichnen sind, wird im Referenzszenario von zukünftig kontinuierlich fallenden Emissionen ausgegangen. Den größten Teil der Emissionsminderungen machen die energiebedingten Emissionen aus (v.a. Verarbeitendes Gewerbe). Diese fallen im Referenzszenario von 2016 bis 2030 um etwa 19 Mio. t CO₂e, was auf Maßnahmen wie den Emissionshandel, Effizienzmaßnahmen und der Richtlinie zur Abwärmevermeidung zurückzuführen ist. Treiber, die sich auf den Stromsektor und damit zum Teil auch auf die Industriekraftwerke beziehen, können Abschnitt 5.2 entnommen werden. Gleichzeitig trägt auch eine leichte Strukturverschiebung der Industrie hin zu höheren Anteilen von Sekundärproduktion wie z.B. Elektrostahl zur Emissionsminderung bei.

Die Effizienzmaßnahmen führen auch zu deutlichen Stromeinsparungen, welche sich sowohl in der Emissionsbilanz der Energiewirtschaft als auch der Industrie (im Bereich der Industriekraftwerke) niederschlagen.

Die Prozessemissionen in der mineralischen Industrie und Metallproduktion sinken im Referenzszenario, wobei die weiteren Reduktionsmöglichkeiten bei den verwendeten Prozessen begrenzt sind bzw. im Fall der Stahlherstellung einen Prozesswechsel verlangen. Dieser findet im Referenzszenario von Oxygenstahl hin zu Elektrostahl, der auf Recycling basierten Stahlroute, statt. In der chemischen Industrie ist durch eine Ausweitung der Produktionsmengen ein leichter Anstieg der Emissionen zu verzeichnen. In der chemischen Industrie ist durch eine Ausweitung der Produktionsmengen ebenfalls ein leichter Anstieg der Emissionen zu verzeichnen.

Tabelle 65: Treibhausgasemissionen der Industrie im Referenzszenario (REF), 1990-2035⁸⁷

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Verarbeitendes Gewerbe (ohne bauwirtschaftlichen Verkehr)	183,0	112,5	122,3	123,1	114,8	109,2	104,5	101,2
Bauwirtschaftlicher Verkehr	3,7	2,8	2,8	3,3	3,2	2,9	2,6	2,3
Mineralische Industrie	23,5	20,3	19,2	19,6	19,5	18,9	18,1	17,6
Chemische Industrie	35,5	18,2	10,5	6,9	6,4	6,5	6,6	7,0
Metallproduktion	28,2	22,3	16,7	17,3	15,1	13,2	12,2	11,6
Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln	3,3	2,6	2,7	2,6	2,9	3,1	3,2	3,3
Elektronik-Industrie	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Anwendung als ODS-Ersatzstoff	0,0	9,1	10,3	10,9	9,3	7,3	3,5	3,3

⁸⁷ Bei den ersten beiden Kategorien handelt es sich um energiebedingte Emissionen, während sich die restlichen Kategorien auf prozessbedingte Emissionen beziehen.

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Sonstige Produktherstellung und -Verwendung	6,1	2,9	3,4	4,2	4,7	3,1	1,5	1,3
Andere Bereiche	0,3	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gesamt	283,8	191,6	188,5	188,2	176,2	164,5	152,4	147,9
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz					186,0	163,0	140,0	
Abweichung vom Sektorziel*					-9,8	1,5	12,4	

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

Die Emissionen aus der nichtenergetischen Verwendung von Brennstoffen und aus Lösemitteln nahmen nach 1990 ab. Ursache war hier vor allem ein deutlicher Rückgang der Emissionen aus Lösemittelverwendung. Bis zum Jahr 2035 werden diese Emissionen im Referenzszenario annähernd auf das ursprüngliche Niveau ansteigen, hauptsächlich aufgrund des Trends zu steigenden Emissionen aus Paraffinwachsen.

Die Emissionen fluorierter Gase⁸⁸ sinken im Referenzszenario nach 2016 deutlich. Ursachen sind vor allem die angesichts der MAC-Richtlinie (mobile air condition systems (Kältemittel in mobilen Klimaanlage)) und der F-Gas-Verordnung sinkenden HFKW-Emissionen aus Kälte- und Klimaanlage sowie die Reduktion von Schwefelhexafluoridmissionen in der Elektronikindustrie.

Das Referenzszenario entspricht im Wesentlichen dem MMS des Projektionsberichts 2019 (Bundesregierung 2019d). Kleine Änderungen wurden lediglich im Bereich der Industriekraftwerke vorgenommen (siehe Abschnitt 5.2).

5.5.2 Szenario Klimaschutzprogramm 2030

Die Emissionen der Industrie im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Tabelle 66) nehmen kontinuierlich ab und liegen im Jahr 2030 9 Mio. t CO₂e unter denen des Referenzszenarios. Es ergeben sich insbesondere Unterschiede bei den energiebedingten Emissionen sowie den prozessbedingten Emissionen der Stahl- sowie der mineralischen Industrie (Zement). Der Unterschied zwischen dem Referenzszenario und dem Szenario Klimaschutzprogramm 2030 ist auf Maßnahmen in den Bereichen Energieeffizienz, Brennstoffwechsel, Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft sowie die Einführung neuer CO₂-armer Produktionsverfahren und CO₂-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung zurückzuführen. Die Einführung des CO₂-Preises für den nicht-ETS-Teil der Industrie bewirkt einen verstärkten Brennstoffwechsel von fossilen Energieträgern hin zu biogenen Energieträgern. Die Kombination aus Strompreisreduktion durch die Senkung der EEG-Umlage und CO₂-Preis reicht jedoch nicht aus, um eine Elektrifizierung der Prozesswärme wirtschaftlich attraktiv zu machen.

Des Weiteren wirken sich Maßnahmen im Stromsektor (Abschnitt 4.1) zum Teil auch auf Industriekraftwerke aus und sind damit auch in der Industrie wirksam.

In Summe belaufen sich die Emissionen der Industrie im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 im Jahr 2030 auf 143,4 Mio. t CO₂e. Damit wird das Sektorziel des Klimaschutzgesetzes von 140

⁸⁸ Diese fallen in den Kategorien chemische Industrie, Metallproduktion, Elektronik-Industrie, Anwendung als ODS-Ersatzstoff, sonstige Produktherstellung und -verwendung sowie andere Bereiche an.

Mio. t CO₂e geringfügig verfehlt. Es ist zu bedenken, dass bei der Maßnahmenwirkung und -ausgestaltung sowie insbesondere bei den hinterlegten Produktionsmengen große Unsicherheiten vorliegen. Im Rahmen dieser Unsicherheiten ist sowohl eine Zielüberfüllung als auch eine Zielverfehlung möglich.

Wenngleich im Referenzszenario bereits aufgrund einer Vielzahl von umgesetzten Maßnahmen ein ambitionierter Effizienzfortschritt hinterlegt ist, so steigt dieser aufgrund zusätzlicher Maßnahmen weiter. Zusätzlich wurde eine stärkere Förderung erneuerbarer Energien für die Prozesswärmeerzeugung angenommen.

Der Stromverbrauch verringert sich im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 durch die Effizienz-Maßnahmen leicht. Gleichzeitig entsteht durch die Umstellung von Prozessen in der Chemie und Stahlproduktion (z.B. Eisenerz-Direktreduktion mit Wasserstoff) ein zusätzlicher Bedarf an Wasserstoff, welcher als zusätzliche Stromnachfrage abgebildet wird (Tabelle 26). Die entsprechenden Änderungen der Treibhausgasemissionen werden emissionsseitig in der Energiewirtschaft (öffentliche Kraftwerke) und in der Industrie (Industriekraftwerke) bilanziert.

Die Treibhausgasemissionen der Kategorien „Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und Lösemitteln“ bis „Andere Bereiche“ im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sind unverändert im Vergleich zum Referenzszenario.

Tabelle 66: Treibhausgasemissionen der Industrie im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Verarbeitendes Gewerbe (ohne bauwirtschaftlichen Verkehr)	183,0	112,5	122,3	123,1	114,6	107,7	99,4	92,3
Bauwirtschaftlicher Verkehr	3,7	2,8	2,8	3,3	3,2	2,9	2,6	2,3
Mineralische Industrie	23,5	20,3	19,2	19,6	19,5	18,2	15,7	13,3
Chemische Industrie	35,5	18,2	10,5	6,9	6,4	6,5	6,6	7,0
Metallproduktion	28,2	22,3	16,7	17,3	14,0	11,5	10,6	10,0
Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln	3,3	2,6	2,7	2,6	2,9	3,1	3,2	3,2
Elektronik-Industrie	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Anwendung als ODS-Ersatzstoff	0,0	9,1	10,3	10,9	9,3	7,3	3,5	3,3
Sonstige Produktherstellung und -Verwendung	6,1	2,9	3,4	4,2	4,7	3,1	1,5	1,3
Andere Bereiche	0,3	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gesamt	283,8	191,6	188,5	188,2	174,9	160,7	143,4	133,0
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz					186,0	163,0	140,0	
Abweichung vom Sektorziel*					-11,1	-2,3	3,4	

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

Insgesamt ist für die Interpretation der Ergebnisse und besonders der zusätzlichen Minderungswirkung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 zu beachten, dass viele Maßnahmen noch nicht endgültig ausgestaltet sind und Annahmen zur Umsetzung getroffen werden mussten. Für alle Maßnahmen wird davon ausgegangen, dass diese zielgerichtet auf eine effektive Industriedekarbonisierung umgesetzt werden. Die heißt für Maßnahmen im Bereich Materialeffizienz, dass sie auf CO₂-intensive Bauprodukte fokussieren oder für Dekarbonisierungsprogramm und Innovationsfonds, dass Schlüsseltechnologien der Industriedekarbonisierung im industriellen Maßstab die Markteinführung finden. Ein Beispiel ist hier die Stahlherstellung mittels Direktreduktion unter Einsatz von Wasserstoff auf Basis erneuerbaren Stroms. Fällt die Umsetzung der Maßnahmen weniger ambitioniert aus, so ist entsprechend die Minderungswirkung des Szenarios niedriger einzuschätzen. Hinzu kommen Unsicherheiten in Bezug auf die wirtschaftliche Entwicklung der Industrie (Bruttowertschöpfung und Produktionsmengen der Grundstoffe), insbesondere im Bereich der CO₂-intensiven Grundstoffe, aber auch bezogen auf die bereits im Referenzszenario implementierten Maßnahmen.

5.5.3 Vergleich der Szenarien

Tabelle 67 zeigt einen Vergleich der CO₂-, CH₄-, N₂O- und THG-Emissionen der Industrie zwischen dem Referenzszenario und den Szenario Klimaschutzprogramm 2030.

Die CO₂-Emissionen nehmen den Hauptteil der gesamten THG-Emissionen ein, da verbrennungsbedingte Emissionen den Großteil der Gesamtemissionen ausmachen (Tabelle 65 und Tabelle 66) und die CO₂-Emissionen sich direkt aus dem Kohlenstoffanteil des Brennstoffs (v.a. Kohle, Erdgas) ergeben. CO₂ macht im Jahr 2030 in beiden Szenarien 95 % der gesamten THG-Emissionen aus. CH₄, N₂O sowie F-Gase machen nur einen kleinen Teil der Gesamtemissionen aus.

Die gesamten THG-Emissionen sinken im Referenzszenario von 283,8 Mio. t CO₂e im Jahr 1990 auf 152,4 Mio. t CO₂e im Jahr 2030 und damit um 46,3 %. Die Minderung gegenüber 2005 beläuft sich auf 20,4 %. Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sinken die Emissionen bis 2030 auf 143,4 Mio. t CO₂e und damit um 49,5 % gegenüber 1990 bzw. 25,2 % gegenüber 2005.

Tabelle 67: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Sektor Industrie zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
CO₂-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	245,1	167,2	170,7	170,2				
REF					159,4	151,3	144,7	140,5
KSPr (Jan 2020)					158,2	147,6	135,7	125,7
CH₄-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	0,6	0,8	0,8	0,8				
REF					0,8	0,8	0,8	0,8
KSPr (Jan 2020)					0,8	0,8	0,7	0,7
N₂O-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	24,7	9,3	2,7	1,9				
REF					1,8	1,8	1,8	1,9
KSPr (Jan 2020)					1,8	1,8	1,8	1,8
HKW-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	0,1	9,0	10,3	11,0				
REF					9,4	7,4	3,6	3,4
KSPr (Jan 2020)					9,4	7,4	3,6	3,4
FKW-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	3,1	0,8	0,3	0,3				
REF					0,3	0,3	0,3	0,3
KSPr (Jan 2020)					0,3	0,3	0,3	0,3
SF₆-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	4,4	3,3	3,2	3,9				
REF					4,3	2,7	1,2	1,0

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
KSPr (Jan 2020)					4,3	2,7	1,2	1,0
NF₃-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	0,0	0,0	0,1	0,0				
REF					0,0	0,0	0,0	0,0
KSPr (Jan 2020)					0,0	0,0	0,0	0,0
Nicht spezifizierter Mix								
Entwicklung 1990 – 2016	5,8	1,0	0,5	0,2				
REF					0,2	0,2	0,2	0,2
KSPr (Jan 2020)					0,2	0,2	0,2	0,2
Summe THG-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	283,8	191,6	188,5	188,2				
REF					176,2	164,5	152,4	147,9
KSPr (Jan 2020)					174,9	160,7	143,4	133,0
Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 1990 in %							
Entwicklung 1990 – 2016		-32,5	-33,6	-33,7				
REF					-37,9	-42,0	-46,3	-47,9
KSPr (Jan 2020)					-38,4	-43,4	-49,5	-53,1
Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 2005 in %							
Entwicklung 2005 – 2016			-1,6	-1,8				
REF					-8,0	-14,1	-20,4	-22,8
KSPr (Jan 2020)					-8,7	-16,1	-25,2	-30,6

Anmerkung: Emissionen, die in der Tabelle als 0,0 Mio. t CO₂e dargestellt sind, existieren, sind aber kleiner als 0,05 Mio. t CO₂e.

Quelle: (UBA 2018b, 2018c), Modellrechnungen Öko-Institut

6 Projektionen Sektor Gebäude

In diesem Kapitel wird die Modellierung der Treibhausgasemissionen im KSP-Sektor Gebäude dargestellt. Dieser Sektor umfasst alle Emissionen der CRF-Kategorien 1.A.4.a (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) und 1.A.4.b (Haushalte) (Tabelle 6). Sowohl im GHD-Sektor als auch im Haushalts-Sektor gibt es Wärmebedarf zur Gebäudeheizung. Dieser entfällt auf Wohngebäude (Haushalte) und Nichtwohngebäude (GHD). Die Modellierung des Wärmebedarfs und der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen wird in Abschnitt 6.2 beschrieben. In Haushalten entfällt weiterer Energiebedarf auf Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung (Abschnitt 6.3). Beim weit überwiegenden Teil der Geräte handelt es sich um Elektrogeräte. Aus diesem Grund werden lediglich die Stromverbräuche ausgewiesen. Diese Stromnachfrage führt zu Treibhausgasemissionen im Stromsektor, die in der Energiewirtschaft (Kapitel 4) bilanziert werden. Lediglich ein kleiner Teil der Haushaltsgeräte führt zu Brennstoffverbrauch und damit Treibhausgasemissionen, die im Gebäudesektor bilanziert werden (v.a. Gas-Herde). Ein weiterer Energieverbrauch jenseits der Gebäudewärme ergibt sich im GHD-Sektor (Abschnitt 6.4). Hierunter fällt beispielsweise der Brennstoffverbrauch in Kesseln für die Erzeugung von Prozesswärme. Die entsprechenden Treibhausgasemissionen werden im Gebäudesektor bilanziert. Des Weiteren gibt es zahlreiche Anwendungen, die Strom verbrauchen (z.B. Beleuchtung oder Kühlung). Die entsprechenden Stromverbräuche werden in diesem Abschnitt ebenfalls ermittelt. Die sich aus der Stromnachfrage ergebenden Treibhausgasemissionen fallen in der Energiewirtschaft (Kapitel 4) an und werden dort bilanziert.

6.1 Übergreifende Rahmendaten

6.1.1 Anzahl privater Haushalte

Die Anzahl der privaten Haushalte wird auf Basis von Annahmen zur Entwicklung der Haushaltsgröße (Anzahl der Personen pro Haushalt) aus den im Szenario verwendeten Rahmendaten zur Bevölkerungsentwicklung (Abschnitt 3.1.1) berechnet. Letztere leiten sich aus den aktuellen Angaben und der Bevölkerungsvorausberechnung ab (StBA 2017b). Wie in Abschnitt 3.1.1 diskutiert, weichen die EU-Guidelines 2018 der Europäischen Kommission von diesen Zahlen ab. Neben der Bevölkerungsvorausberechnung, die unter den nationalen Prognosen liegt, wurden ebenfalls Annahmen über die Haushaltsgröße getroffen. Danach würde diese für Deutschland von 2,2 Personen pro Haushalt im Jahr 2000 auf 2,0 Personen pro Haushalt im Jahr 2010 sinken und danach konstant bleiben. Tatsächlich sank die mittlere Haushaltsgröße erstmalig im Jahr 2015 auf 2,0 ab. Des Weiteren weichen diese Annahmen zur Entwicklung der Haushaltsgröße und der daraus berechneten Anzahl der Haushalte von nationalen Prognosen ab, auf deren Grundlage auch die Abschätzungen zur Haushaltsentwicklung im Projektionsbericht 2015 basierten (siehe u.a. Prognos AG et al. 2010, BBSR 2015). Nationale Prognosen gehen von einem weiteren Rückgang der Anzahl der Personen pro Haushalt nach 2010 aus, was – basierend auf den gleichen Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung – zu einem leichten Anstieg der Anzahl der Haushalte in Deutschland bis 2035 führt und nicht – wie im EU-Referenzszenario angenommen – zu einem leichten Rückgang (Tabelle 68).

Tabelle 68: Vergleich der Anzahl privater Haushalte verschiedener Quellen

	Quelle	2000	2010	2020	2030	2035
Bevölkerung (Mio.)	EU Guidance 2018	82,2	81,8	80,6	79,7	78,8
Haushaltsgröße	EU-Referenzszenario 2016	2,2	2,0	2,0	2,0	2,0
Anzahl Haushalte (Mio.)	Berechnung auf Basis EU-Referenzszenario 2016/2018	37,4	40,9	40,3	39,9	39,4
Bevölkerung (Mio.)	StBA 2016, 2017	82,2	81,8	83,2	82,6	81,9
Haushaltsgröße	Projektionsbericht 2019 / Politiksznarien IX (basierend auf nationalen Prognosen)	2,17	2,07	1,97	1,93	1,90
Anzahl Haushalte (Mio.)	Eigene Berechnung	37,9	39,5	42,2	42,8	43,1

Anmerkung: fettgedruckt: für den Projektionsbericht 2019 und Politiksznarien IX verwendete Daten

Im Jahr 2035 ergibt sich durch die unterschiedlichen Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung (78,8 Mio. gegenüber 81,9 Mio.) und zur Haushaltsgröße (2,0 gegenüber 1,9 Personen pro Haushalt) eine Differenz in der Anzahl privater Haushalte von 3,7 Millionen (Tabelle 68). Da der Strombedarf privater Haushalte stark mit der Anzahl privater Haushalte korreliert, hat dies auch einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung des zukünftigen Strombedarfs. Da die nationalen Prognosen zur Entwicklung der Haushaltsgröße und der Anzahl der privaten Haushalten aus Sicht der Autoren realistischer erscheinen als die Annahmen im EU-Referenzszenario, wird für den Projektionsbericht 2019 auf die nationalen Prognosen zurückgegriffen, die auch im Projektionsbericht 2015 und 2017 verwendet wurden (fettgedruckt in Tabelle 68).

6.1.2 Wohnfläche und Entwicklung der Nutzfläche in Nichtwohngebäude

Neben den Energiepreisen ist die Entwicklung der Wohnflächen ein zentraler Treiber für den Energiebedarf im Gebäudebereich. In der Modellierung werden die Flächenentwicklungen als exogener Parameter berücksichtigt. Darauf basierend werden modellendogen die jährlichen Neubauten und Gebäudeabriss berechnet. Die angenommene Wohnflächenentwicklung ergibt sich aus der Bevölkerungsentwicklung und der Entwicklung der spezifischen Wohnflächen pro Einwohner, die einen gegenläufigen Trend folgen. Die Rahmendaten werden dabei aus den Rahmendaten des Impact Assessments (Öko-Institut et al. 2019) angesetzt mit einer Fortschreibung bis 2035.

Ausgehend von einer Gesamtwohnfläche aller Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden von 3,85 Mrd. m² in 2017 bzw. 3,88 Mrd. m² in 2018 (StaBuA 2019) zeigt Tabelle 69 den resultierenden Nettozuwachs pro Jahr sowie die absolute Wohnflächen.

Tabelle 69: Angenommenen Entwicklung der Wohnflächen bis zum Jahr 2035

	2017	2020	2025	2030	2035
Wohnfläche gesamt in Wohn- und Nichtwohngebäuden nach StatBA (Mio. m ²)	3.851	3.917	4.040	4.106	4.257
Spez. Wohnfläche in Wohn- und Nichtwohngebäuden, bewohnt (m ² /Kopf)	45,1	45,6	47,2	48,5	50,4
Wohnfläche in Wohn- und Nichtwohngebäuden, bewohnt, gesamt (Mio. m²)	3.734	3.810	3.930	4.020	4.130

Quelle: Impact Assessment der Ziele im *Klimaschutzplan 2050* (Öko-Institut et al. 2019)

Der Flächenzuwachs durch Zubau von Nichtwohngebäuden wird aus der Neubau- und Abrissstatistik (Destatis Fachserie 5 – Reihe 1) ermittelt. Nach der Statistik ist der Zubau der beheizten Nichtwohngebäude relativ konstant und wird daher über die Simulationsperiode fortgeschrieben. Der jährliche Nutzflächenzubau der Nichtwohngebäude beträgt dabei 12,5 Millionen m². Bei einem Abriss von jährlich rund 2,2 Millionen m² ergibt sich ein Nettozuwachs der Nutzfläche von 10,3 Millionen m²/Jahr.

Als Input für die Modellrechnung dient die Entwicklung des Gesamtbestandes. Das verwendete Gebäudemodell errechnet endogen Abriss- und Neubau in Abhängigkeit des Baualters der Referenzgebäude.

6.2 Wärmebedarf im Gebäudebereich

6.2.1 Methodik

Für die Berechnung der Szenarien und die Wirkungsabschätzung der Einzelinstrumente werden unterschiedliche Methoden angewendet. Zur Ermittlung der Wärmebedarfsentwicklung und der eingesetzten Technologien bis zum Jahr 2035 wird das Simulationsmodell Invert/EE-Lab eingesetzt. Daneben wird die Wirkung ausgewählter wirkmächtiger Einzelinstrumente über einen bottom-up-Ansatz abgeschätzt, der auf der Skalierung von Instrumentenindikatoren wie Förderolumina und spezifischen Einsparungen basiert.

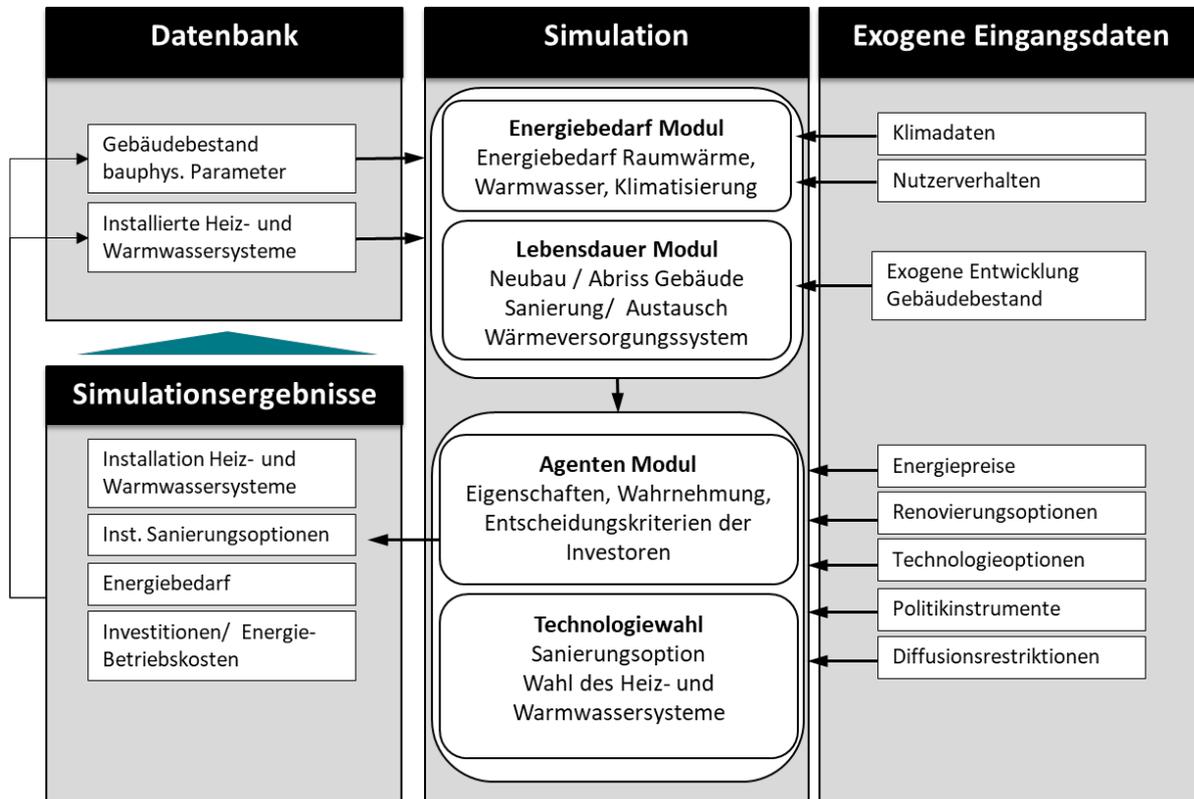
Sektormodellierung des Gebäudebestands

Das Modell Invert/EE-Lab ist von der Energy Economics Group der Technischen Universität Wien entwickelt worden und wird gemeinsam mit dem Fraunhofer ISI und IREES in vielen nationalen und europäischen Projekten eingesetzt und weiterentwickelt.

Methodisch stellt Invert/EE-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, technoökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in Jahresschritten abgebildet werden können (Abbildung 26). Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt. Die

Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotentialen ermittelt (vgl. Kranzl et al. 2013; Müller 2015; Müller und Biermayr 2011; Steinbach 2013, 2015). Die exogenen Eingangsdaten werden im Modell jahresscharf vorgegeben. Für die Darstellung der Entwicklung der Wohnfläche und Energiepreise siehe Kapitel 3 und Kapitel 6.1. Die Klimadaten werden in dem Szenario konstant gehalten.

Abbildung 26: Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab



Quelle: (Steinbach 2015, 2016)

Mit INVERT/EE-Lab ist es möglich, die Auswirkung unterschiedlicher Politikinstrumente und Ausgestaltungsvarianten auf den Ausbau der erneuerbaren Energien im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren. Für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes erneuerbarer Energien im Gebäudebereich werden u.a. folgende relevante Zusammenhänge im Modell abgebildet:

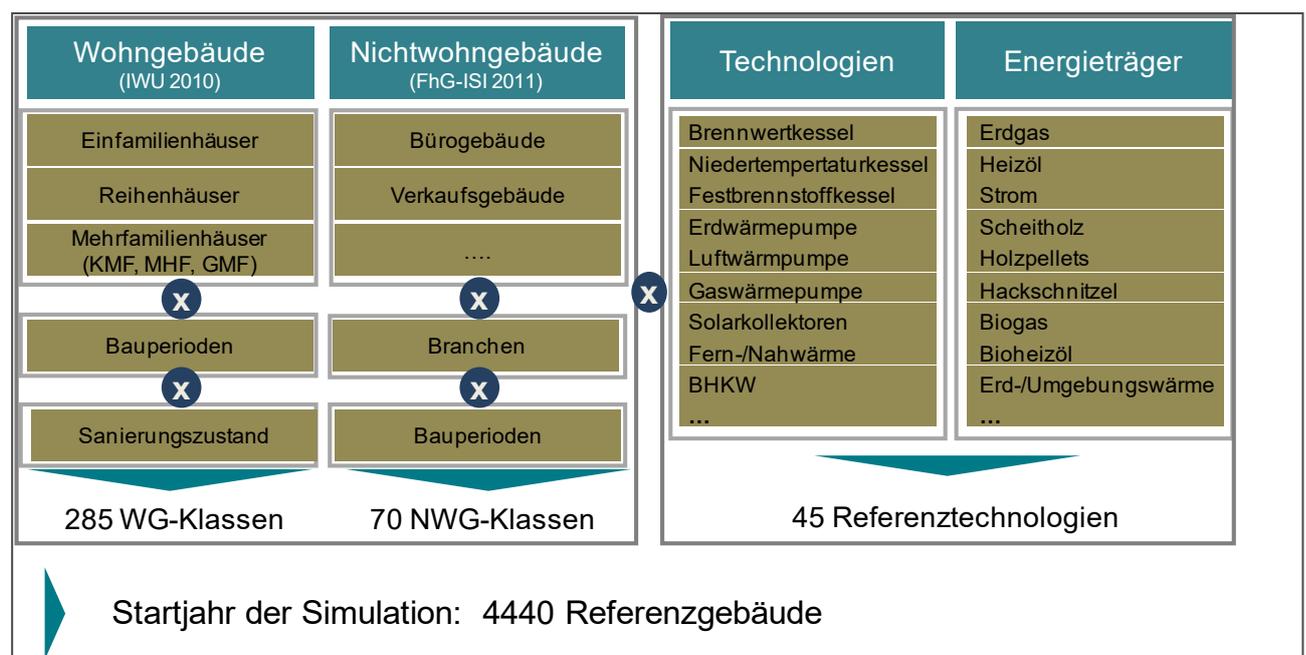
- Berücksichtigung investorenspezifischer Hemmnisse und Kalküle bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen.
- Das Temperaturniveau des Wärmeverteilungssystems wird in der Simulation berücksichtigt, hier besonders die Interaktion zwischen diesem und den Wirkungsgraden bzw. Arbeitszahlen der Bereitstellungstechnologien. Dies ist in besonderem Maße für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes von Wärmepumpen in älteren Gebäuden von Bedeutung.
- Die Modellierung der Energiebereitstellung aus solarthermischen Anlagen erfolgt auf monatlicher Basis unter Berücksichtigung der entsprechenden solaren Einstrahlung. Zudem wird entsprechend der Geometrie der Referenzgebäude, die den solarthermischen Anlagen zur Verfügung stehende Dachfläche im Modell berücksichtigt.

- d) Politikinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Effizienzmaßnahmen wie Investitionszuschüsse (Marktanreizprogramm), Nutzungspflichten (EEWärmeG) oder haushaltsunabhängige Umlagesysteme werden technologie- und gebäudespezifisch (Neubau, Bestand, öffentliche Gebäude) definiert.

Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung der Limitierung erneuerbarer Energieträger über definierte Kostenpotenziale inklusive deren Entwicklung über den Simulationszeitraum.

Der Gebäudebestand der Sektoren private Haushalte und GHD in Deutschland wird im Modell detailliert abgebildet. Der Bestand wird für das Startjahr der Simulation in 4.440 unterschiedliche Referenzgebäude unterschieden, wobei ein Referenzgebäude eine Verschneidung von Gebäudetyp, Baualter und Sanierungszustand sowie derzeit eingesetztem Heizungssystem entspricht (siehe Abbildung 27). Dies erlaubt die Berücksichtigung gebäude- und technologiespezifischer Faktoren bei der Simulation der Technologiewahl auf einem sehr disaggregierten Niveau.

Abbildung 27: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/EE-Lab



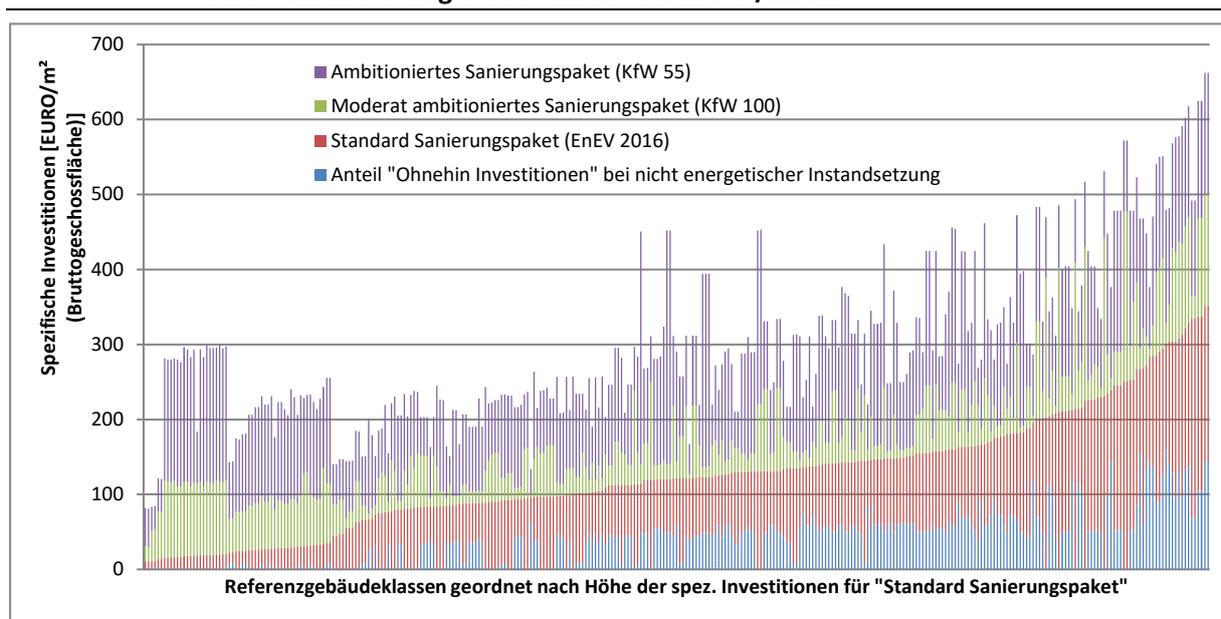
Quelle: Eigene Abbildung IREES

Derzeit werden 45 verschiedene Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser unterschieden, welche über detaillierte technische und ökonomische Daten abgebildet werden. Die Referenzgebäudetypologie mit den entsprechenden Zuordnungen von Gebäuden und Technologien wird auf Basis der Erhebungen „Datenbasis Wohngebäude“ (Diefenbach et al. 2010) sowie der Gebäudetypologie von Nichtwohngebäuden aus der Studie „Energieverbrauch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (Schloman et al. 2014) ermittelt. Damit wird der Gebäudebestand in Deutschland zum Jahr 2008 abgebildet, welches das Basisjahr der Simulation darstellt. Der aus der Modellrechnung resultierende Energiebedarf ist auf die temperaturbereinigten Werte der Anwendungsbilanzen sowie der EE-Wärmebereitstellung nach AGEE-Stat kalibriert.

Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle werden im Modell nicht als Einzelmaßnahmen abgebildet, sondern durch Effizienzmaßnahmenpakete, die spezifisch für jedes Referenzgebäude ermittelt werden und zur Sanierung auf verschiedenen Effizienzstandards führen (Steinbach 2015, 2016). Die zu erreichenden Standards werden jeweils über den spezifischen auf die wärmeübertragende Gebäudefläche bezogenen Transmissionswärmekoeffizienten (h_t) definiert, der sich

aus den Bauteilanforderungen von Anlage 3 ergibt. Die mit den Effizienzmaßnahmenpaketen verbundenen Investitionen hängen maßgeblich vom energetischen Ausgangszustand des jeweiligen Referenzgebäudes ab. Zudem bestehen Freiheitsgrade bei der Erreichung der Standards hinsichtlich der Auswahl der zu sanierenden Gebäudekomponente und der jeweiligen Sanierungstiefe (Dicke der Dämmschicht, Fensterqualität). Die spezifischen Investitionen der Sanierungsmaßnahmen, die zur Erreichung der jeweiligen Standards erforderlich sind, werden spezifisch für jedes Referenzgebäude ermittelt und gehen als Eingangsdaten in die Modellierung ein. Abbildung 28 zeigt die Bandbreite der spezifischen Investitionen für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle für die im Modell hinterlegten Referenzgebäudeklassen bei den verschiedenen Effizienzstandards. Zudem wird ermittelt, welcher Anteil für ohnehin anfallenden Investitionen bei Instandsetzung ohne energetische Maßnahmen anfallen.

Abbildung 28: Spezifische Investitionen für Effizienzmaßnahmen differenziert nach Effizienzstandards und Referenzgebäude im Modell Invert/EE-Lab



Quelle: Eigene Abbildung IREES

Abschätzung der Einzelinstrumentenwirkungen über Instrumentenindikatoren

Die Abschätzung der Wirkung der einzelnen Politikinstrumente erfolgt nicht über eine Modellierung mit Invert/EE-Lab, sondern auf Basis bestehender Evaluationen oder Auswertungen vergleichbarer Instrumente. In der Regel werden dabei die im Rahmen einer Instrumentenevaluation festgestellten spezifischen Einsparungen (z.B. Endenergieeinsparung pro 1 Mio. € abgefragtes Fördervolumen oder pro Förderfall) mit den entsprechenden Aktivitätsgrößen (z.B. Anstieg des zur Verfügung stehenden Förderbudgets oder der Anzahl an angenommenen Förderfällen) skaliert. Hierbei handelt es sich z.B. um die Evaluierungsberichte für die KfW-Förderprogramme (IWU und Fraunhofer IFAM 2013, 2014, 2015, 2017, 2018), (FhG IFAM 2015) oder für das Marktanreizprogramm (Fichtner et al. 2011, 2012, 2014a, 2014b, 2016). Sofern die betrachteten Instrumente bisher nicht evaluiert wurden (wie z.B. die CO₂-Bepreisung oder die steuerliche Förderung der Gebäudesanierung), werden die Instrumentenwirkungen durch eigene Abschätzungen auf Basis geeigneter Indikatoren (z. B. die jährlichen Absatzzahlen bestimmter Heizungstechniken, die Verteilung der Förderung auf verschiedene Effizienzniveaus, die Anzahl durch Förderung ausgelöster Energieberatungen) ermittelt.

Da Maßnahmen immer in Kombination als Bündel von Instrumenten wirken, muss berücksichtigt werden, dass es zu Wirkungsüberschneidungen kommt. Beispielsweise münden erst die Kombination aus einer Energieberatung sowie die Möglichkeit der finanziellen Förderung in eine Investitionsentscheidung zu Gunsten einer energetischen Gebäudesanierung. Um bei der Instrumentenbewertung Doppelzählungen zu vermeiden, muss also die mit der Sanierung einhergehende Einsparung auf die involvierten Instrumente aufgeteilt werden. Bei der Wirkungsabschätzung auf Einzelinstrumentenebene werden die Überschneidungseffekte in Form sogenannter Instrumentenfaktoren berücksichtigt. Dabei handelt es sich um einen Faktor zwischen 0 und 1, mit dem die Wirkung eines Instruments, die aus seiner isolierten Betrachtung abgeschätzt wird, multipliziert wird.

6.2.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario

6.2.2.1 Instrumente im Referenzszenario

Für die Beschreibung der Instrumente im Referenzszenario sei auf das MMS Szenario des Projektionsberichts 2019 verwiesen.

Im Vergleich zum Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts 2019 erfolgte jedoch eine Neuberechnung des Referenzszenarios (REF), Folgende Gründe ließen auf eine Überschätzung der Treibhausgaseinsparungen im MMS schließen:

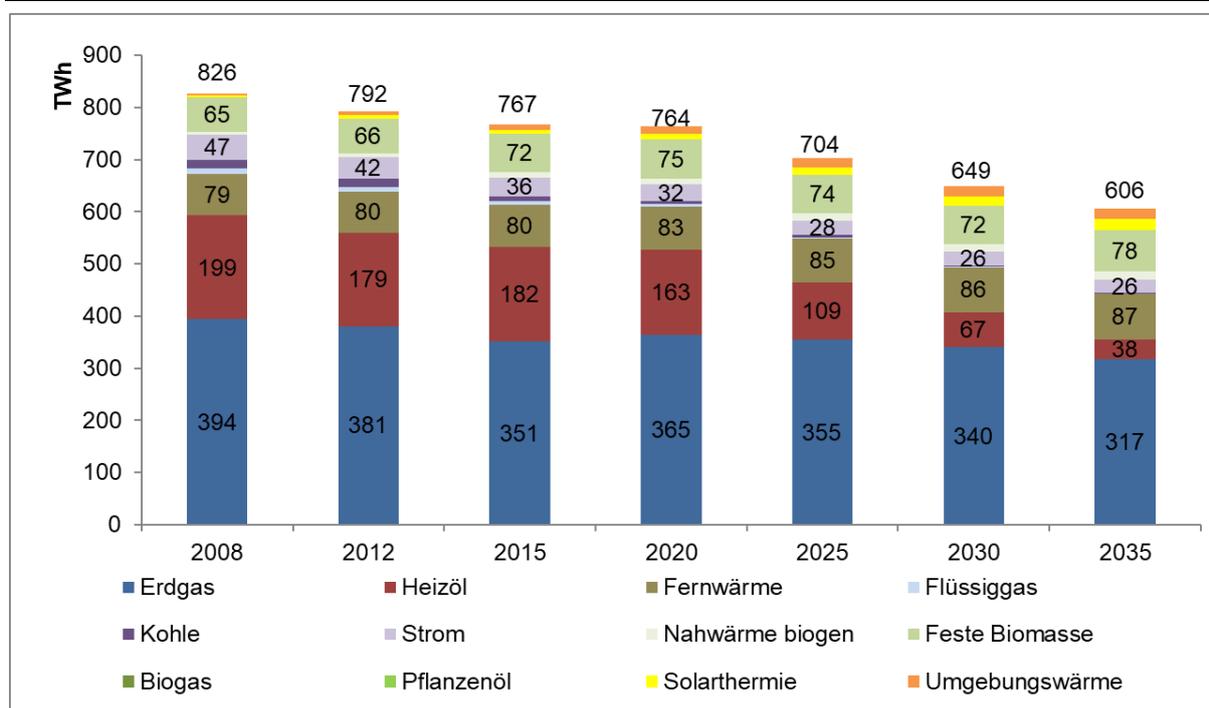
- ▶ Hinsichtlich der Sanierungsaktivität sind im MMS Effekte verschiedener Instrumente (v.a. KfW-Förderprogramme für energieeffizienten Neubau und Sanierung, APEE, Förderprogramm Heizungsoptimierung, Wärmenetze 4.0, Heizungsalтанlagenlabel, EnEV) auf eine Zunahme der Sanierungsrate im Modell implementiert worden, die sich in dieser Form allerdings nicht beobachtet werden konnten.
- ▶ Des Weiteren sind im MMS Annahmen enthalten, die eine erhöhte Heizungs austauschrate durch Instrumente wie dem Heizungsetikettenlabel vorgesehen haben. Die Effekte dieser Politikmaßnahme sind ursprünglich im Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS) des Projektionsberichts 2015 implementiert worden auf Basis vorliegender ex-ante Wirkungsabschätzung. Mit der Umsetzung der Maßnahme im Jahr 2016 ist diese im MMS des nachfolgenden Projektionsberichts 2017 aufgenommen worden. Der Effekt auf den Rückgang des Wärmebedarfs durch verstärkten Austausch älterer Heizsysteme hat sich im Markt jedoch (noch) nicht gezeigt.
- ▶ Hinsichtlich des Neubaustandards ist anzumerken, dass im MMS des Projektionsberichts 2019 der Niedrigstenergiegebäudestandard (NZEB) mit dem Standard KfW 55 abgebildet worden ist. Die Annahme, dass eine weitere Verschärfung des Standards über die EnEV 2016 (Bundesregierung 2015) hinaus als gegeben angesehen wurde, ergibt sich aus § 2a des Energieeinsparungsgesetzes, die eine Weiterentwicklung zum NZEB-Standard vorsieht, womit eine entsprechende Weiterentwicklung als beschlossene Maßnahme gilt. Die Anforderungen, dass alle Neubauten ab 2021 im Niedrigstenergiegebäudestandard erstellt werden, ergibt sich aus der EU Gebäuderichtlinie (Richtlinie 2010/31/EU) aus dem Jahr 2010. Bereits im Projektionsbericht 2017 (Bundesregierung 2017) wurde dies als beschlossenes Instrument modelliert. Aufgrund des Beschlusses, dass der derzeitige Neubaustandard (EnEV 2016) auch den NZEB-Standard darstellt, wurde dies in der Neuberechnung der Referenz demen-

sprechend angepasst. Dass die politischen Beschlüsse dazu führen, dass der bereits bestehende Standard zum NZEB Standard definiert wird, konnte bei der Erstellung des Referenzszenarios zum damaligen Zeitpunkt nicht antizipiert werden.

6.2.3 Ergebnisse Referenzszenario

Abbildung 29 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme- und Warmwasser in Wohngebäuden sowie der Nichtwohngebäuden des GHD-Sektors im Referenzszenario. Der Endenergieverbrauch sinkt von 2008 bis zum Jahr 2030 um 21,3 % durch energetische Sanierung der Gebäude und effizientere Wärmeversorgung. Der fossile Brennstoffbedarf sinkt um 33,7 % während die Wärmeversorgung über Wärmenetze um 9,3 % steigt. EE-Wärme aus Biomasse, Solarthermie und Umweltwärme (Wärmepumpen) steigt um 59,1 % und hat im Jahr 2030 einen Anteil von 19,4 % an der Wärmeversorgung von Gebäuden. Der Strombedarf für Wärmepumpen verdreifacht sich zwischen 2008 und 2030, während der Strombedarf für konventionelle Direkt- und Nachtspeicherheizungen um 59,1 % reduziert wird.

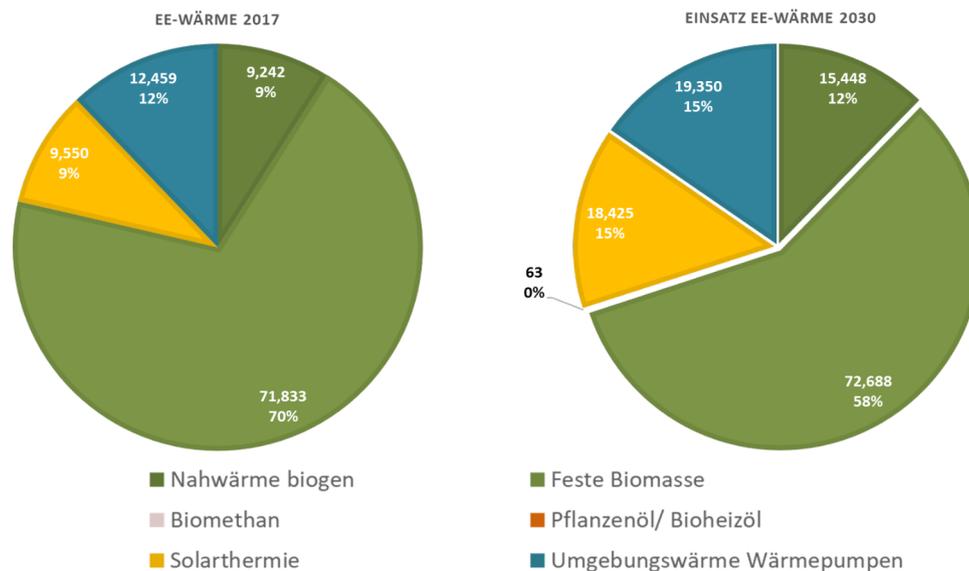
Abbildung 29: Entwicklung Endenergieverbrauch Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD im Referenzszenario (REF)



Quelle: Eigene Abbildung IREES, Ergebnisse Modellberechnung

Abbildung 30 zeigt die Anteile der EE-Wärme nach Energieträgern in den Jahren 2017 und 2030. Die Darstellung zeigt, dass sich EE Nutzung aus Wärmepumpen und Solarthermie absolut ungefähr verdoppeln, während dezentrale Biomassenutzung nur um 6 TWh steigt. Allerdings verändern sich auch hierbei die Wärmebereitstellungstechnologien, so dass der Anteil von Zentralheizungskesseln mit Scheitholz und Pelletöfen steigt, während der Anteil der Einzelraumfeuerungen sinkt.

Abbildung 30: Entwicklung EE-Wärme im Referenzszenario (REF) (ohne EE in der Fernwärme) [TWh]



Quelle: Eigene Abbildung IREES, Ergebnisse Modellberechnung

Für die Erreichung der THG-Sektorziele nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz sind die Brennstoffverbräuche relevant, da Strom und Fernwärme dem Umwandlungssektor zugeordnet werden. Tabelle 70 vergleicht den Endenergiebedarf der Brennstoffe des MMS im PB 2019 mit dem Referenzszenario. Aufgrund der geringeren Dynamik im Gebäudebereich mit langen Reinvestitionszyklen sind im Referenzszenario mehr fossile Wärmeversorger noch im Jahr 2030 im Bestand. Im Vergleich zum MMS im Projektionsbericht liegt der Endenergieverbrauch im Jahr 2030 um 53 TWh höher.

Tabelle 70: Vergleich Brennstoffverbräuche Referenzszenario (REF) und Projektionsbericht 2019

Endenergiebedarf Brennstoff im Jahr 2030	Referenzszenario [GWh]	PB 2019 [GWh]
Erdgas	340.083	311.446
Heizöl	67.430	58.85
Flüssiggas	541	230
Kohle	2.443	703

Quelle: Eigene Berechnungen

6.2.4 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

6.2.4.1 Steuerliche Förderung Gebäudesanierung

Mit dem Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 im Steuerrecht vom 21.12.2019 sowie der Energetischen Sanierungsmaßnahmen-Verordnung (ESanMV) vom 19.12.2019 wird eine steuerliche Förderung energetischer Sanierungsmaßnahmen eingeführt. Die steuerliche Förderung beschränkt sich auf Einzelmaßnahmen (wie z.B. den Heizungstausch

oder die Dämmung einzelner Bauteile der Hüllfläche eines Gebäudes) in selbstgenutzten Wohnungen und Wohngebäuden. Im Jahr 2020 wird sie alternativ zu den bestehenden KfW-Förderprogrammen und dem Marktanreizprogramm (MAP) eingeführt, d.h. Gebäudeeigentümer müssen sich entscheiden, welche Fördermöglichkeit sie in Anspruch nehmen. Ab dem 01.01.2021 läuft die steuerliche Förderung alternativ zur Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG), welches die KfW-Förderprogramme und das MAP unter einem Dach vereint. Die Förderung erfolgt in Form eines progressionsunabhängigen Abzugs der Steuerschuld (also unabhängig vom Einkommen) über einen Zeitraum von drei Jahren. Abzugsfähig sind 20 % der Investitionskosten bei einer Begrenzung des Förderbetrags auf maximal 40.000 €. Förderfähig sind Sanierungsmaßnahmen, mit denen nach dem 01.01.2020 begonnen wurde. Förderfähig sind Wärmedämmmaßnahmen an der Gebäudehülle, die Erneuerung der Heizungsanlage, die Erneuerung oder der Einbau einer Lüftungsanlage, der Einbau von digitalen Systemen zur energetischen Betriebs- und Verbrauchsoptimierung sowie die Optimierung bestehender Heizungsanlagen, sofern diese älter als zwei Jahre sind. Die materiellen Mindestanforderungen an die förderfähigen Einzelmaßnahmen legt ESanMV fest.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Die steuerliche Förderung ist hinsichtlich der förderfähigen Maßnahmen und den Förderkonditionen vergleichbar mit der KfW Förderung. Allerdings ist diese nicht an jährliche Haushaltsmittel gebunden, so dass das im Modell hinterlegte Budget der zur Verfügung stehenden Fördervolumina ausgeweitet bzw. nicht gedeckelt wird. Den möglichen zusätzlichen Effekt, dass energetische Sanierung über den Steuerberater an die Hauseigentümer getragen und dadurch möglicherweise eine zusätzliche Dynamik erzeugt wird, wird in der Modellierung nicht abgebildet. Für eine genaue Beschreibung welche Parameter im Modell hinterlegt werden können und wie diese die Simulation der Investitionsentscheidung in Invert/EE-Lab beeinflussen wird im nächsten Abschnitt bei der Umsetzung der Bundesförderung dargestellt.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Förderfälle: Gebäudeeigentümer müssen sich entscheiden, ob sie für eine Sanierungsmaßnahme, die steuerliche Förderung oder eine Förderung aus einem der bestehenden Programme in Anspruch nehmen. Aus diesem Grund wird die Fallzahl für die beiden Förderstränge gemeinsam abgeschätzt. Es wird angenommen, dass sich durch die neue steuerliche Förderung und die höhere Förderung in bestehenden Programmen (zusammengefasst in der neuen Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG), s. nachfolgend dargestellte Maßnahme) die Gesamtzahl der Förderfälle bezogen auf die Förderfallzahl in der heutigen KfW-Zuschussförderung (beschränkt auf Sanierungsmaßnahmen) sowie dem MAP (beschränkt auf Förderfälle im Gebäudebestand) verdoppelt. Diese Verdopplung ist als Durchschnitt über den Zeitraum 2020-2030 zu sehen. Die Verdopplung begründet sich mit a) der Öffnung eines zusätzlichen Förderstrangs (steuerliche Förderung) und b) den wesentlich attraktiveren Förderkonditionen in den bestehenden Programmen. Bei den geförderten Heizanlagen wird eine Verteilung auf die verschiedenen Förderkategorien des BEG („renewable-ready“, „Hybrid“, „100 % EE“) vorgenommen. Für jeden Fördertatbestand wird die Gesamtzahl der Förderfälle anhand der spezifischen Fördersätze auf die beiden Förderkanäle „Steuerförderung“ und „BEG“ aufgeteilt. Beispielsweise wird unterstellt, dass im Falle von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle 60 % der gesamten Förderfälle durch die Steuerförderung erfasst wird während die restlichen 40 % der Förderfälle durch die BEG gefördert werden. Die höhere Gewichtung für die Steuerförderung resultiert aus der Annahme, dass trotz gleichem Fördersatz (20 % der förderfähigen Investitionskosten) der Komforteffekt der Steuerförderung (Abwicklung über die Steuererklärung) die Nachteile (Verteilung der Förderung über drei Jahre) überwiegt und Hauseigentümer deswegen tendenziell die Steuerförderung leicht bevorzugen werden.

Überschneidung mit anderen Instrumenten: Die Wechselwirkung mit dem BEG wurde explizit herausgerechnet. Für die Überschneidung mit allen anderen Maßnahmen wurde ein Instrumentenfaktor von 0,95 verwendet.

6.2.4.2 Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG) einschließlich Einbauverbot monovalenter Heizölkessel

Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, die bestehenden Förderprogramme im Gebäudebereich zusammenzulegen, um damit den Bürgern ein einfacheres und kundenfreundlicheres Fördermodell anzubieten. Dafür werden im Rahmen der neu geschaffenen Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) die bestehenden Programme CO₂-Gebäudesanierungsprogramm (EBS-Programme), das Marktanzreizprogramm (MAP), das Heizungs- und Lüftungspaket des Anreizprogramms Energieeffizienz (APEE) und Teile des Heizungsoptimierungsprogramms (HZO) ab 2021 unter einem Dach zusammengeführt. Für Förderkonditionen und Mindestanforderungen an die verschiedenen Fördertatbestände gelten die modifizierten Förderkonditionen der KfW-Förderprogramme für energieeffizientes Bauen und Sanieren, die neuen Förderrichtlinien für MAP und APEE vom 30.12.2019 sowie die Energetische Sanierungsmaßnahmen-Verordnung (ESanMV) vom 19.12.2019. Die Förderkonditionen wurden konkret in folgenden Punkten verbessert:

- ▶ Sanierung von Wohngebäuden: Erhöhung der Investitionszuschüsse (Zuschussvariante) um 10 % und der Tilgungszuschüsse (Kreditvariante) um 12,5 %,
- ▶ Neubau von Wohngebäuden: Erhöhung der Tilgungszuschüsse (Kreditvariante) um 10 %,
- ▶ Sanierung von Nichtwohngebäuden: Erhöhung der Tilgungszuschüsse (Kreditvariante) um 10 %,
- ▶ Erhöhung des Förderhöchstbetrages für Effizienzhäuser (Wohngebäude) im Neubau und der Sanierung von 100.000 € auf 120.000 €,
- ▶ Erhöhung der Investitionszuschüsse für Biomasseheizungen und Wärmepumpen auf 35 % (bei Austausch einer Ölheizung 45 %), für Solarkollektoren auf 30 %, für Gas-Hybridheizungen mit erneuerbaren Energien auf 30 % (bei Austausch einer Ölheizung 40 %) und für Gas-Hybridheizungen mit späterer Einbindung erneuerbare Wärmeerzeugung (Renewable Ready) auf 20 %.

Im Jahr 2020 fließen aus dem Energie- und Klimafonds rund 2,7 Mrd. € in die oben genannten Förderprogramme.⁸⁹

Weiterhin ist geplant, ab dem 01.01.2026 den Einbau monovalenter Heizölkessel zu verbieten. Die Umsetzung erfolgt im Rahmen des noch zu beschließenden Gebäudeenergiegesetzes (GEG). Die Kombination einer Ölheizung zusammen mit erneuerbaren Energien (Hybridheizung) soll weiterhin gestattet sein. Vom Verbot sollen Gebäude ausgenommen werden, bei denen mangels Verfügbarkeit kein Anschluss an ein Gasversorgungsnetz oder Fernwärmeverteilungsnetz hergestellt werden kann und gleichzeitig eine anteilige Deckung des Wärme- und Kältebedarfs durch erneuerbare Energien technisch nicht möglich ist oder zu einer unbilligen Härte führt.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

⁸⁹ <http://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/04/Meldung/direkt-erklaert.html>

Einbauverbot Heizölkessel

Das Modell erlaubt die Abbildung von Nutzungspflichten für erneuerbare Energien oder andere Technologien, wie es auch durch das EEWärmeG verlangt wird. Die Nutzungspflicht kann dabei differenziert nach Gebäudetypen (Neubauten, Bestandsgebäude, Wohn- oder Nichtwohngebäude) oder Gebäudeeigentümer (z.B. nur Bestandsgebäude im Besitz der öffentlichen Hand) im Modell definiert werden. Auch können dabei technologiespezifische Mindestanteile vorgegeben werden. Bei der Simulation der Investitionsentscheidung wird dabei für bestimmte Gebäudesegmente und Investoren-Agenten das Portfolio der möglichen Technologien eingeschränkt bzw. sind nur bestimmte Technologiekombinationen oder die Kombination mit zusätzlichen Effizienzmaßnahmen möglich. Damit kann beispielsweise das EEWärmeG als Instrument in einer sehr hohen Detaillierung abgebildet werden. Die Abbildung eines allgemeinen Einbauverbots für bestimmte Technologien wie sie ab 2026 für Heizölkessel vorgesehen ist, kann hingegen dadurch abgebildet werden, dass im Modell die Installation der Technologie nur noch bis zum Jahr 2025 möglich ist.⁹⁰

Änderung der Kondition für finanzielle Förderung von Wärmeversorgung und Energieeffizienzmaßnahmen

In der Modellierung werden die zusätzlichen Fördermittel und die Änderung der Förderkonditionen aus dem BEG und der steuerlichen Förderung abgebildet (siehe oben).

Grundsätzlich wird im Modell die Simulation der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme (Heizungstausch) und in bauliche Maßnahme an der Gebäudehülle (Energieeffizienzmaßnahmen) separat abgebildet. Die Definition von Fördersätzen und Förderkonditionen erfolgt daher differenziert für Wärmeversorgungstechnologien und Sanierungsoptionen. Folgende Parameter können im Modell für die Abbildung finanzieller Förderinstrumente definiert.

- ▶ Spezifische Fördersätze differenziert nach Wärmeversorgungstechnologien
- ▶ Spezifische Fördersätze für die definierten Effizienzmaßnahmenpakete zur Erreichung eines bestimmten Standards
- ▶ Maximale Förderung pro Maßnahme. Dies wird ebenfalls technologie- bzw. Maßnahmenspezifisch festgelegt
- ▶ Definition/ Differenzierung der Gebäudesegmente oder Eigentümergruppen, die eine Förderung beziehen können
- ▶ Programmbudget pro Jahr: Die Abbildung von Förderbudgets erfolgt im Modell in Anlehnung an den reale Fördermittelabruf. Während in einer Einzelmaßnahmenbewertung oder in einer Berechnung in Bilanzierungsmodellen zusätzliche Effekte nur direkt aus der Annahme zusätzlichen Förderbudgets ermittelt werden können, dienen im Simulationsmodell Invert/EE-Lab die Förderbudgets als jährliche Obergrenze. Im Modell wird für jedes Jahr ermittelt, wieviel Technologien unter Berücksichtigungen der Förderungen installiert werden. Wird in Summe damit das Förderbudget für Wärmeversorgungssysteme oder Energieeffi-

⁹⁰ Für den Heizölkessel mit Bioheizölnutzung wird als Energieträger Heizöl EL Bio 10 mit 10prozentiger Beimischung einer Biokomponente (FAME) definiert, was mit entsprechend höheren Energiepreisen verbunden ist. Da der Heizölkessel technologisch ansonsten einem herkömmlichen Heizölkessel entspricht, werden keine höheren Investitionskosten für den Heizölkessel mit anteiliger Bioheizölnutzung angesetzt. Die Technologie ist bereits im Referenzszenario als zusätzliche Wärmeversorgungsoption im Modell hinterlegt.

zizienzmaßnahmen in dem jeweiligen Simulationsjahr überschritten, wird die Berechnung wiederholt und die Förderung steht nur für einen Teil der Gebäude, die in dem Jahr einen Heizungsaustausch oder eine Sanierungsmaßnahme durchführen zu Verfügung. Die Berechnung wird solange wiederholt bis das festgelegte Förderbudgets für das jeweilige Jahr nicht mehr überschritten wird. Werden hingegen Förderbudgets nicht vollständig ausgeschöpft, stehen die nicht abgerufenen Mittel für das nächste Jahr zusätzlich zur Verfügung.

Die beschlossenen Veränderungen der Fördersätze für Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungstechnologien werden somit differenziert nach Maßnahmen und Technologien im Modell hinterlegt. Bei den Wärmeversorgungstechnologien ist neben den verbesserten Förderkonditionen für erneuerbare Energien insbesondere die Änderungen bei der Förderung fossiler Heizkessel zu beachten. Die Abbildung des neuen Fördertatbestand „Renewable Ready“ erfolgt modelltechnisch mit der Definition einer neuen Technologie. Damit wird zwischen herkömmlichen Erdgasbrennwertkessel und „Renewable-ready“-Brennwertkesseln unterschieden. Für letztere sind weiterhin Förderungen vorgesehen, es werden jedoch auch zusätzliche Kosten für Speicher und Peripherie im Modell berücksichtigt, welche entsprechend der Definition des Förderprogramms eine einfache Einbindung von erneuerbaren Energien, wie insbesondere Solarthermie, ermöglicht.

Mit Bezug auf die Höhe der maximalen jährlichen Förderbudgets gibt es für Energieeffizienzmaßnahmen aufgrund der steuerlichen Förderung effektiv keine Obergrenze. Da vom BEG und der steuerlichen Förderungen gleiche Maßnahmen adressiert werden, wird im Modell mit Bezug auf das zur Verfügung stehende Budget nicht zwischen den beiden Programmen unterschieden.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Förderfälle: Die Annahmen zur Gesamtanzahl an Förderfällen für BEG und steuerlicher Förderung sowie Aufteilung der Förderfälle auf die beiden Förderstränge sind wie bei der Steuerförderung beschrieben. Beispielsweise wurde für die Förderung von Hybridanlagen angenommen, dass aufgrund der dort wesentlich attraktiveren Förderkonditionen 80 % der ausgelösten Förderfälle über das BEG gefördert werden. Ausgewiesen werden nur die Einsparungen, die über die Wirkung der bisherigen KfW- und MAP-Förderung hinausgehen.

Überschneidung mit anderen Instrumenten: Die Wechselwirkung mit der steuerlichen Förderung wurde explizit herausgerechnet. Für die Überschneidung mit allen anderen Maßnahmen wurde ein Instrumentenfaktor von 0,95 verwendet.

Ölkesselverbot: Förderfälle: Eingedenk des autonomen Rückgangs von Heizölkesseln sowie des schon heute zu beobachtenden Anteils von Hybridanlagen beim Ölkesselerersatz wird angenommen, dass das Verbot pro Jahr rund 40.000 Ölkessel betrifft. Es wird ferner unterstellt, dass bei 10 % der Fälle, die dem Ölkesselverbot unterliegen, eine anteilige Deckung des Wärme- und Kältebedarfs durch erneuerbare Energien technisch nicht möglich ist oder zu einer unbilligen Härte führen würde (und deswegen wieder ein monovalenter Ölkessel zum Einsatz kommt).

Überschneidung mit anderen Instrumenten: Erfolgt der Ersatz eines Ölkessel unter dem (anteiligen) Einsatz eines erneuerbaren Wärmeerzeugers, ist die Maßnahme im Rahmen des BEG und/oder steuerlichen Förderung prinzipiell förderfähig. Es wird angenommen, dass in zwei Dritteln der förderfähigen Fälle die Förderung auch in Anspruch genommen wird. Die damit verbundenen Einsparungen werden bei der steuerlichen Förderung bzw. dem BEG bilanziert.

6.2.4.3 Förderung der seriellen Sanierung

Die Bundesregierung plant, die Markteinführung der seriellen Sanierung zu beschleunigen. Unter die serielle Sanierung fallen die industrielle Vorfertigung von Fassaden- und Dachelementen und eine standardisierte Installation von Anlagentechnik, inkl. der Versorgung mit eigenerzeugtem Strom. Projekte zur seriellen Sanierung sollen kumulativ zum BEG eine zusätzliche finanzielle Förderung erhalten. Mit Hilfe der Förderung soll es gelingen, Modellprojekten und Prototypen in den Sanierungsmarkt zu überführen.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Eine direkte Abbildung dieses Instrumentes wird in der Modellierung nicht vorgenommen.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Förderfälle: Es wird angenommen, dass infolge des Förderbausteins pro Jahr 0,6 Mio. m² Wohnfläche im Durchschnitt auf das Niveau KfW-EH-55 saniert werden, über die Wirkung des BEG hinaus.

Überschneidung mit anderen Instrumenten: Alle Förderfälle, die die Anforderungen an den Fördertatbestand „serielles Sanieren“ erfüllen, werden zusätzlich durch das BEG gefördert. Diese Wechselwirkung wurde explizit herausgerechnet

6.2.4.4 Energetische Stadtsanierung

Die Bundesregierung plant eine Erweiterung des Förderprogramms „Energetische Stadtsanierung“. Das laufende Programm fördert die Erstellung integrierter Quartierskonzepte (Effizienzmaßnahmen an Gebäuden und in der Versorgungsinfrastruktur), das umsetzungsbegleitende Sanierungsmanagement sowie quartiersbezogene investive Maßnahmen. Im Zuge der Ausweitung sollen insbesondere umweltfreundliche Mobilitätskonzepte, interkommunale Konzepte, Maßnahmen der Wärmenetzplanung in den Konzepten und bei der Tätigkeit des Sanierungsmanagements sowie Konzepte, die sich auf gemischte Quartiere (Kombination von Neubau und Bestandsgebäuden) beziehen, stärker berücksichtigt werden.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Eine direkte Abbildung dieses Instrumentes wird in der Modellierung nicht vorgenommen.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Zum Zeitpunkt der Wirkungsabschätzung ist die Ausgestaltung des Programms offen. Gleichzeitig verfügt das Programm über erhebliches Überschneidungspotenzial mit anderen Instrumenten (v.a. BEG, Wärmenetzförderung, NKI Kommunalrichtlinie). Aus diesem Grund erfolgt für das Instrument keine eigene Wirkungsabschätzung. Vielmehr ist die Wirkung des Instruments in den abgeschätzten Wirkungen der anderen Instrumente enthalten.

6.2.4.5 Energieberatung und Öffentlichkeitsarbeit

Die Bundesregierung plant, die Energieberatung für Wohngebäude zu verbessern. Im Einzelnen soll die Energieberatung u. a. durch folgende Maßnahmen weiter gestärkt werden:

- ▶ eine Erhöhung der Förderung in der „Energieberatung für Wohngebäude (EBW)“ von heute 60 % auf bis zu 80 % Zuschuss,
- ▶ eine Weiterentwicklung der Beratung, die darauf abzielt, die Beratung flexibler, anlassorientierter und adressatengerechter auszugestalten und stärker mit der Erstellung von Energiebedarfsausweisen zu verknüpfen,

Flankierend soll die Energieberatung fachspezifischer und zielgruppengerechter kommuniziert werden, unter anderem im Rahmen der seit 2016 bestehenden Energieeffizienzkampagne des BMWi „Deutschland macht’s effizient“.

Ferner sieht der Entwurf des Gebäudeenergiegesetzes (GEG, Stand 03/2020) in bestimmten Fällen auch eine verpflichtende Energieberatung vor. So sollen

- ▶ Eigentümer von Ein- und Zweifamilienhäusern verpflichtet werden, im Falle von Änderungen an Außenbauteilen, die mehr als 10 % der Fläche der jeweiligen Bauteilgruppe des Gebäudes betreffen, *„vor Beauftragung der Planungsleistungen ein informatorisches Beratungsgespräch mit einem Energieberater der Verbraucherzentrale Bundesverband durchzuführen“*,
- ▶ Für den Eigentumsübergang von Ein- und Zweifamilienhäusern ist vorgesehen, dass beim Abschluss eines Kaufvertrages *„der Verkäufer oder der Immobilienmakler dem Käufer ein informatorisches Beratungsgespräch zum Energieausweis durch einen Energieberater der Verbraucherzentrale Bundesverband anzubieten“* hat.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Eine direkte Abbildung dieses Instrumentes wird in der Modellierung nicht vorgenommen.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Förderfälle: Die Wirkungsabschätzung beschränkt sich auf die zusätzlichen „freiwilligen“ Beratungen, die durch den höheren Fördersatz, eine effektivere Ausgestaltung der Kommunikation (z.B. durch Nutzung weiterer Anlässe und zielgruppenspezifischere Ansprache) und die Verknüpfung von Energieausweisen und Energieberatung erwartet werden können. Die mögliche Wirkung der im GEG-Entwurf vom 22.10.2019 vorgesehenen „verpflichtenden“ Energieberatung, wird wegen unklarer Regelungstiefe nicht bilanziert. Es wird angenommen, dass das Instrument über die verschiedenen Wirkungsebenen in Summe pro Jahr zu zusätzlichen 11.000 qualifizierten Energieberatungen führt.

Überschneidung mit anderen Instrumenten: Es wird angenommen, dass für den Großteil der Sanierungsmaßnahmen, die durch die zusätzlichen Beratungsfälle ausgelöst werden, eine Förderung durch das BEG oder die Steuerförderung in Anspruch genommen wird. Die mit diesen Förderfällen verbundenen Einsparungen werden entsprechend beim BEG oder der Steuerförderung bilanziert. Der Instrumentenfaktor für die Energieberatung ist mit 0,1 entsprechend gering.

6.2.4.6 Vorbildfunktion Bundesgebäude

In Form eines Erlasses des Bundeskabinetts für klimaneutrale Neu- und Erweiterungsbauten des Bundes soll verbindlich festgelegt werden, dass Neubauten des Bundes ab 2022 den Standard KfW EH 40 oder einen noch besseren Standard erreichen müssen. Ferner sollen in dem Erlass für die Jahre 2030 und 2050 auch verbindliche Sanierungsziele für bestehende Bundesgebäude festgelegt werden. Dazu ist es erforderlich, dass bei allen neuen großen Sanierungs- und Modernisierungsbauvorhaben ab einem noch zu definierenden Stichtag mindestens ein KfW EH 55 -Standard zu Grunde gelegt wird. Per Erlass soll für Bundesgebäude zudem eine jährliche Sanierungsrate festgelegt werden.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Eine differenzierte Abbildung von Bundesbauten wird im Modell nicht vorgenommen. Diese spielen für den Gesamtbestand eine untergeordnete Rolle, auch innerhalb der öffentlichen Gebäude. Die spezifischen Anforderungen an öffentliche Gebäude (GEG/zuvor EEWärmeG) werden hingegen abgebildet.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Das Instrument adressiert eine beheizte Nettogrundfläche von rund 22,2 Mio. m² (davon rund 1/3 in zivilen und 2/3 in militärischen Liegenschaften). Es wird angenommen, dass die Sanierungsrate der Bundesgebäude bis zum Jahr 2025 sukzessive auf 3 % pro Jahr ansteigt. Gleichzeitig etabliert sich für Sanierungsmaßnahme der Leitstandard KfW EH-55.

6.2.4.7 Weiterentwicklung des energetischen Standards

Die energetischen Mindestanforderungen an Neubauten und Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand sollen - entsprechend den europarechtlichen Vorgaben - im Jahr 2023 erneut überprüft werden. Eine mögliche Verschärfung steht unter Vorbehalt des geltenden Wirtschaftlichkeitsgebots und unter Wahrung des Grundsatzes der Technologieoffenheit.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Da hinsichtlich der Weiterentwicklung der energetischen Standards kein konkreter Beschluss im Klimaschutzprogramm vorhanden ist, wird im Modell der geltende energetische Mindeststandard entsprechend EnEV 2016 bzw. Gebäudeenergiegesetz konstant fortgeschrieben.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Das Instrument besteht im Kern aus einem Prüfauftrag. Daher wird dem Instrument keine Minderungswirkung zugeschrieben.

6.2.4.8 Städtebauförderung (StBauF)

Die Bundesregierung plant, die Städtebauförderung (StBauF) ab 2020 verstärkt auf folgende Maßnahmen auszurichten:

- ▶ Maßnahmen zur Förderung des Stadtgrüns sowie gesteigerte Anforderungen an Gestaltungs- und Aufenthaltsqualität und zur Verminderung des Wärme- und Energieverbrauchs (integriert in allen Programmen)
- ▶ Stärkung der Vorbildfunktion der öffentlichen Hand beim Bauen mit CO₂-armen Baustoffen (Holz) und Recycling-Baustoffen
- ▶ Stärkung der Freiflächengestaltung als Element nachhaltiger Stadtentwicklung
- ▶ Zudem Verbesserung der Infrastruktur für E-Mobilität und die Nahversorgung mit Wärme und Strom sowie im Bereich der Daseinsvorsorge („kurze Wege“).

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Die Maßnahme ist flankierend. Das Instrument wird nicht direkt im Modell abgebildet.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Aufgrund der wenig konkreten Beschreibung sowie dem sektorübergreifenden Ansatz (Gebäude, Verkehr, Abfallwirtschaft) erfolgt keine Wirkungsabschätzung des Instruments.

6.2.4.9 Innovationsprogramm Zukunft Bau

Die Aktivitäten im Bereich der Bauforschung sollen durch die Fortentwicklung der Forschungsinitiative Zukunft Bau zum Innovationsprogramm weiter ausgebaut werden. Die Etablierung klima- und umweltfreundlicher Bauweisen soll einen wichtigen Forschungsbereich des neuen Innovationsprogramms Zukunft Bau darstellen.

Es soll eine Vielzahl von Themen im Bereich der ökologischen Dimension des Nachhaltigen Bauens aufgerufen werden. Die geplanten Forschungsthemen reichen von regionalem, klimaneutralen Bauen und Flächenschonung über das Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen bis hin zu Gebäudekonzepten, die auf die Nutzung fossiler Brennstoffe verzichten und stattdessen ausschließlich erneuerbare Energiequellen einsetzen. Dabei soll das Bauen als Kreislaufsystem von der Bauteilerstellung bis hin zu Rückbau und Recycling begriffen werden. Einen weiteren Aspekt soll die Stärkung der Robustheit und Resilienz von Gebäuden bilden, die sowohl der Anpassung an Folgen des Klimawandels dienen als auch der verminderten Komplexität des Bauens.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Dies ist eine flankierende Maßnahme. Das Instrument wird nicht direkt im Modell abgebildet.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Forschungsförderung legt die Grundlagen für die Umsetzung der Klimaschutzziele, zielt aber vorrangig nicht auf eine direkte Einsparwirkung ab. Aus diesem Grund erfolgt keine Wirkungsabschätzung des Instrumentes.

6.2.4.10 Energieeffizienzstrategie 2050 (EffSTRA)

Bei der Energieeffizienzstrategie 2050 (EffSTRA) handelt es sich um eine Dachmaßnahme; die verschiedene auf Energieeffizienz abzielende Maßnahmen bündelt. Im Rahmen der EffSTRA sollen Effizienzmaßnahmen für die Dekade 2021-2030 im Sinne einer Weiterentwicklung des Nationalen Aktionsplans Energieeffizienz (NAPE 2.0) beschlossen und umgesetzt werden. Dabei ist vorgesehen, auch die im Klimakabinett zu beschließenden Maßnahmen aufzugreifen. Darüber hinaus sollen mit der Energieeffizienzstrategie das nach EU-Recht erforderliche Energieeffizienzziel für 2030 festgelegt und ein breiter Dialogprozess „Roadmap Energieeffizienz 2050“ initiiert werden.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Bei der Modellierung der Wirkung lagen noch keine konkreten Maßnahmen vor, die über das Klimaschutzprogramm hinausgehen.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Bei dem Instrument handelt es sich um eine Dachmaßnahme, die die verschiedenen auf Energieeffizienz abzielenden Instrumente bündelt. Das Instrument entwickelt keine eigenständige Einsparwirkung.

6.2.4.11 CO₂-Bepreisung

Mit dem Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG) führt die Bundesregierung ab 2021 die CO₂-Bepreisung für fossile Brennstoffe ein. Eine Beschreibung der Maßnahme (inkl. der Reduktion der EEG-Umlage) findet sich in Kapitel 3.5.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Im Modell werden die sich daraus ergebenden höheren fossile Brennstoffpreise sowie die Reduktion des Strompreises abgebildet.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Die Wirkung wird über kurz- und langfristige Preiselastizitäten der Nachfrage nach FÖS (2019) sowie DIW (2019) berechnet. Bei den Preiselastizitäten wird zwischen Heizöl und Erdgas, Raumwärme und Warmwasser, Wohn- und Nichtwohngebäude differenziert.

Überschneidung mit anderen Instrumenten: Die CO₂-Bepreisung ist ein wichtiger „Enabler“ für die finanziellen Fördermaßnahmen. Zusammen mit den finanziellen Fördersträngen beeinflusst der CO₂-Preis die Rentabilität energetischer Sanierungsmaßnahmen. Die CO₂-Bepreisung entfalten dabei eine Hebelwirkung für die finanziellen Fördermaßnahmen, insbesondere die steuerliche Förderung und das BEG. Die mit diesen Förderfällen verbundenen Einsparungen werden entsprechend beim BEG oder der Steuerförderung bilanziert. Der Instrumentenfaktor für die CO₂-Bepreisung ist mit 0,1 entsprechend gering.

6.2.4.12 Änderungen Wohngeld und Mietrecht

Die Bundesregierung plant Wohngeldbezieher zur Vermeidung sozialer Härten bei steigenden Heizkosten durch eine Erhöhung des Wohngeldes um 10 % zu unterstützen. Darüber hinaus sollen Änderungen im Mietrecht geprüft werden, die darauf abzielen, die Umlagefähigkeit der CO₂-Bepreisung zu reduzieren. Das soll zu einer doppelten Anreizwirkung führen: Mieter sollen einen Anreiz bekommen, sich energieeffizient zu verhalten, Vermieter sollen angereizt werden, in klimaschonende Heizungssysteme bzw. energetische Sanierungen zu investieren.

Umsetzung im Modell Invert/EE-Lab

Eine direkte Abbildung der Maßnahme im Modell ist nicht erfolgt.

Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

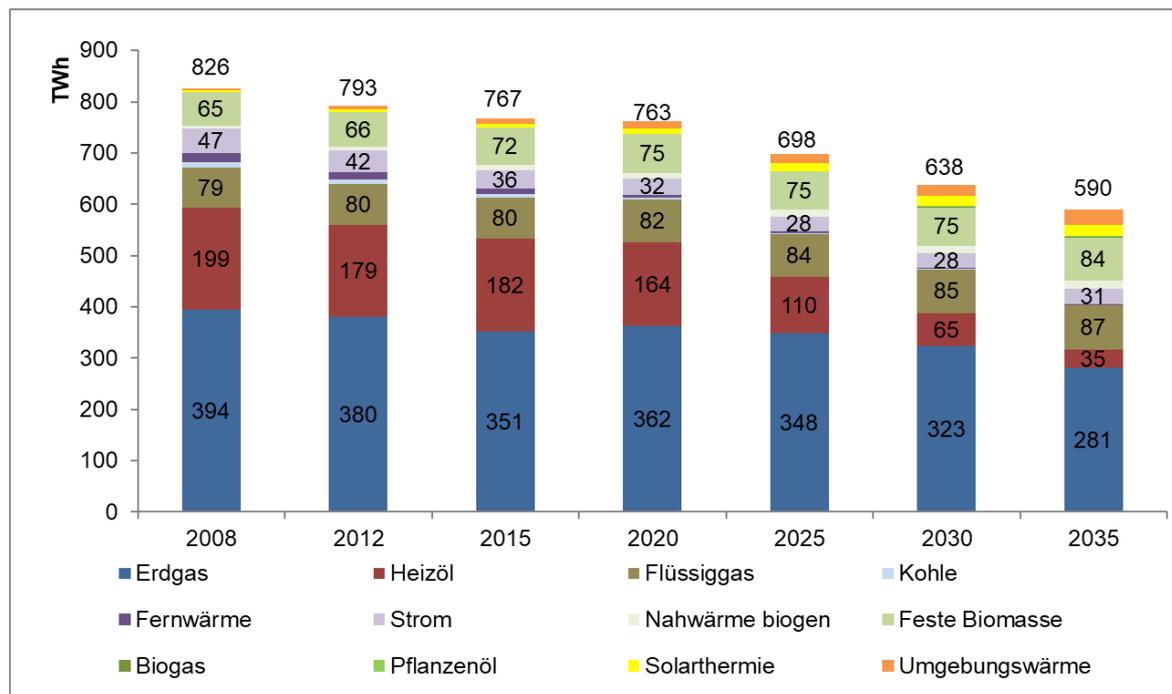
Aufgrund des offenen Ergebnisses der Überprüfung erfolgt keine Wirkungsabschätzung.

6.2.5 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

6.2.5.1 Gesamtergebnisse

Abbildung 31 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser im KSPr-Szenario. Der Endenergieverbrauch sinkt zwischen 2008 und 2030 um 23 %. Der fossile Brennstoffverbrauch reduziert sich aufgrund energetischer Sanierung von Gebäuden und Energieträgerwechsel nach Heizungstausch um 37 % bis 2030. Der Anteil EE an der Wärmeversorgung steigt auf 21 % im Jahr 2030 (26 % bis 2035).

Abbildung 31: Entwicklung Endenergieverbrauch Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))

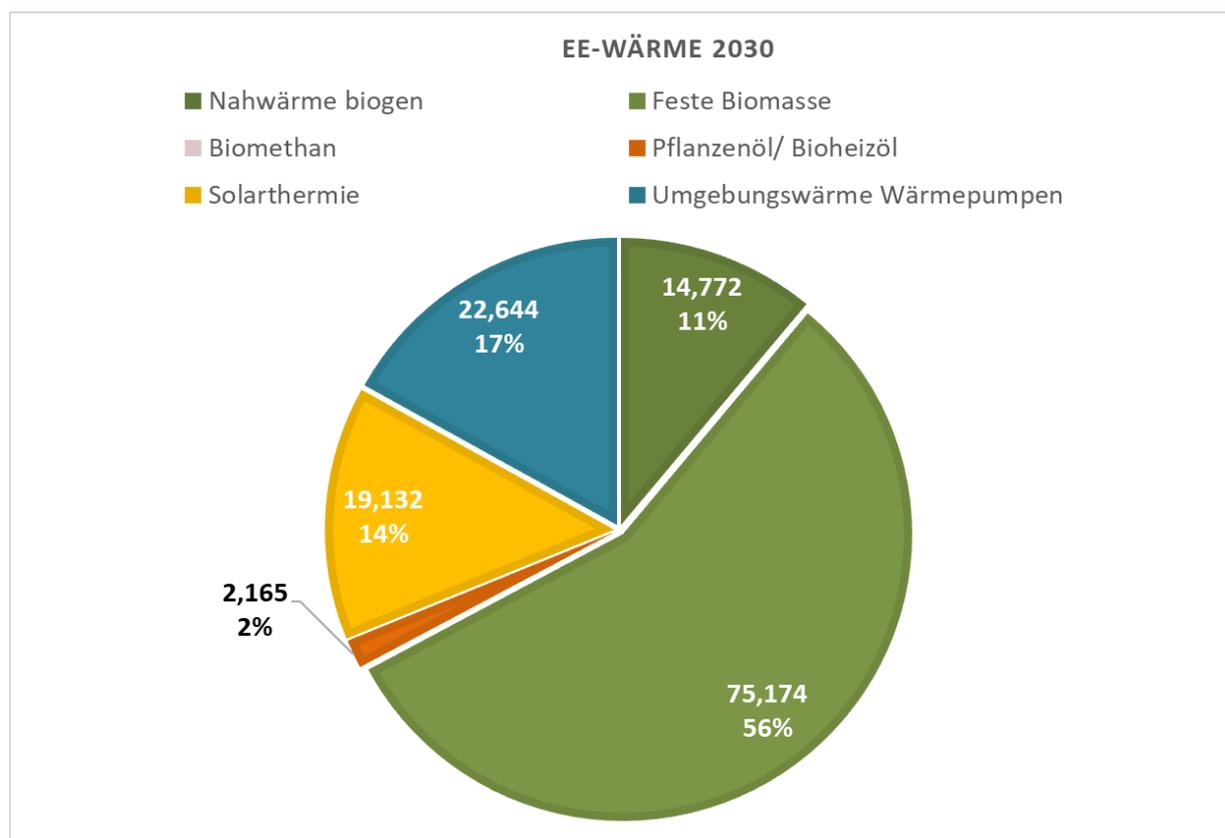


Quelle: Eigene Abbildung IREES, Ergebnisse Modellberechnung

Die zusätzlichen Instrumente im Vergleich zum Referenzszenario zeigen sich bei den erneuerbaren Energien deutlich beim Zubau der Wärmepumpen, so dass im Jahr 2035 im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 rund 10 TWh mehr Umweltwärme zu verzeichnen ist. Im Jahr 2030 sind es trotz des kurzen Zeitraums mit geringen Preisniveaus bei den CO₂-Preisen schon 3,4 TWh mehr Umweltwärme als im Referenzszenario. Damit steigt der Anteil der durch Wärmepumpen genutzte Umgebungs- und Erdwärme an der gesamten EE-Wärme auf 17 % im Jahr 2030 (Abbildung 32). Dies ist insbesondere auf die CO₂-Bepreisung und die damit verbundene Verteuerung fossiler Brennstoff bei gleichzeitiger Reduktion der Endverbraucherpreise für Strom und Wärmepumpentarife zurückzuführen.

Ein weiterer Effekt der Instrumente aus dem Klimaschutzprogramm 2030 zeigt sich mit Bezug auf die Nutzung von Bioheizöl. Während im Referenzszenario Bioheizöl nur im geringen Umfang eingesetzt wird, steigt der Anteil von flüssiger Biomasse (FAME), die anteilig Heizöl beigemischt wird, auf über 3 TWh im Jahr 2035. In den Modellergebnissen ist dies ein direkter Effekt des Heizölkesselverbotes, welches eine Nutzung von Heizölkessel mit anteiliger EE-Nutzung weiter zulässt. Dies kann entweder über Solarthermie erfolgen oder auch über die anteilige Nutzung von Bioheizöl. Letztere ist zwar bei einem Anteil von 10 % FAME Beimischung nicht zwangsläufig die wirtschaftlichste Option. Allerdings ist dies die Optionen mit den niedrigsten Investitionskosten für Gebäude, die vorher bereits einen Heizölkessel installiert hatten.

Abbildung 32: Endenergieverbrauch EE-Wärme im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP (Jan 2020)) (ohne EE in der Fernwärme) [TWh]



Quelle: Eigene Abbildung IREES, Ergebnisse Modellberechnung

6.2.5.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Für die Bewertung der Einzelmaßnahmen im Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) wird die Wirkung der Einzelmaßnahmen des Programms gegenüber der Entwicklung des Referenzszenarios abgeschätzt. Diese Abschätzung erfolgt nicht über die Modellierung mit Invert/EE-Lab, sondern in Form einer Bottom-up Abschätzung auf Basis bestehender Evaluationen oder Auswertungen vergleichbarer Instrumente.

Tabelle 71 und Tabelle 72 zeigen die zusätzlichen Einsparungen fossiler Brennstoffe sowie Treibhausgasemissionen gegenüber der Referenz. Die Wirkungen, die aus Änderungen der Strom- und Fernwärmennachfrage resultieren, sind hier nicht enthalten. Diese werden im Umwandlungssektor bilanziert. Die ausgewiesenen Wirkungen sind um Überlagerungseffekte korrigiert und somit als Nettowirkungen zu verstehen.

Bei der Einsparung an fossilen Brennstoffen sowie den damit einhergehenden Treibhausgasemissionen ist die Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG) das wirkmächtigste Instrument, gefolgt von der steuerlichen Förderung und der CO₂-Bepreisung. In Summe führt das Maßnahmenbündel des Klimaschutzprogramms 2030 im Gebäudesektor im Jahr 2030 zu CO₂-Einsparungen in Höhe von rund 4,4 Mio. t, die über die Wirkung der Referenz hinausgehen. Diese Wirkung muss mit der Ziellücke in Höhe von rund 21 Mio. t ins Verhältnis gesetzt werden.

Bei der Bewertung der Wirkmächtigkeit der verschiedenen Instrumente muss berücksichtigt werden, dass immer dann, wenn sich zwei oder mehrere Instrumente in ihrer Wirkung überschneiden, bei der Zuordnung der Einsparwirkung auf die beteiligten Instrumente eine gewisse

Willkür herrscht. Bei den hier untersuchten Instrumenten gilt dies insbesondere für die Überschneidung/Wechselwirkung zwischen den Förderinstrumenten (Steuerliche Förderung und BEG) und der CO₂-Bepreisung. In der hier gewählten Zuordnung ist die CO₂-Bepreisung ein „Türöffner“ für die finanziellen Förderkanäle, bei dem ein hoher CO₂-Preis Gebäudeeigentümer anregt, sich für eine Gebäudesanierung zu entscheiden und dafür finanzielle Förderung in Anspruch zu nehmen. Entsprechend werden die damit verbundenen Einsparungen größtenteils den finanziellen Förderkanälen zugerechnet. Die in den nachfolgenden Tabellen der CO₂-Bepreisung zugeschriebenen Effekte spiegeln deswegen nur die Wirkungen wider, die jenseits des „Türöffner-Effekts“ auftreten.

Tabelle 71: (Zusätzliche) Einsparungen fossiler Brennstoffe pro Jahr durch das Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) gegenüber dem Referenzszenario (REF) (ohne Wirkungen auf Umwandlungssektor)

Fossile Brennstoffeinsparungen pro Jahr [PJ]*	2020	2025	2030	2035
Steuerliche Förderung Gebäudesanierung (inkl. „Türöffner-Effekt“ der CO ₂ -Bepreisung)	1,2	6,9	12,7	18,5
Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG), inkl. Ölkesselverbot (und inkl. „Türöffner-Effekt“ der CO ₂ -Bepreisung)	2,9	17,6	35,0	52,4
Serielle Sanierung	0,1	0,3	0,6	0,9
Energetische Stadtsanierung	Keine Wirkungsabschätzung			
Energieberatung	0	0	0	0,1
Vorbildfunktion Bundesgebäude	0	0,3	0,9	1,5
Weiterentwicklung des energetischen Standards	0	0	0	0
Städtebauförderung (StBauF)	Keine Wirkungsabschätzung			
Innovationsprogramm Zukunft Bau	0	0	0	0
EffSTRA	0	0	0	0
CO ₂ -Bepreisung (ohne „Türöffner-Effekte“)	0	6,0	22,6	32,2
Änderungen Wohngeld und Mietrecht	Keine Wirkungsabschätzung			
Summe	4,1	31,2	71,9	105,5

Anmerkung: * Nur fossile Brennstoffe in der dezentralen Wärmeerzeugung ohne Fernwärme und Strom

Quelle: Berechnung Öko-Institut

Tabelle 72: (Zusätzliche) Emissionsminderung durch Einsparung fossiler Brennstoffe pro Jahr durch das Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) gegenüber dem Referenzszenario (REF)

Direkte Emissionsminderung [Mio. t CO ₂]*	2020	2025	2030	2035
Steuerliche Förderung Gebäudesanierung (inkl. „Türöffner-Effekt“ der CO ₂ -Bepreisung)	0,1	0,4	0,8	1,2
Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG), inkl. Ölkesselverbot (und inkl. „Türöffner-Effekt“ der CO ₂ -Bepreisung)	0,2	1,1	2,2	3,3
Serielle Sanierung	0,0	0,0	0,0	0,1
Energetische Stadtsanierung	Keine Wirkungsabschätzung			
Energieberatung	0,0	0,0	0,0	0,0
Vorbildfunktion Bundesgebäude	0,0	0,0	0,1	0,1
Weiterentwicklung des energetischen Standards	0,0	0,0	0,0	0,0
Städtebauförderung (StBauF)	Keine Wirkungsabschätzung			
Innovationsprogramm Zukunft Bau	0,0	0,0	0,0	0,0
EffSTRA	0,0	0,0	0,0	0,0
CO ₂ -Bepreisung (ohne „Türöffner-Effekte“)	0,0	0,4	1,4	2,0
Änderungen Wohngeld und Mietrecht	Keine Wirkungsabschätzung			
Summe	0,3	1,9	4,4	6,6

Anmerkung: * Nur fossile Brennstoffe in der dezentralen Wärmeerzeugung ohne Fernwärme und Strom

Quelle: Berechnung Öko-Institut

Die Auswirkungen auf die Stromnachfrage sind im Vergleich zur Änderung beim Brennstoffbedarf sehr gering (vgl. Tabelle 73). Die verschiedenen Instrumente entwickeln in Hinblick auf die sektorale Stromnachfrage unterschiedliche Wirkungen. So werden durch Sanierungsmaßnahmen auch elektrische Wärmeerzeuger (insbesondere Nachtspeicherheizungen) und Warmwasserbereiter (z.B. Elektroboiler) durch nicht-elektrische Systeme ersetzt. Gleichzeitig werden durch die Instrumente auch Effizienzmaßnahmen und Technologien gefördert, die zu einer erhöhten Stromnachfrage führen, z.B. aufgrund eines höheren Hilfsstrombedarfs durch die zusätzliche Diffusion von Lüftungsanlagen oder durch den stärkeren Einsatz von Wärmepumpen.

Tabelle 73: (Zusätzliche) Einsparungen bei der sektoralen Stromnachfrage durch das Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)) gegenüber dem Referenzszenario (REF)

Einsparungen bei der sektoralen Stromnachfrage [TWh]	2020	2025	2030	2035
Steuerliche Förderung Gebäudesanierung (inkl. „Türöffner-Effekt“ der CO ₂ -Bepreisung)	0,0	-0,1	-0,1	-0,2
Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG), inkl. Ölkesselverbot (und inkl. „Türöffner-Effekt“ der CO ₂ -Bepreisung)	0,0	-0,1	-0,1	-0,2
Serielle Sanierung	0,0	0,0	0,0	0,0

Einsparungen bei der sektoralen Stromnachfrage [TWh]	2020	2025	2030	2035
Energetische Stadtsanierung	Keine Wirkungsabschätzung			
Energieberatung	0,0	0,0	0,0	0,0
Vorbildfunktion Bundesgebäude	0,0	0,0	0,0	0,0
Weiterentwicklung des energetischen Standards	0,0	0,0	0,0	0,0
Städtebauförderung (StBauF)	Keine Wirkungsabschätzung			
Innovationsprogramm Zukunft Bau	0,0	0,0	0,0	0,0
EffSTRA	0,0	0,0	0,0	0,0
CO ₂ -Bepreisung (ohne „Türöffner-Effekte“)	0,0	-0,1	-0,3	-0,5
Änderungen Wohngeld und Mietrecht	Keine Wirkungsabschätzung			
Summe	0,0	-0,3	-0,6	-0,9

Quelle: Berechnung Öko-Institut

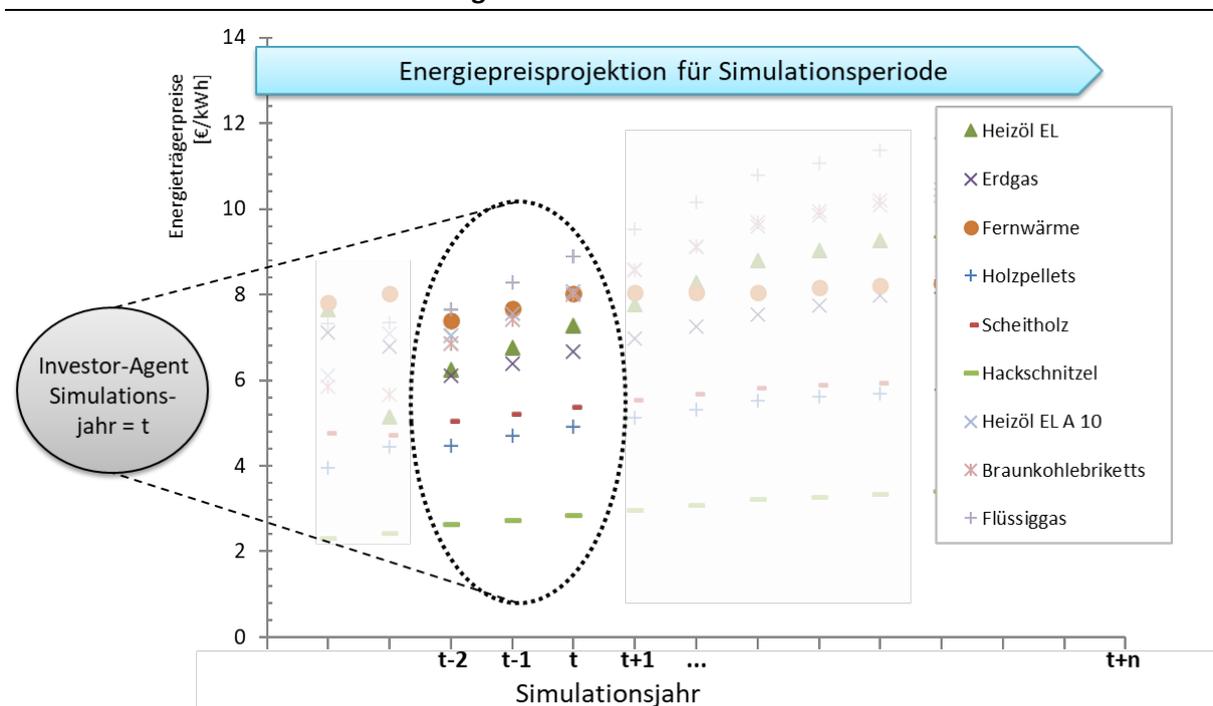
6.2.6 Einordnung der Unsicherheiten

Mit der Szenariomodellierung wird eine Bewertung der Wirkung verschiedener Annahmen, die mit Unsicherheiten verbunden sind, vorgenommen. Hierbei gibt es Unsicherheiten mit Bezug auf die unterstellten Annahmen der exogenen Eingangsdaten. Dazu zählen insbesondere die Entwicklung der Wohnflächennachfrage, die sich signifikant auf den Wärmebedarf auswirkt. Auch die Annahme zu Entwicklung der spezifischen Investitionen ist mit hohen Unsicherheiten verbunden. So sind in den letzten Jahren aufgrund steigender Baupreise die spezifischen Investitionskosten für Effizienzmaßnahmen gestiegen, während die spezifischen Investitionskosten für erneuerbare Wärmeversorgungs-technologien (inklusive der Installationskosten) in den letzten zehn Jahren real konstant geblieben sind. Im Szenario werden keine Lerneffekte aber auch keine Steigerungen mit Bezug auf die realen Technologiekosten angenommen. Auch hier bestehen Unsicherheiten, die sich insbesondere bei einem starken Rückgang der Investitionskosten für Wärmepumpe, Biomassekessel und solarthermischen Anlagen und gleichbleibenden Kosten für fossile Kessel bemerkbar machen. Mit Bezug auf Investitionskosten für Effizienzmaßnahmen ist mit dem heutigen Instrumentarium nicht abzusehen, dass diese signifikant sinken, da insbesondere Intermediäre wie Handwerker nicht mit zusätzlichen Instrumenten adressiert werden. Eine weitere reale Steigerung der Baukosten würde sowohl im Referenzszenario als auch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 zu weniger energetischen Sanierung führen. Mit hohen Unsicherheiten sind auch die Annahmen zu den Energiepreisen (mit und ohne CO₂-Preis) behaftet. Ein geänderter Preispfad führt zu höheren oder niedrigen Energieeinsparungen bzw. Energiekosten, so dass sich die Investitionsentscheidungen der Gebäudeeigentümer in der Realität und im Modell ändern.

Unsicherheiten bestehen in diesem Zusammenhang auch mit Bezug auf die gewählte Methodik für die Szenarienberechnung. Wie jedes Modell, kann das Simulationsmodell Invert/EE-Lab nur der abstrakten Abbildung der Realität dienen. Aufgrund der hohen Detaillierung mit Bezug auf die Abbildung des Gebäudesektors, der Technologien sowie der Akteure und deren individuellen Entscheidungsstrategien und Hemmnisse ermöglicht es jedoch zentrale Abhängigkeiten und Wirkungszusammenhänge mit Bezug auf Politikinstrumente im Gebäudebereich abzubilden. Eine detaillierte Darstellung und Diskussion der mathematischen Formulierung des Modells kann an dieser Stelle nicht erfolgen. Hier sei beispielsweise auf Steinbach (2015) verwiesen. Wie

in Kapitel 6.2.1 dargestellt verbindet Invert/EE-Lab ein technoökonomisches Modell mit einer agentenbasierten Simulation der Investitionsentscheidung. Die Grundlage für die Änderungen des Technologie- und Gebäudebestandes ist die Modellierung der Anzahl der Gebäude, die in jedem Simulationsschritt von einem Jahr eine Änderung der Wärmeversorgung oder der Gebäudehülle durch Instandsetzung oder Sanierungsmaßnahmen erfahren. Dies geschieht über eine Verteilungsfunktion in Abhängigkeit der Alter der Gebäudeelemente und installierten Wärmeversorgungssysteme. Die Wahl der zur installierenden Technologie bzw. der durchzuführenden Sanierungsmaßnahme wird aus Sicht des Gebäudeeigentümers als Investor-Agent modelliert. Die Diffusion der Technologien und Effizienzmaßnahmen wird für jede Kombination von Referenzgebäude und Gebäudeeigentümer modelliert. Ein Referenzgebäude entspricht dabei einer Vielzahl von Gebäuden gleichen Gebäudetyps, Baualters und Sanierungsstands. Gebäudeeigentümer sind im Modell als Investoren-Agenten hinterlegt, die unterschiedliche Kriterien und Wahrnehmungen bei der Investitionsentscheidung unterstellen. Mit Bezug auf die Energiepreise kennen die Agenten zum Zeitpunkt der Investition nur die Energiepreise des gleichen Jahres und der vergangenen Jahre. So kann bei der Investitionsentscheidung entweder der derzeitige Preis unterstellt werden oder die beobachtete Preissteigerung der vergangenen Jahre auf die zukünftige Preissteigerung antizipiert werden (vgl. Steinbach 2015).

Abbildung 33: Kenntnisse über die Energiepreise zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung aus Sicht der Investoren-Agenten



Quelle: (Steinbach 2015)

Die Bewertung auf Basis einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung mittels Annuitätsberechnung stellt damit nur ein mögliches Bewertungskriterium dar. Das Modell ermöglicht damit die Umsetzung der empirischen Erkenntnis, dass insbesondere von selbstnutzenden Eigentümer in Wohngebäude eine Wirtschaftlichkeitsbewertung nach Lehrbuch nicht den realen Investitionsentscheidung entspricht, sondern einzelne Kriterien wie die Höhe der Investitionskosten, Energiekosten oder verschiedene Entscheidungsheuristiken relevant sind (Achnicht 2010; Banfi, Silvia, Mehdi Farsi, Massimo Filippini, and Martin Jakob Retrieved 2010; Braun 2010; Claudy, Marius C., Claus Michelsen, and Aidan O'Driscoll 2011; Michelsen, Carl Christian, and

Reinhard Madlener 2012, 2012; Mills, Bradford, and Joachim Schleich 2012, 2012; Scarpa, Riccardo, and Ken Willis 2010). Für jedes Referenzgebäude werden im Modell alle Kriterienausprägungen der zur Wahl stehenden Wärmeversorgungsoptionen und Energieeffizienzmaßnahmen berechnet. Auf dieser Grundlage wird in Abhängigkeit der Kriteriengewichtung der Investoren-Agenten Nutzwerte für die alternativen Optionen ermittelt, die relative Vorteilhaftigkeit der jeweiligen Optionen in einem bestimmten Referenzgebäude aus Sicht des jeweiligen Gebäudeeigentümers wiedergibt und ein Maß für die Marktanteile der Technologien in dem Gebäudesegment darstellt. Die Marktanteile werden auf Grundlage der Nutzwerte mit einem Nested-Logit-Modell berechnet. Logit-Modelle sind logistische Regressionsfunktionen, die in unterschiedlichen Variationen für Marktsimulationen (Discrete-Choice-Experimenten) angewendet werden (Train 2002). Aus der Funktion resultiert die Wahlwahrscheinlichkeit für eine bestimmte Alternative bzw. Marktanteile mit Bezug auf die Gesamtpopulation – in diesem Fall die Anzahl an realen Gebäuden, die mit einem Referenzgebäude abgebildet werden. Die Höhe der Marktanteile ergibt sich damit aus dem Abstand der Nutzenwerte der Alternativen, so dass nicht nur die Technologie mit dem höchsten Nutzen installiert wird, sowie es bei einem Optimierungsmodell der Fall wäre.

Die hier dargestellte verkürzte Beschreibung des Modellansatzes für die Simulation der Investitionsentscheidung verdeutlicht, dass die Frage nach den Preiselastizitäten für eine Steigerung der Energiepreise z.B. aufgrund der CO₂-Bepreisung nicht so einfach zu beantworten ist. Preiselastizitäten werden in einfachen ökonomischen Modellen als Annahmen definiert, um Änderungen im Verhalten oder in der Investitionsentscheidung aufgrund einer Preisänderungen darzustellen. In dem hier angewendeten Modell sind Elastizitäten jedoch keine Annahme, sondern ein Resultat aus der Modellierung. Um die resultierenden Preiselastizitäten für einen Vergleich mit Annahmen in anderen Modellen zu quantifizieren, müsste jedoch eine Vielzahl von Szenarien mit unterschiedlichen Energiepreispfade gerechnet werden. Die Elastizitäten unterscheiden sich zudem je nach Referenzgebäude, der dafür zur Auswahl stehenden Technologien und der Entscheidungskalküle. Eine Änderung des Heizverhaltens (Betrieb der Heizung, Änderungen der Innenraumtemperatur) aufgrund veränderter Energiepreise wird nicht angenommen.

6.3 Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung

Identisch zu der Abgrenzung der einzelnen Handlungsfelder des Klimaschutzplans 2050 (KSP 2050) der Bundesregierung, werden Brennstoffeinsätze im Haushaltsbereich im Sektor Gebäude erfasst (siehe Unterkapitel 2.1. für die Definition und Abgrenzung der Sektoren). Die sich aus den Strombedarfen ergebenden THG-Emissionen werden in der Energiewirtschaft (im Kapitel 4) berechnet.

6.3.1 Methodik

Die Berechnung der zukünftigen Stromnachfrage der Haushaltsgeräte in den privaten Haushalten erfolgt mit der Energienachfrageplattform FORECAST. Diese Energienachfrageplattform wird auch zur Berechnung der Nachfrage in den Sektoren GHD (Unterkapitel 6.4) und Industrie verwendet (Kapitel 5.1). Das Sektormodell für den Haushaltssektor, FORECAST-Residential, setzt sich neben einem Modul für die Haushaltsgeräte auch aus Modulen für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung sowie einem Modul für die Berechnung der Stromnachfrage durch Elektromobilität zusammen. Im Rahmen dieser Studie kommt jedoch ausschließlich das Geräte-Modul zum Einsatz. Die anderen Teilbereiche der Endenergienachfrage des Haushaltssektors werden bereits über andere Modelle (siehe Kapitel 7 zum Verkehr und Unterkapitel 6.2 zu den Gebäuden) abgedeckt.

FORECAST-Residential setzt sich aus folgenden Gerätekategorien zusammen, die im Modell des Weiteren nach Technologien und/oder Effizienzklassen differenziert werden:

- a) Große elektrische Haushaltsgeräte (darunter: Kühl- und Gefriergeräte, Spülmaschinen, Waschmaschinen, Trockner, Herde)
- b) IKT-Endgeräte (darunter: Desktop-Computer, PC-Bildschirme, Laptops, Fernseher, Set-Top-Boxen, Modem/Router)
- c) Beleuchtung
- d) Klimageräte
- e) Sonstige elektrische Anwendungen: hierunter werden elektrische Kleingeräte erfasst (darunter: Kaffeemaschinen, Staubsauger, Bügeleisen, Toaster, Fön, Mikrowelle, Dunstabzugshaube). Des Weiteren stellt diese Kategorie ein Restaggregat dar, das alle in den übrigen Bereichen noch nicht berücksichtigten elektrischen Anwendungen in den privaten Haushalten umfasst. Diese Kategorie beinhaltet sowohl eine Vielzahl an weiteren elektrischen Kleingeräten (u.a. Rasierer) als auch die Stromnachfrage potenziell neuer Geräte, die bis 2035 neu in den Markt diffundieren.

Die aufgeführten Gerätekategorien beinhalten bis auf die Herde ausschließlich strombasierte Anwendungen. Bei den Kochherden wird zusätzlich die Gasnachfrage berechnet.

Aufgrund der hohen Datenverfügbarkeit über die Anzahl und die durchschnittlichen spezifischen Verbräuche von Haushaltsgeräten wird deren Endenergienachfrage über ein Bestandsmodell berechnet. Da für die Berechnung der Bestandsumwälzung auch vergangenheitsbezogene Daten zu erheben sind, werden in einem vorgelagerten Schritt empirische Zeitreihen für die jahresspezifische Geräteanzahl und den spezifischen Verbrauch der Geräte ermittelt bzw. geschätzt. Die Projektion des Gerätebestandes erfolgt mittels einer logistischen Funktion, die sich aus einer Kleinsten-Quadrate-Abweichung, basierend auf der empirischen Bestandsentwicklung und einer geschätzten Sättigungsgrenze, berechnet.

Die Bestandsumwälzung bzw. die Marktdiffusion neuer Geräte erfolgt anhand einer gerätespezifischen Lebensdauer mit normalverteilter Ausfallwahrscheinlichkeit, durch die der Zeitpunkt des Lebensdauer-Endes eines alten Gerätes und des Lebensdauer-Anfangs eines neuen Gerätes determiniert wird. Die Wahl der Technologien bzw. Effizienzklassen der ersetzten Altgeräte und des Bestandszuwachses, die als Neugeräte in den Bestand diffundieren, orientiert sich an der Ausgestaltung eines Szenarios, insbesondere an den implementierten Mindesteffizienzstandards, welche durch die Ökodesign-Richtlinie definiert werden, und Schätzungen für den Eintritt neuer Technologien und Effizienzklassen in den Markt. Die jährliche Endenergienachfrage aller Geräte errechnet sich demzufolge aus dem spezifischen Verbrauch (basiert entweder auf den Betriebsstunden bspw. bei Fernsehern oder auf der Anzahl an Zyklen pro Jahr bspw. bei Spülmaschinen), der durchschnittlichen Ausstattungsrate pro Wohneinheit (beispielsweise der Anzahl der Beleuchtungspunkte pro Wohneinheit oder der Anteil der Haushalte mit Klimageräten) und der Anzahl der privaten Haushalte.

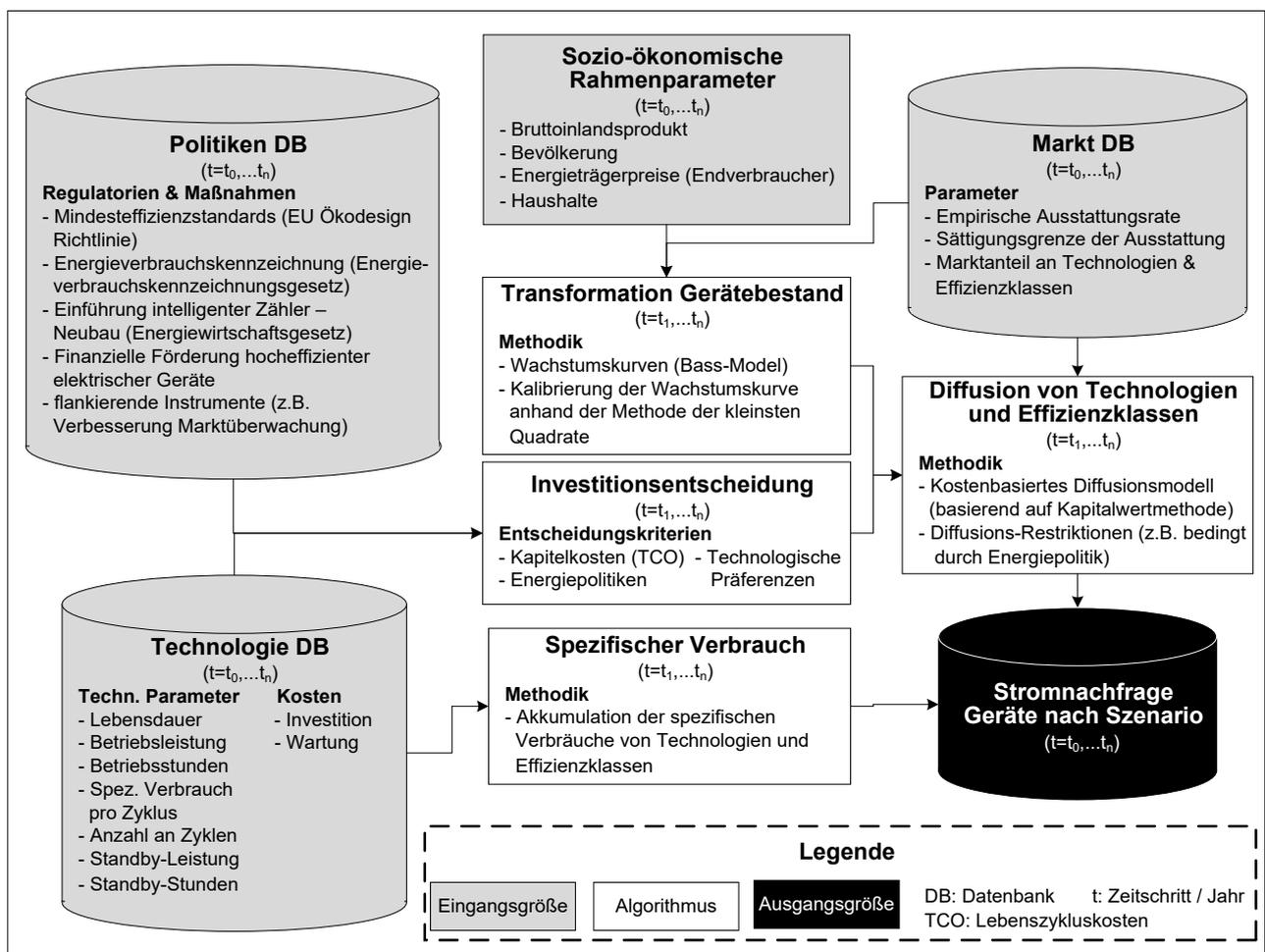
Dieser Aufbau gilt grundsätzlich für alle berücksichtigten Gerätekategorien mit Ausnahme der sonstigen elektrischen Anwendungen. Bei dieser Kategorie lässt sich dieser Ansatz aufgrund der großen Heterogenität nicht durchführen. Die Stromnachfrage im Basisjahr wird für die sonstigen elektrischen Anwendungen daher als Differenz zur Stromnachfrage laut der Energiebilanz (ohne den Verbrauch für Raumwärme und Warmwasser) ermittelt und für die Zukunft anhand einer abgeschätzten Ausstattungsrate fortgeschrieben.

Um auch die Kosten für unterschiedliche Diffusionspfade in den Szenarien bestimmen zu können, wird für alle berücksichtigten Anwendungen eine Wirtschaftlichkeitsbewertung mittels der Kapitalwertmethode durchgeführt, die folgende Kostenkategorien berücksichtigt (Elsland 2016):

- a) Spezifische Investitionen der Geräte unter Berücksichtigung von Kostenlernfaktoren
- b) Stromkosten der Geräte
- c) Wartungskosten der Geräte

Ein Überblick über die qualitativen Zusammenhänge der Modellberechnung ist in Abbildung 34 dargestellt.

Abbildung 34: Modellüberblick FORECAST-Residential (Geräte-Modul)



Quelle: (Elsland 2016)

6.3.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario

Für die Beschreibung der Instrumente im Referenzszenario sei auf das MMS Szenario des Projektionsberichts 2019 verwiesen.

Gerätebestand

Der Gerätebestand wird hier über die geschätzte Entwicklung der Ausstattungsrate ermittelt, die mit der angenommenen Anzahl an Haushalten (siehe Kapitel 6.1.1) multipliziert wird. Wie in den vorangegangenen Berichten, orientieren sich die Annahmen zur Entwicklung der Ausstattungsrate an den in den Politikenszenarien VI (Bundesregierung 2013) zu Grunde gelegten Trends bzw.

für IKT an den Prognosen aus (Fraunhofer IZM 2015). Die erwartete Entwicklung des Bestands an elektrischen Geräten in privaten Haushalten zeigt Tabelle 74.

Die jeweiligen Ausstattungsraten der privaten Haushalte mit elektrischen Haushaltsgeräten im Basisjahr 2016 werden auf Grundlage der regelmäßigen Veröffentlichungen des ZVEI ermittelt. Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung wird für die meisten großen elektrischen Haushaltsgeräte von einer Sättigung ausgegangen und daher mit nur noch geringfügig steigenden oder konstanten Ausstattungsraten gerechnet. Der moderate Bestandszuwachs ist daher überwiegend auf den angenommenen Anstieg der Anzahl an Haushalten von 39,5 Mio. im Jahr 2010 auf rund 42,8 Mio. im Jahr 2030 zurückzuführen. Lediglich bei Spülmaschinen und Wäschetrocknern wird bis 2030 noch eine Erhöhung der Ausstattungsraten angenommen. Insgesamt wird dieser Teil des Stromverbrauchs in den kommenden Jahren jedoch überwiegend durch Ersatzbeschaffungen bestimmt.

Für IKT-Geräte wird hingegen für die meisten hier berücksichtigten Gerätegruppen mit weiter steigenden Ausstattungsraten gerechnet. Dies gilt insbesondere für Laptops, Set-Top-Boxen und Router, wo noch deutliche Bestandszuwächse zu erwarten sind. Lediglich für Desktop-PCs wird eine sinkende Ausstattungsraten angenommen, da erwartet wird, dass diese weiterhin vermehrt durch Laptops ersetzt werden. Bei den dieses Verbrauchssegment insgesamt dominierenden Fernsehern dürfte sich allerdings die heute schon hohe Ausstattungsraten von rund 1,6 TV-Geräten pro Haushalt in Deutschland nur noch moderat erhöhen. Auch für die Ausstattung mit Computer-Bildschirmen wird nur ein moderater Anstieg berücksichtigt.

Das Modul Beleuchtung wird im Berechnungsmodell über die Anzahl der Beleuchtungspunkte pro Wohneinheit abgebildet. Hier wird mit einer weitgehend konstanten Anzahl von 33 bis 35 Beleuchtungspunkten gerechnet. Schwierig zu bestimmen ist aufgrund der unzureichenden Datengrundlage der heutige und zukünftige Bestand an Klimageräten in privaten Haushalten. Die Abschätzung erfolgt hier in Anlehnung an die Review-Studie in Lot 10 (EU Commission 2018) zu Raumklimageräten in privaten Haushalten. Beginnend bei einer Ausstattungsraten von sieben Prozent wird hier von einem Anstieg auf bis zu 18 Prozent im Jahr 2030 ausgegangen.

Tabelle 74: Erwartete Entwicklung des Bestands an elektrischen Geräten in privaten Haushalten

Gerätebestand (Anzahl Geräte in Tausend)	2015	2020	2025	2030	2035
Große elektrische HH-Geräte					
Kühlschränke	43.434	44.787	45.299	45.682	46.115
Gefrierschränke	28.671	29.786	30.313	30.758	31.248
Waschmaschinen	38.844	40.081	40.531	40.874	41.281
Geschirrspüler	28.507	30.276	31.118	31.653	32.106
Trockner	23.411	27.872	30.581	32.240	33.317
Herde (Gas- und Elektroherde)	41.100	42.243	42.575	42.809	43.118
IKT -Endgeräte					
Desktop-PC	35.699	38.450	37.491	33.220	26.944
Computer-Bildschirm	24.824	36.887	38.223	39.440	40.690

Laptops	16.974	21.853	27.154	33.768	42.411
Fernseher	63.590	67.552	70.078	72.318	74.564
Set-Top-Boxen	38.227	41.445	43.720	44.873	45.865
Router	25.453	27.450	28.785	29.915	30.963
Beleuchtung	1.356.167	1.420.335	1.455.311	1.484.724	1.514.607
Klimageräte	2.758	4.334	6.046	7.808	9.516

Quellen: Barthel et al. (2010), Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (2008), EuP Preparatory Studies Lot 10 (2008), Fraunhofer IZM (Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration), Fraunhofer ISI (Institut für System- und Innovationsforschung) (2009), Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) (2002-2010), ZVEI (2006-2009), Statistisches Bundesamt (StBA) (2010), StBA (2014), Fraunhofer IZM (2015), Van Holsteijn en Kemna B.V. et al. (2014), Schätzung Fraunhofer ISI

Spezifischer Geräteverbrauch

Der spezifische Stromverbrauch der einzelnen Gerätekategorien wird im Modell durch die jeweiligen Nutzungszeiten in den verschiedenen Betriebszuständen, die Verteilung der Anteile der Energieeffizienzklassen an den Geräteverkäufen sowie die spezifische Leistungsaufnahme in den verschiedenen Betriebszuständen bestimmt. Letztere wiederum wird insbesondere durch die jeweiligen Anforderungen an Mindesteffizienzstandards durch die Ökodesign-Richtlinie bestimmt. Auch die Anteile der Energieeffizienzklassen an den Geräteverkäufen werden zumindest am unteren Rand durch die Anforderungen der Ökodesign-Richtlinie beschränkt, wodurch weniger effiziente Klassen zunehmend nicht mehr auf den Markt gebracht werden dürfen.

Die Nutzungszeiten in den verschiedenen Betriebszuständen sind vor allem für die IKT-Geräte relevant. Hier wird im Modell überwiegend auf die Annahmen in (Fraunhofer IZM 2015) zurückgegriffen. Für viele IKT-Geräte wird dabei von weiter steigenden Nutzungszeiten ausgegangen. Dies führt zu einer teilweisen Kompensation technischer Effizienzverbesserungen der Geräte und zu einem entsprechend geringeren Rückgang – oder sogar Anstieg – des spezifischen Stromverbrauchs. Den gleichen Effekt haben Trends wie größere Fernseher und eine erhöhte Leistungsfähigkeit der Geräte (so genannter direkter Rebound-Effekt).

Die auf der Basis dieser Annahmen erwartete Entwicklung des spezifischen Verbrauchs im REF zeigt Tabelle 75. Danach liegt der erwartete Rückgang des spezifischen Stromverbrauchs für die großen elektrischen Geräte zwischen den Jahren 2015 und 2030 zwischen knapp 11 % und 33 %. Im Bereich der IKT-Geräte fallen die erwarteten spezifischen Verbrauchsreduktionen sehr unterschiedlich aus, da manche Geräte einen Technologiewechsel erfahren, während andere leistungsstärker werden und sich der Verbrauch daher kaum senkt (bspw. Laptops) oder noch deutlich erhöht (insb. Fernseher). Bei Klimageräten wird im REF ein Anstieg des spezifischen Verbrauchs von rund 11 % bis 2030 erwartet. Die Entwicklung wird hier durch verlängerte Nutzungszeiten und leistungsstärkere Geräte einerseits und die angenommenen Anteile der Effizienzklassen an den künftigen Geräteverkäufen andererseits bestimmt.

Tabelle 75: Erwartete Entwicklung des spezifischen Verbrauchs elektrischer Geräte in privaten Haushalten im Referenzszenario (REF)

Spezifischer Geräteverbrauch	2015	2016	2020	2025	2030	2035
	kWh/ Gerät	REF: Veränderung gegenüber 2015 in %				
Große elektrische HH-Geräte						
Kühlschränke	223,5	-3,5	-17,9	-27,3	-29,1	-30,4
Gefrierschränke	232,1	-2,8	-14,2	-27,4	-29,2	-30,5
Waschmaschine	163,3	-1,7	-8,8	-17,4	-19,6	-21,0
Geschirrspüler	363,6	-1,7	-8,0	-12,7	-12,6	-13,9
Trockner	211,1	-3,9	-17,6	-30,7	-32,2	-33,0
Elektroherd	771,2	-0,3	-3,4	-7,0	-10,7	-14,8
IKT-Endgeräte						
Desktop-PC	58,4	-0,5	-2,7	-7,2	-11,1	-11,1
Computer-Bildschirm	36,5	-4,9	-19,5	-36,7	-39,2	-39,2
Laptops	30,1	0,0	2,0	1,3	-1,0	-1,0
Fernseher	146,4	-0,3	0,7	5,3	10,2	15,1
Set-Top-Boxen	50,2	0,4	1,2	1,4	1,4	0,2
Router	71,2	0,0	-3,8	-9,3	-13,3	-13,3
Beleuchtung pro Haushalt	195,1	-5,3	-28,6	-47,2	-62,8	-66,5
Klimageräte	378,4	-1,4	-3,2	4,4	10,9	12,1

Quellen: Barthel et al. (2010), Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (2008), EuP Preparatory Studies Lot 10 (2008), Fraunhofer IZM (Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration), Fraunhofer ISI (Institut für System- und Innovationsforschung) (2009), Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) (2002-2010), ZVEI (2006-2009), Statistisches Bundesamt (StBA) (2010), StBA (2014), Fraunhofer IZM (2015), Van Holsteijn en Kemna B.V. et al. (2014), Schätzung Fraunhofer ISI

6.3.3 Ergebnisse Referenzszenario

Einen Überblick über die Entwicklung des Stromverbrauchs privater Haushalte im Referenzszenario nach Anwendungsbereichen gibt Tabelle 76. Dabei verzeichnen die privaten Haushalte von 2015 bis 2030 einen kontinuierlichen Rückgang des Stromverbrauchs. Bei der weißen Ware, welche Kühl- und Gefrierschränke, Waschmaschinen, Geschirrspülmaschinen und Trockner umfasst, wird insgesamt von einer relativ gleichbleibenden Ausstattungsrate ausgegangen, lediglich der Anteil der Trockner wird sich voraussichtlich in den kommenden Jahren noch leicht erhöhen. Bei der weißen Ware ist der zu erwartende Rückgang des Stromverbrauchs durch Effizienzsteigerungen so groß, dass er den zusätzlichen Stromverbrauch zukommender Geräte, durch die größere Anzahl an Haushalten, überkompensiert. Gegenteiliges ist bei den IKT-Endgeräten der Fall: trotz des teils beträchtlichem Rückgangs des spezifischen Energieverbrauchs der meisten IKT-Geräte (eine Ausnahme bilden die Fernseher) führen die angenommenen deutlich höhe-

ren Ausstattungsraten zu einem deutlichen Anstieg des Energieverbrauchs. Im Beleuchtungsbereich führt der Wechsel zu LED-Beleuchtung zu deutlich niedrigeren spezifischen Verbräuchen, bei etwa gleichbleibenden Ausstattungsraten, wodurch der Stromverbrauch hier kontinuierlich und deutlich abfällt. Im Gegensatz dazu wird bei den Klimageräten sowohl von einem deutlichen Anstieg der Ausstattungsraten als auch von höheren spezifischen Verbräuchen durch mehr Leistungsfähigkeit ausgegangen. In Folge dessen wird der Stromverbrauch für Klimaanlage bis 2030 deutlich ansteigen.

Tabelle 76: Entwicklung des Stromverbrauchs privater Haushalte 2010–2035 im Referenzszenario (REF)

Stromverbrauch REF	2010	2015	2016	2020	2025	2030	2035
	TWh						
Weißer Ware	39,8	38,0	37,4	35,1	32,3	32,3	32,3
Elektroherd	14,2	16,5	17,0	18,4	19,6	18,5	17,4
IKT-Endgeräte	16,3	16,9	17,0	17,9	18,6	19,4	20,4
Beleuchtung	10,3	7,9	7,5	5,6	4,1	2,9	2,6
Klimageräte	0,6	1,0	1,1	1,6	2,4	3,3	4,0
Sonstiger Strom	26,2	31,7	31,5	30,6	29,1	27,7	27,0
Summe	107,3	112,1	111,5	109,3	106,2	104,2	103,7

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Für die Quantifizierung der Einzelinstrumente im Referenzszenario sei auf das MMS Szenario des Projektionsberichts 2019 verwiesen.

6.3.4 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Die Rahmendaten und Vorüberlegungen des Szenarios Klimaschutzprogramm 2030 sind identisch zu denen des Referenzszenarios. Trotz des sehr umfangreichen Maßnahmenkatalogs des Klimaschutzprogramms 2030 wird nur eine Maßnahme identifiziert, welche sich direkt auf den Stromverbrauch der privaten Haushalte auswirken wird. Diese Maßnahme ist die Entlastung der Bürger*innen durch die Senkung der Stromkosten (Bundesregierung, 2019c - Abschnitt 3.5). Diese soll insbesondere durch die Senkung der EEG-Umlage erzielt werden. Aber auch andere staatlich induzierte Preisbestandteile (wie beispielsweise Netzentgelte, Umlagen und Abgaben) könnten langfristig reduziert werden und so dem gleichzeitig steigenden CO₂-Preis entgegenwirken. Durch die Kombination aus steigendem CO₂-Preis und Senkung der EEG-Umlage ergeben sich für die privaten Haushalte im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 insgesamt leicht niedrigere Stromkosten als im Referenzszenario. Da die Stromkostensenkung die einzige Veränderung zum Referenzszenario darstellt, kann deren Wirkung ermittelt werden, in dem die Differenz zwischen den Einsparungen im Referenzszenario und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 gebildet wird. Des Weiteren können Überschneidungseffekte mit den anderen Maßnahmen bilanziell ausgeschlossen werden, das heißt, die Einsparungseffekte werden nicht doppelt angerechnet.

Gerätebestand

Da sich die für die Ermittlung des Gerätebestandes relevanten Annahme zu der Anzahl der Haushalte sowie die angenommenen Ausstattungsraten nicht verändern, wird der Gerätebestand im

Szenario Klimaschutzprogramm 2030 identisch angenommen wie im Referenzszenario (siehe Tabelle 74).

Spezifischer Geräteverbrauch

Grundlegend basiert der durchschnittliche spezifische Geräteverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 auf den identischen Vorüberlegungen wie beim Referenzszenario (siehe Abschnitt 6.3.2). Durch die minimal niedrigeren Stromkosten in diesem Szenario setzen sich energieeffizientere Geräte im Markt jedoch etwas langsamer durch, da die höheren Anschaffungskosten sich langsamer amortisieren. Dadurch weisen einige Gerätegruppen durchschnittlich einen minimal höheren spezifischen Geräteverbrauch auf als im Referenzszenario (vgl. Tabelle 75). Die auf dieser Basis erwartete Entwicklung des spezifischen Verbrauchs im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sind in Tabelle 77 zusammengefasst.

Tabelle 77: Erwartete Entwicklung des spezifischen Verbrauchs elektrischer Geräte in privaten Haushalten im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))

Spezifischer Geräteverbrauch	2015	2016	2020	2025	2030	2035
	kWh/ Gerät	KSPr (Jan 2020): Veränderung gegenüber 2015 in %				
Große elektrische HH-Geräte						
Kühlschränke	223,5	-3,5	-17,9	-27,1	-28,6	-30,1
Gefrierschränke	232,1	-2,8	-14,2	-27,2	-28,9	-30,1
Waschmaschine	163,3	-1,7	-8,8	-17,3	-19,5	-20,9
Geschirrspüler	363,6	-1,7	-8,0	-12,6	-12,5	-13,9
Trockner	211,1	-3,9	-17,6	-30,3	-31,5	-32,5
Elektroherd	771,2	-0,3	-3,4	-7,0	-10,7	-14,8
IKT-Endgeräte						
Desktop-PC	58,4	-0,5	-2,7	-7,2	-11,1	-11,1
Computer-Bildschirm	36,5	-4,9	-19,5	-36,7	-39,2	-39,2
Laptops	30,1	0,0	2,0	1,3	-1,0	-1,0
Fernseher	146,4	-0,3	0,7	5,5	10,5	15,3
Set-Top-Boxen	50,2	0,4	1,2	1,4	1,4	0,2
Router	71,2	0,0	-3,8	-9,3	-13,3	-13,3
Beleuchtung pro Haushalt	195,1	-5,3	-28,5	-47,2	-62,7	-66,5
Klimageräte	378,4	-1,4	-3,2	4,4	11,0	12,2

Quellen: Barthel et al. (2010), Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (2008), EuP Preparatory Studies Lot 10 (2008), Fraunhofer IZM (Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration), Fraunhofer ISI (Institut für System- und Innovationsforschung) (2009), Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) (2002-2010), ZVEI (2006-2009), Statistisches Bundesamt (StBA) (2010), StBA (2014), Fraunhofer IZM (2015), Van Holsteijn en Kemna B.V. et al. (2014), Schätzung Fraunhofer ISI

6.3.5 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

6.3.5.1 Gesamtergebnisse

Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sind keine dezidierten Maßnahmen für Privathaushalte vorgesehen. Die einzigen Maßnahmen, die sich direkt auf dem Stromverbrauch der Privathaushalte auswirken, sind daher diejenigen, welche die Stromkosten beeinflussen. Eine Senkung der Stromkosten (insbesondere durch die Senkung der EEG-Umlage) ist im Klimaschutzprogramm 2030 vorgesehen (Bundesregierung, 2019c - Abschnitt 3.5). Im Vergleich zum Referenzszenario ergibt sich bei gleichbleibendem Gerätebestand durch die leicht gesenkten Stromkosten ein minimal höherer spezifischer Geräteverbrauch und daher ein minimal höherer Strombedarf für einige Anwendungen. Dieser minimal höhere Strombedarf entfällt vor allem auf die Weiße Ware, da hier Stromkosten in der Kaufentscheidung eine größere Rolle spielen als beispielsweise bei IKT-Geräten, bei denen andere Kriterien oftmals im Vordergrund stehen. Die Stromverbrauchsentwicklung privater Haushalte im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 ist nach Anwendungsbereichen in Tabelle 78 zusammengefasst.

Auch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 verzeichnen die privaten Haushalte von 2015 bis 2030 einen kontinuierlichen Rückgang des Stromverbrauchs. Er liegt im Jahr 2030 mit insgesamt 104,3 TWh um 0,1 TWh über dem Verbrauch im Referenzszenario.

Tabelle 78: Entwicklung des Stromverbrauchs privater Haushalte 2010–2035 im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))

Stromverbrauch KSPr (Jan 2020)	2010	2015	2016	2020	2025	2030	2035
	TWh						
Weißer Ware	39,8	38,0	37,4	35,1	32,4	32,5	32,4
Elektroherd	14,2	16,5	17,0	18,4	19,6	18,5	17,4
IKT-Endgeräte	16,3	16,9	17,0	17,9	18,6	19,4	20,4
Beleuchtung	10,3	7,9	7,4	5,6	4,1	2,9	2,6
Klimageräte	0,6	1,0	1,1	1,6	2,4	3,3	4,0
Sonstiger Strom	26,2	31,7	31,4	30,6	29,1	27,7	27,0
Summe	107,3	112,1	111,5	109,2	106,3	104,3	103,9

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

6.3.5.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Das Klimaschutzprogramm 2030 sieht vor die Bürger*innen durch die Senkung der Stromkosten zu entlasten. Weitere Maßnahmen, die sich direkt auf die Geräte in privaten Haushalten auswirken, sind nicht vorgesehen. Daher lässt sich der minimal höhere Stromverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 im Vergleich zum Referenzszenario eindeutig dieser Maßnahme zuordnen (siehe Tabelle 79). Indirekt geschieht dies dadurch, dass die bestehenden Maßnahmen (z.B. die EU-Energielabel-Verordnung und die Mindeststandards nach der EU-Ökodesign-Richtlinie) durch die niedrigeren Strompreissenkungen weniger Wirkung zeigen. Da diese Auswirkungen jedoch minimal sind, werden sie gesammelt als Auswirkung der Senkung der Stromkosten ausgewiesen. Die sich hieraus ergebenden THG-Emissionen werden gemeinsam mit den anderen Emissionen aus dem Sektor Gebäude in der Energiewirtschaft erfasst und sind Teil der in Kapitel 4 dargestellten Gebäudeemissionen.

Tabelle 79: Wirkung der strombezogenen Maßnahmen im Sektor private Haushalte im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))

Maßnahme	Einsparungen am Stromaufkommen				
	2015	2020	2025	2030	2035
	TWh				
Summe aller Einzelmaßnahmen aus dem REF	-8,4	-20,0	-30,4	-35,2	-39,8
Senkung der Stromkosten (insb. durch EEG-Umlagensenkung)	0	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2
Summe aller Einzelmaßnahmen im KSPr (Jan 2020)	-8,4	-19,9	-30,3	-35,1	-39,6

Quelle: Schätzung Fraunhofer ISI

Anmerkung: Erklärung der Instrumententypen: Tabelle 143 im Anhang A1

6.4 Geräte und Prozesse im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Wie in der Abgrenzung der einzelnen Handlungsfelder des Klimaschutzplans 2050 (KSP 2050) der Bundesregierung, werden Brennstoffeinsätze im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen im Sektor Gebäude erfasst (siehe Unterkapitel 2.1. für die Definition und Abgrenzung der Sektoren). Die sich aus den Strombedarfen ergebenden THG-Emissionen werden in der Energiewirtschaft (im Kapitel 4) berechnet.

6.4.1 Methodik

Für die Modellierung der nicht-gebäudebezogenen Wärme- und Stromnachfrage wird das Modul FORECAST-Tertiary eingesetzt (siehe z.B. Fleiter et al. 2010). Das Modul ist vom Aufbau vergleichbar mit dem Industriemodul, allerdings an Datenverfügbarkeit und Technologiestruktur im Sektor GHD angepasst. D.h. im Modell wird über ein Mengengerüst der Energieverbrauch einzelner Branchen und Energiedienstleistungen in Abhängigkeit von Rahmenbedingungen (u.a. Wirtschaftsentwicklung, Effizienzpolitik, Energiepreise) berechnet.

Zentrale Aktivitätsgrößen sind die Anzahl der Beschäftigten und die Nutzfläche je Branche des Sektors GHD. Der Energieverbrauch der einzelnen Branchen setzt sich wiederum als Summe einzelner Energiedienstleistungen zusammen. Die Verbreitung von Effizienzmaßnahmen senkt den spezifischen Energieverbrauch einzelner Energiedienstleistungen und spiegelt so eine unterschiedliche Überwindung von Hemmnissen durch politische Instrumente zur Förderung der Energieeffizienz wider bzw. variierende Energiepreise. Modelliert wird die Diffusion von Effizienzmaßnahmen als eine Summe von Investitionsentscheidungen der Unternehmen. Im Folgenden wird auf die einzelnen Ebenen Aktivitätsgrößen, Energiedienstleistungen und Technologiestruktur sowie die Modelllogik detaillierter eingegangen.

Die Aktivitätsgrößen Anzahl der Beschäftigten und Nutzfläche je Branche bilden die zentralen Größen im Mengengerüst für die Hochrechnung des Energieverbrauchs. Beide Größen sind direkter an den Energieverbrauch gekoppelt als die Wertschöpfung des Sektors. Dabei sind die Beschäftigten eher für Energiedienstleistungen wie EDV-Ausstattung relevant, während die Nutzfläche für die gebäudebezogenen Energiedienstleistungen die zentrale Größe ist. Die Sektorale Einteilung der Aktivitätsgrößen orientiert sich dabei an der Klassifizierung der Wirtschaftszweige 2003 (WZ 2003) und unterscheidet acht Branchen. Entsprechend erlaubt sie über das hinterlegte Mengengerüst eine „Bottom-up“-Berechnung des Energieverbrauchs für jede der Branchen, was deutlich über die Detaillierung der Energiebilanzen nach AGEB hinausgeht, welche den Energieverbrauch nur für den Sektor GHD als Ganzes ausweisen.

Der Energiebedarf je Branche wird als Summe des Energiebedarfs von bis zu 13 einzelnen Energiedienstleistungen (EDL) berechnet, die zusammen für den Großteil des Stromverbrauchs im Sektor GHD verantwortlich sind. Beispiele für EDL sind Beleuchtung, Kühlung oder IKT-Anwendungen. Bei den meisten EDL ergibt sich die absolute Nachfrage aus der globalen Aktivitätsgröße (entweder Fläche oder Beschäftigte) und der EDL-bezogenen Aktivitätsgröße (z.B. Anteil beleuchtete Fläche). Einige EDL sind nicht an die globalen Aktivitätsgrößen geknüpft, wie z.B. die Straßenbeleuchtung. Der Energiebedarf je EDL ist – soweit möglich – mit verfügbaren Erhebungen (vor allem Schломann et al. 2014) und Statistiken (z.B. Anwendungsbilanz) abgeglichen.

6.4.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Für den Sektor Geräte und Prozesse in GHD gibt es zwischen dem Referenzszenario und dem Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) keinen Unterschied.

Für die Beschreibung der Instrumente im Referenzszenario sei auf das MMS Szenario des Projectionsberichts 2019 verwiesen.

6.4.3 Ergebnisse Referenzszenario und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Die Entwicklung der THG-Emissionen des GHD-Sektors wird in Kapitel 6.5 dargestellt.

Im Folgenden ist die Wirkung der einzelnen Maßnahmen für den GHD-Sektor (Prozesse) zusammengefasst. Bei den Stromeinsparungen wird deutlich, dass die Mindeststandards der EU Ökodesign-Richtlinie die mit Abstand höchste Wirkung haben. Bei den Brennstoffeinsparungen ist ein Großteil der Wirkung auf Energieberatungen sowie Energieeffizienznetzwerke zurückzuführen.

Tabelle 80: Wirkung der Maßnahmen im Sektor GHD in beiden Szenarien - Stromeinsparungen

Maßnahme	Strom-Einsparungen				
	2015	2020	2025	2030	2035
	TWh/a				
Ökologische Steuerreform	2,1	3,7	3,5	3,5	3,6
EEG-Umlage	3,6	8,1	6,8	4,4	1,7
Energieberatung Mittelstand	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
Mindeststandards I	7,9	10,9	11,9	11,8	11,7

Maßnahme	Strom-Einsparungen				
	2015	2020	2025	2030	2035
	TWh/a				
Förderung Querschnittstechniken	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3
Förderung von Kälte und Klimaanlage im Gewerbe	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
500 Effizienznetzwerke	0,0	0,1	0,2	0,4	0,4
Wettbewerbliche Ausschreibung (Step Up)	-	0,1	0,4	0,6	0,6
Pilotprogramm Einsparzähler	-	0,1	0,2	0,3	0,3
Energieaudit Nicht-KMU	0,1	0,6	1,1	1,2	1,2
Richtlinie Abwärmevermeidung und -nutzung	-	0,1	0,1	0,2	0,1
KfW Effizienzprogramm	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3
NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen	0,7	1,8	2,6	2,6	2,6
Summe	14,7	26,0	27,8	25,8	23,1

Quelle: Berechnung Fraunhofer ISI

Tabelle 81: Wirkung der Maßnahmen im Sektor GHD im MMS – Einsparungen von Brennstoffen und CO₂e-Emissionen

Maßnahme	Brennstoff-Einsparungen					Vermeidung von CO ₂ -Emissionen				
	PJ/a					Mio. t CO ₂ e/a				
Ökologische Steuerreform	-	0,1	0,2	0,2	0,3	-	0,0	0,0	0,0	0,0
EEG-Umlage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Energieberatung Mittelstand	1,8	2,4	1,4	1,3	1,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Mindeststandards I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Förderung Querschnittstechniken	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Förderung Prozesstechniken	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Förderung von Kälte und Klimaanlage im Gewerbe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500 Effizienznetzwerke	0,2	0,9	2,6	4,0	4,6	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2
Wettbewerbliche Ausschreibung (Step Up)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pilotprogramm Einsparzähler	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Maßnahme	Brennstoff-Einsparungen					Vermeidung von CO ₂ -Emissionen				
	PJ/a					Mio. t CO ₂ e/a				
Energieaudit Nicht-KMU	0,7	4,3	7,8	8,5	8,5	0,0	0,2	0,4	0,4	0,4
Richtlinie Abwärmevermeidung und -nutzung	-	1,8	4,3	4,9	3,1	-	0,1	0,2	0,2	0,1
KfW-Effizienzprogramm	0,5	1,7	3,1	3,9	4,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen	0,3	0,7	1,0	1,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	3,5	12,0	20,6	24,1	23,0	0,2	0,6	0,9	1,0	1,0

Anmerkung: Die Wirkung der Energieberatung Mittelstand enthält entgegen der Abgrenzung dieses Kapitels auch gebäudebezogene Maßnahmen.

Quelle: Berechnung Fraunhofer ISI

6.5 Gesamtergebnisse Gebäude

Im Folgenden werden die Resultate für den Sektor Gebäude (Abschnitt 6.2 bis 6.4) zusammengefasst. Sowohl für das Referenzszenario als auch für das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 wird die zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den verschiedenen Kategorien des Sektors dargestellt und diskutiert.

6.5.1 Referenzszenario

Im Gebäudesektor stellen die Treibhausgasemissionen der Raumwärme- und Warmwasserbereitstellungen in Wohngebäuden (private Haushalte) die wichtigste Kategorie dar (Tabelle 82). Deren Emissionen nehmen im Referenzszenario über den gesamten Zeitraum kontinuierlich ab. Im Bereich der Nichtwohngebäude (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Sonstige) werden die stärksten Emissionsminderungen zwischen 1990 und 2005 verzeichnet; bis 2035 werden die Emissionen weiter abnehmen.

Das Referenzszenario spiegelt die sich überlagernden Effekte der autonomen Entwicklung sowie die Wirkung des heutigen Rechts- und Förderrahmens wider. Haupttreiber für die Emissionsreduktion im Referenzszenario ist der Rückgang des Brennstoffbedarfs aufgrund energetischer Sanierungsmaßnahmen sowie des Energieträgerwechsels in Verbindung mit dem Heizungstausch. Entsprechend der Entwicklung der letzten Jahre geht hierbei insbesondere der Heizölverbrauch zurück, während der Einsatz erneuerbarer Energien und Fernwärme absolut steigen. Erdgas nimmt absolut ab, allerdings steigt aufgrund des durch die Energieeinsparmaßnahmen des Referenzszenarios geringeren Wärmebedarfs im Jahr 2035 der relative Anteil an der Wärmebereitstellung. Entsprechend der Inventarbilanzierungen werden im Sektor Gebäude nur die Emissionen aus dem Brennstoffverbrauch bilanziert, sodass Fernwärmeverbrauch und Stromverbrauch nicht im Gebäudesektor bilanziert werden. Diese werden in den Bereichen Energiewirtschaft und Industrie bilanziert.

Die Treibhausgasemissionen, die gemäß dem Sektorenzuschnitt des Bundes-Klimaschutzgesetzes auf den Gebäudesektor entfallen, sinken im Referenzszenario bis 2030 auf 91,2 Mio. t CO₂e. Davon entfallen auf fossile Brennstoffe für die Raumwärme und Warmwasserbereitstellung in Wohn- und Nichtwohngebäuden 87,7 Mio. t CO₂e im Jahr 2030. Die übrigen Emissionen sind Prozessen im GHD-Sektor zuzuweisen. Insgesamt wird das Sektorziel von 70 Mio. t CO₂e im Jahr 2030 um voraussichtlich mehr als 20 Mio. t CO₂e verfehlt.

Tabelle 82: Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Sonstige	77,9	41,9	41,5	38,5	38,4	32,9	27,3	21,9
Haushalte	131,9	112,0	107,0	91,5	86,7	73,8	63,8	55,6
Gesamt	209,7	153,9	148,5	130,0	125,1	106,8	91,2	77,5
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz					118,0	94,0	70,0	
Abweichung vom Sektorziel*					7,1	12,8	21,2	

Quelle: Berechnungen IREES und Öko-Institut

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

6.5.2 Szenario Klimaschutzprogramm 2030

Tabelle 83 zeigt die Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030. Die Gesamtemissionen, die dem Gebäudesektor in der Bilanzierung des Klimaschutzplans 2050 zugewiesen werden, sinken auf 86,8 Mio. t CO₂e im Jahr 2030. Davon entfallen auf fossile Brennstoffe für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung in Wohn- und Nichtwohngebäuden 83,3 Mio. t CO₂e im Jahr 2030. Das Sektorziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes für das Jahr 2030 wird damit um knapp 17 Mio. t CO₂e verfehlt.

Tabelle 83: Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Sonstige	77,9	41,9	41,5	38,5	38,3	32,6	26,2	19,5
Haushalte	131,9	112,0	107,0	91,5	86,5	72,9	60,6	49,7
Gesamt	209,7	153,9	148,5	130,0	124,8	105,4	86,8	69,3
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz					118,0	94,0	70,0	
Abweichung vom Sektorziel*					6,8	11,4	16,8	

Quelle: Berechnungen IREES und Öko-Institut

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

Die Berechnungen zeigen, dass bereits ab 2020 die im Bundes-Klimaschutzgesetz vorgegebenen Emissionsziele im Sektor Gebäude nicht eingehalten werden (Tabelle 84).

Tabelle 84: Vergleich der Sektorziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes und der berechneten Emissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020) im Sektor Gebäude

Jahresemissionsmenge (Mio. t CO ₂ e)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Gebäude – Ziel	118	113	108	103	99	94	89	84	80	75	70
KSPr (Jan 2020)	124,8	121,0	117,1	113,2	109,3	105,4	101,7	98,0	94,3	90,5	86,8
Abweichung	6,8	8,0	9,1	10,2	10,3	11,4	12,7	14,0	14,3	15,5	16,8

Quelle: (Bundesregierung 2019b), Berechnungen Öko-Institut und IREES

Die Maßnahmen des Klimaprogramms 2030 im Gebäudesektor zielen vor allem auf die Reduktion der Treibhausgasemissionen aus der fossilen Wärmebereitstellung in Gebäuden durch eine Verbesserung der Förderung im Bereich Energieeffizienz und erneuerbare Wärme. Aus der Modellierung resultiert damit eine zusätzliche Reduktionswirkung gegenüber dem dargestellten Referenzszenario in Höhe von 4,4 Mio. t CO₂e im Jahr 2030. Darüber hinaus sind in der Modellierung der CO₂-Preis (Brennstoffemissionshandelsgesetz, siehe Abschnitt 3.3) und eine Senkung der EEG-Umlage (siehe Abschnitt 3.5) berücksichtigt worden, die zu höheren fossilen Brennstoffpreisen sowie zu geringeren Strompreisen und Wärmepumpentarifen im Szenario führen. Dies führt zu einem Rückgang des Wärmebedarfs und zu einem stärkeren Wechsel von fossilen Heizsystemen zu EE-Wärme-Systemen, insbesondere Wärmepumpen.

6.5.3 Vergleich der Szenarien

Tabelle 85 zeigt die Entwicklung der Treibhausgas im Sektor Gebäude für die Jahre 1990 bis 2035 im Vergleich der Szenarien

Tabelle 85: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Sektor Gebäude zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
CO₂-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	204,5	152,7	146,8	128,7				
REF					123,9	105,6	90,0	76,3
KSPr (Jan 2020)					123,6	104,2	85,7	68,1
CH₄-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	4,2	0,7	1,1	0,9				
REF					0,9	0,9	0,8	0,9
KSPr (Jan 2020)					0,9	0,9	0,9	0,9
N₂O-Emissionen								

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
Entwicklung 1990 – 2016	1,0	0,5	0,5	0,4				
REF					0,4	0,3	0,3	0,3
KSPr (Jan 2020)					0,4	0,3	0,3	0,3
Summe CO₂+CH₄+N₂O								
Entwicklung 1990 – 2016	209,7	153,9	148,5	130,0				
REF					125,1	106,8	91,2	77,5
KSPr (Jan 2020)					124,8	105,4	86,8	69,3
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 1990 in %							
Entwicklung 1990 – 2016		-26,6	-29,2	-38,0				
REF					-40,3	-19,1	-56,5	-63,1
KSPr (Jan 2020)					-40,5	-49,7	-58,6	-67,0
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 2005 in %							
Entwicklung 2005 – 2016			-3,5	-15,6				
REF					-18,7	-30,6	-40,8	-49,7
KSPr (Jan 2020)					-18,9	-31,5	-43,6	-55,0

Quelle: (UBA 2018b, 2018c), Modellrechnungen Öko-Institut

7 Projektionen Sektor Verkehr

7.1 Methodik

7.1.1 Zielstellung und Vorgehen

Der Sektor Verkehr umfasst die Emissionen aus der Verbrennung von Treib- und Kraftstoffen des inländischen Luftverkehrs, des Straßenverkehrs, Schienenverkehrs und des inländischen Schiffsverkehrs. Nachrichtlich werden die Emissionen des internationalen Luft- und Schiffsverkehrs ausgewiesen.

Modelliert wird die Wirkung der Instrumente des Klimaschutzprogramms 2030 in der beschlossenen (bzw. teilweise: in einer möglichen / wahrscheinlichen) Ausprägung. Zu beachten ist dabei, dass bei einigen Instrumenten die konkrete Ausgestaltung noch unklar ist und entsprechend Annahmen für die Parametrisierung im Modell getroffen werden mussten.

Die Bottom-up-Modellierung erfolgt mit dem Modell TEMPS des Öko-Instituts (siehe 7.1.3). Der resultierende Strombedarf für Schienenverkehr und Elektromobilität wird – mit differenzierten Fahrprofilen – an das Strommarktmodell PowerFlex übergeben, so dass die Sektorkopplung berücksichtigt ist.

7.1.2 Anpassung des Referenzszenarios

Der THG-Minderungsbeitrag des Klimaschutzprogramms 2030 ergibt sich als Differenz zu einem Referenzszenario. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde für den Verkehrssektor dabei im Wesentlichen das Referenzszenario der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) übernommen. Die THG-Emissionen liegen in diesem Szenario im Jahr 2030 bei 150 Mio. t CO₂e und damit niedriger als im Mit-Maßnahmen-Szenario des Projektionsberichts 2019 (159,3 Mio. t CO₂e). Dies ist auf eine Annahme zum stärkeren Anstieg der Fahrleistungen im Straßenverkehr im Projektionsbericht 2019 sowie geringere Effizienzentwicklungen zurückzuführen.

Im Referenzszenario der NPM sind Maßnahmen berücksichtigt, die bis zum Stichtag 30. Juni 2017 beschlossen wurden. Die Fortschreibung der EU-CO₂-Standards für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Lkw bis 2030 wurde nach diesem Stichtag, aber vor Verabschiedung des Klimaschutzprogramms auf EU-Ebene beschlossen. Sie ist daher nicht im Referenzszenario, aber im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 enthalten.

Zusätzlich zum Referenzszenario wurde daher ein weiteres Szenario berechnet, welches die Wirkung der Fortschreibung der Pkw- und Lkw-Standards enthält (Szenario „Referenzentwicklung plus Standards“). Die Minderungsbeiträge der Instrumente des Klimaschutzprogramms 2030 werden gegenüber diesem Szenario ermittelt.

7.1.3 Modell TEMPS

Die Modellierung erfolgt mit dem Modell TEMPS des Öko-Instituts. Das Modell wurde bereits in den bisherigen Projektionsberichten der Bundesregierung (BReg 2017; Zimmer et al. 2016) eingesetzt und ermöglicht eine Berechnung der zukünftigen THG-Emissionen des Verkehrssektors in Abhängigkeit von politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen.

Kernbestandteil der Modellierungen mit TEMPS ist das Neuzulassungsmodell, welches unter gegebenen Rahmenbedingungen - wie CO₂-Zielwerten für Neufahrzeuge, Anschaffungspreisen von Fahrzeugen, Energiepreisen, CO₂-Preis usw. - die Zusammensetzung und Effizienzentwicklung

der zukünftigen Neuzulassungen modelliert. Die Berechnung erfolgt basierend auf einem Antriebswahlmodell, welches u.a. wesentlich auf den Nutzerkosten (TCO-Kosten⁹¹)-basiert. Die verwendeten Nutzerdaten stützen sich unter anderem auf die Erhebungen „Mobilität in Deutschland“ (MiD) für den privaten Kraftfahrzeugverkehr und „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ (KiD) für den gewerblichen Verkehr.

Die Zusammensetzung des Fahrzeug-Bestands (nach Antrieben und CO₂-Emissionen) wird aus den Neuzulassungen mittels Überlebenskurven der Fahrzeuge abgeleitet. Die gesamten THG-Emissionen des Bestands ergeben sich infolgedessen aus der zu Grunde gelegten Fahrleistung, dem Fahrzeugbestand, der Energieeffizienz je Antrieb und dem Anteil erneuerbarer Kraftstoffe.

Zur Bewertung der Wirkung von Maßnahmen auf die Verkehrsnachfrage werden Preiselastizitäten genutzt. Für den Personenverkehr wird auf empirisch abgeleitete Werte von Hautzinger et al. (2004) zurückgegriffen. Für den motorisierten Individualverkehr ist darin eine Preiselastizität von -0,3 auf Kraftstoffpreisänderungen sowie eine Kreuzpreiselastizität⁹² für den öffentlichen Verkehr von 0,13 angegeben. Im Güterverkehr sind Elastizitäten aus de Jong et al. (2010) entnommen. Für Änderungen der Transportkosten im Straßengüterverkehr wird dort anhand einer Literaturrecherche ein konsistentes Set an Elastizitäten angegeben und mit -0,6 in Bezug die Fahrleistung im Straßengüterverkehrs bestimmt. Die Kreuzelastizität für andere Verkehrsträgeroptionen wird dabei auf 0,3 abgeschätzt.

Der Endenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen beziehen sich in diesem Papier auf die Berichterstattung gemäß des Zentralen Systems Emissionen (ZSE). Da die Modellierung des Verkehrssektors in dieser Studie auf das Inlandsprinzip zurückgreift, wird eine Kalibrierung auf die Energiebilanz für das Jahr 2015 (Basisjahr der NPM) vorgenommen. Die somit ermittelten Kalibrierungsfaktoren für 2015 werden in der Bestimmung des Endenergieverbrauchs bis 2035 als konstant angesetzt.

7.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario

Für die Referenzentwicklung im Verkehr werden – aus Gründen der Vergleichbarkeit – weitestgehend die Annahmen aus der Referenzentwicklung der Nationalen Plattform Mobilität (NPM) verwendet. Im hier vorliegenden Referenzszenario wurden insbesondere folgende wesentliche Annahmen bzw. Entwicklungen aus dieser Referenzentwicklung übernommen:

- ▶ Die Pkw-Fahrleistung steigt um durchschnittlich 0,5 % p.a. im Zeitraum 2015-2030.
- ▶ Die Lkw-Fahrleistung steigt um durchschnittlich 1,3 % p.a. im Zeitraum 2015-2030.
- ▶ Die Fahrleistung von leichten Nutzfahrzeugen steigt um durchschnittlich 1,6 % p.a. im Zeitraum 2015-2030.
- ▶ Lkw werden (in der Referenzentwicklung, d.h. ohne die europäischen CO₂-Grenzwerte) um 0,5 % p.a. effizienter.

⁹¹ Total Cost of Ownership.

⁹² Die Kreuzpreiselastizität gibt an, um wie viel Prozent sich die Nachfrage nach einem Gut (hier: ÖV) erhöht, wenn der Preis für ein anderes Gut (hier: MIV) ansteigt. Eine Kreuzpreiselastizität von 0,13 bedeutet beispielsweise, dass bei einem Anstieg der Pkw-Nutzerkosten um 10% der öffentliche Verkehr um 1,3% zunimmt.

- ▶ Die Realabweichung (d.h. der reale Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Normverbrauch) bei Pkw-Neuzulassungen bleibt nahezu auf dem Niveau von 2017 (39 %) und steigt um nur noch 3 %-Punkte an.
- ▶ Der Biokraftstoffeinsatz im Jahr 2030 liegt bei 110 PJ (d.h. etwa auf heutigem Niveau).

Im Referenzszenario ist ab 2020 bei Pkw der gültige CO₂-Zielwert von 95 g CO₂/km hinterlegt und bei leichten Nutzfahrzeugen der Zielwert von 147 g CO₂/km. Nach 2021 bleiben die Zielwerte unverändert. Die Fortschreibung der europäischen CO₂-Grenzwerte für Pkw und Lkw bis 2030 (siehe Instrumentenbeschreibung in Kapitel 7.4) ist im Referenzszenario also nicht enthalten. Im Folgenden sind die wesentlichen Annahmen, die der Modellierung zu Grunde liegen, je Verkehrsträger dargestellt.

7.2.1 Verkehrsnachfrage Referenzszenario

Die Projektion bis 2030 basiert auf der Verkehrsnachfrageentwicklung der NPM, wobei bis 2017/2018 soweit verfügbar aktuelle Daten verwendet wurden. Im Ergebnis liegt die Verkehrsnachfrage etwas niedriger als im MMS des Projektionsberichts 2019.

7.2.1.1 Pkw

Die Pkw-Fahrleistung in Deutschland wird nicht umfassend statistisch erfasst und ist daher mit Unsicherheit behaftet. Es gibt allerdings Hochrechnungen auf Basis verschiedener (Teil-) Erhebungen. Das Kraftfahrtbundesamt ermittelt für die Jahre 2014-2017 einen jährlichen Anstieg der Fahrleistungen deutscher Pkw von rd. 1 %. In 2018 blieb die Fahrleistung auf ähnlichem Niveau wie 2017 (KBA 2018).

Für die Projektion bis 2030 wird die Referenzentwicklung der NPM übernommen. Diese geht von einer jährlichen Zunahme von durchschnittlich 0,5 % p.a. im Zeitraum 2015-2030 aus, mit einer zunächst höheren Zunahme von 0,7 % p.a. bis 2025 und einer anschließend geringeren Zunahme (0,2 % zwischen 2025 und 2030). Nach 2030 wird ein leichter Rückgang von 0,35 % p.a. angenommen.

7.2.1.2 Öffentlicher Personenverkehr

Die Verkehrsnachfrage im öffentlichen Personenverkehr ist zwischen 2010 und 2018 nach Daten des statistischen Bundesamts um durchschnittlich rund 1,2 % p.a. gestiegen. Für 2030 wird die Verkehrsnachfrage der NPM übernommen, was im Zeitraum 2018-2030 zu einer sinkenden Nachfrage im ÖV führt.

7.2.1.3 Lkw und leichte Nutzfahrzeuge

Nach Daten des KBA ist die Inlandsfahrleistung europäischer Lkw in Deutschland zwischen 2010 und 2018 um durchschnittlich rund 1,6 % p.a. angestiegen. Dabei war im Jahr 2018 erstmals ein leichter Rückgang zu verzeichnen. Die Referenzentwicklung der NPM ermittelt einen Anstieg von durchschnittlich rund 1,3 % p.a. im Zeitraum 2015-2030.

Nach Daten des KBA ist die Fahrleistung in Deutschland zugelassener leichter Nutzfahrzeuge im Zeitraum 2014-2018 um fast 5 % p.a. angestiegen. Die Referenzentwicklung der NPM nimmt hier deutlich niedrigere Wachstumsraten von durchschnittlich 1,6 % zwischen 2015 und 2030 an.

7.2.1.4 Schienengüterverkehr und Binnenschifffahrt

Der Schienengüterverkehr hat zwischen 2010 und 2018 ein deutliches Wachstum von durchschnittlich 2,2 % p.a. verzeichnet, mit besonders hohen Wachstumsraten in den letzten Jahren. Dagegen ist die Verkehrsnachfrage in der Binnenschifffahrt zurückgegangen.

Die NPM ermittelt für den Schienengüterverkehr einen Anstieg von 1,7 % p.a. (2015-2030) und für die Binnenschifffahrt von 1,2 % p.a.

7.2.1.5 Luft- und Seeverkehr

Beim Luftverkehr ist einerseits der nationale, d.h. innerdeutsche, Luftverkehr dargestellt. Zusätzlich sind die aus Deutschland abgehenden internationalen Flüge ausgewiesen. Die Emissionen des internationalen Luftverkehrs sowie des internationalen Seeverkehrs werden in den Treibhausgasinventaren nur nachrichtlich ausgewiesen. Für den Seeverkehr wurde die Entwicklung aus Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht (Öko-Institut et al. 2015) hinterlegt. Der Seeverkehr nimmt demnach im Zeitraum 2012-2035 um 65 % zu.

7.2.1.6 Verkehrsnachfrage im Überblick

Tabelle 86: Verkehrsnachfrage Personenverkehr im Referenzszenario (REF) in Mrd. pkm

	2010	2016	2017	2020	2025	2030	2035
Pkw	882	936	943	954	988	999	982
Kraftrad	20	22	22	22	23	23	24
ÖPV - Bahn (PV)	84	94	96	98	97	95	96
ÖPV - SSU ⁹³	16	17	17	18	17	17	16
ÖPV - Bus	62	64	62	62	61	59	57
Flugzeug (national)	11	10	10	11	12	12	13
Rad/Fuß	68	73	75	75	75	75	74
Gesamt national	1.143	1.216	1.225	1.239	1.272	1.280	1.262
Flugzeug (international)	182	215	229	253	293	332	366
Gesamt	1.325	1.431	1.454	1.493	1.565	1.613	1.628

Quelle: Eigene Berechnungen

⁹³ Straßen-, Stadt-, und U-Bahnen.

Tabelle 87: Verkehrsnachfrage Güterverkehr im Referenzszenario (REF) in Mrd. tkm

	2010	2016	2017	2020	2025	2030	2035
Straße	445	480	496	545	555	565	587
Schiene	107	128	130	133	142	152	150
Binnenschiff	62	54	56	51	57	66	66
Flugzeug (national)	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06
Gesamt national	615	662	681	728	755	783	803
Flugzeug (international)	11	12	12	13	15	16	18
Gesamt	626	674	693	741	769	799	821

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 88: Verkehrsnachfrage Seeverkehr im Referenzszenario (REF) in Mrd. tkm

	2010	2016	2017	2020	2025	2030	2035
Hochseeschifffahrt	1.742	2.044	2.097	2.263	2.580	2.930	3.152

Quelle: Eigene Berechnungen

7.2.2 Batteriepreisentwicklung

Es wird angenommen, dass die Batteriesystemkosten bis 2030 auf 63 €/kWh sinken. Auch in den NPM-Berechnungen wurden die Kosten für E-Pkw gegenüber den ursprünglich in der Referenzentwicklung verwendeten Annahmen nach unten korrigiert.

Tabelle 89: Annahmen für die Entwicklung der Batteriesystemkosten

Jahr	Kosten in € ₂₀₁₀ /kWh
2015	241
2020	159
2025	95
2030	63
2035	60

Quelle: Annahme basierend auf Goldie-Scot (2019) und Lutsey und Nicholas (2019)

7.2.3 Effizienzentwicklung neu zugelassener Pkw

Für die CO₂-Emissionen neu zugelassener Pkw nach NEFZ-Testzyklus werden aktuelle Daten bis einschließlich 2018/2019 verwendet; dies hat entsprechend auch Auswirkungen auf 2030. Für

2018 ergeben sich aus der EU-Monitoring-Datenbank⁹⁴ für 2018 durchschnittliche CO₂-Emissionen von Pkw-Neuzulassungen in Deutschland in Höhe von 130 g CO₂/km (NEFZ) und 156 g CO₂/km (WLTP).

In 2019 sind die CO₂-Emissionen der Pkw-Neuzulassungen weiter auf hohem Niveau: Die mittleren CO₂-Emissionen in 2019 betragen nach (KBA 2020). 157 g CO₂/km (WLTP) Wenn man einen Umrechnungsfaktor von 1,2 zwischen NEFZ und WLTP zu Grunde legt, entspricht dies 131 g CO₂/km (NEFZ), d.h. die CO₂-Emissionen im Jahr 2019 liegen etwas höher als 2018.

Im Jahr 2021 greift der EU-weite CO₂-Standard in Höhe von 95 g CO₂/km (NEFZ). Für 95 % der Flotte muss der Zielwert bereits im Jahr 2020 erreicht werden. Dies führt zu einem deutlichen Sinken der realen CO₂-Emissionen im Jahr 2020 und dann nochmals im Jahr 2021.

Im Referenzszenario für dieses Gutachten sind ebenso wie im Referenzszenario der NPM die Pkw-Standards für 2021 enthalten, jedoch nicht die Fortschreibung nach 2021 (auch wenn die EU-Richtlinie bereits vor dem Klimaschutzprogramm 2030 verabschiedet wurde).

Energieverbrauch und Emissionen von Pkw liegen im realen Betrieb höher als die im Testzyklus (früher: NEFZ, seit September 2018: WLTP) gemessenen Werte. Umfangreiche Auswertungen des ICCT (Tietge et al. 2019) zeigen, dass bis zum Jahr 2017 die Abweichung zwischen NEFZ und Realverbrauch bei Diesel- und Benzinmotoren auf 39 % angestiegen ist. Für die Modellierung wird hinterlegt, dass die Realabweichung (d.h. der reale Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Normverbrauch nach NEFZ) bei Pkw-Neuzulassungen in etwa auf diesem Niveau bleibt bzw. nur noch minimal auf 42 % ansteigt. Unter dieser Annahme entspricht die Entwicklung der CO₂-Emissionen der Pkw der Referenzentwicklung der NPM.

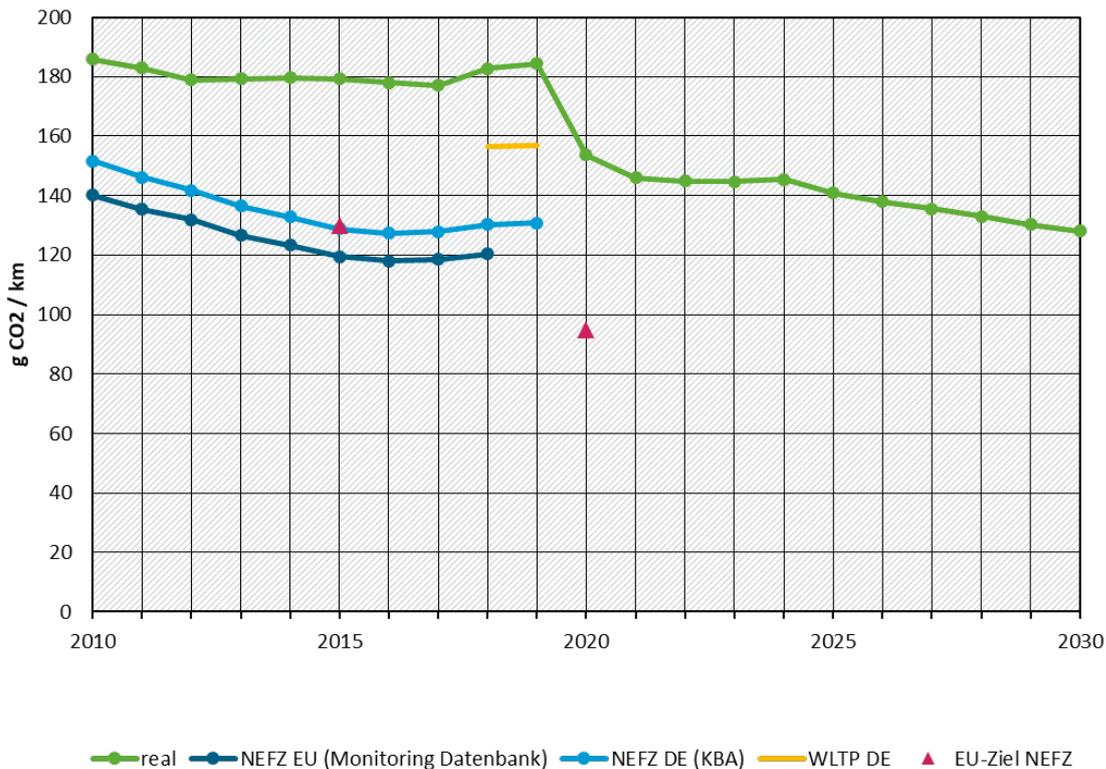
Abbildung 35 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen von Pkw-Neuzulassungen in Deutschland im Zeitraum 2010-2030 unter den obigen Annahmen.

Die CO₂-Emissionen der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland liegen derzeit ca. 7 % über dem EU-Mittelwert. Dies wird für die Zukunft fortgeschrieben. Der reale Verbrauch (hellgrüne Linie) ergibt sich durch den Aufschlag der Realabweichung. Demnach wird deutlich, dass die realen CO₂-Emissionen neu zugelassener Pkw in den letzten Jahren nicht gesunken sind.

Die Effizienzentwicklung nach 2021 ergibt sich aus der Modellierung. Die realen CO₂-Emissionen bleiben zunächst auf ähnlichem Niveau. Ab 2025 kommt es durch einen steigenden Anteil an Elektrofahrzeugen zu einem leichten Rückgang der CO₂-Emissionen.

⁹⁴ https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/DAT-116-en

Abbildung 35: Entwicklung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen von Pkw-Neuzulassungen im Zeitraum 2010-2030 im Referenzszenario (REF) (NEFZ, WLTP, real)



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Daten des ICCT und eigenen Berechnungen.

7.2.4 Effizienzentwicklung Lkw und leichte Nutzfahrzeuge

Im Referenzszenario wird eine autonome Effizienzsteigerung der Lkw von 0,5 % pro Jahr angenommen. Diese Annahme entstammt dem Referenzszenario der NPM. Damit sinken die spezifischen Emissionen neu zugelassener Lkw insgesamt um rund 5 % zwischen 2020 und 2030. Im MMS des Projektionsberichts 2019 war von einer geringeren autonomen Effizienzsteigerung in Höhe von 0,2 % p.a. ausgegangen worden.

Bei den leichten Nutzfahrzeugen wird von der Einhaltung des EU-CO₂-Standards im Jahr 2021 ausgegangen. Für die Zeit ab 2021 wird eine Effizienzsteigerung von knapp 1 % p.a. hinterlegt, sodass sich eine Minderung der Emissionen von rund 9 % zwischen 2020 und 2030 ergibt.

7.2.5 Biokraftstoffanteil

Die derzeit gültige Treibhausgasminderungsquote gemäß Biokraftstoffquotengesetz, welche die durch CO₂-arme Kraftstoffe zu erreichende THG-Minderung vorgibt, liegt bei 3,5 % im Jahr 2015, 4 % ab 2017 und 6 % im Jahr 2020. Im Gegensatz zu anderen EU-Ländern wird also nicht die beigemischte Menge reguliert, sondern die dadurch zu erreichende THG-Minderung. Wie hoch die Biokraftstoffmenge ist, welche zur Erfüllung der Treibhausgasminderungsquote notwendig ist, hängt von der Höhe der Minderung von Biokraftstoffen im Vergleich zum fossilen Basiswert ab. Seit Umstellung der Biokraftstoffquote auf eine Treibhausgasminderungsquote hat sich die von den Vertreibern der Kraftstoffe berichtete Treibhausgasminderung gegenüber dem fossilen Basiswert deutlich erhöht. Grund dafür kann sein, dass es durch die Ausgestaltung der Regulierung einen Anreiz gibt, die THG-Bilanz der Kraftstoffe zu verbessern bzw. sich am Markt insbesondere Kraftstoffe mit guter THG-Bilanz durchsetzen. Lag sie im Jahr 2013 und 2014 noch bei

rund 50 %, so ist sie im Jahr 2016 auf rund 77 % angestiegen und lag in 2018 bei 83,7 % (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) 2019).

Für 2020 sieht die THG-Minderungsquote ein Ziel von 6 % THG-Minderung bei den in Verkehr gebrachten Otto- und Dieselkraftstoffen vor. Reduktionen von Upstream-Emissionen (also die Reduktion von CO₂-Emissionen bei der Erdölgewinnung durch Abfackeln (Flaring) und Ablassen (Venting) sowie unkontrolliertes Entweichen von Begleitgasen der Erdölförderung) sind bis zu 1,2 % anrechenbar, ebenso wie der Einsatz von Strom in Elektrofahrzeugen. Es ist jedoch bis 2020 nicht von einem relevanten Anteil von Strom in Elektrofahrzeugen auszugehen. Angenommen wird, dass zusammen aus der Anrechnung von Upstream-Emissionsreduktionen und Elektromobilität 1,2 % des Ziels erfüllt werden, d.h. noch 4,8 % durch Biokraftstoffe zu erfüllen sind. Wenn Biokraftstoffe (nominell) eine Minderung von 83,7 % gegenüber der fossilen Referenz erfüllen, ist also ein (energetischer) Anteil von 5,7 % Biokraftstoffen an den Otto- und Dieselkraftstoffen zur Quotenerfüllung im Jahr 2020 notwendig.

An der Fortführung der Treibhausgasminderungsquote nach 2020 – in Übereinstimmung mit den Vorgaben der EU nach RED II im Rahmen der nationalen Umsetzung – wurde zum Zeitpunkt der Berechnungen im Januar 2020 noch gearbeitet. Für den Biokraftstoffeinsatz im Jahr 2030 wurde ebenso wie in der Referenzentwicklung der NPM davon ausgegangen, dass die absolut eingesetzte Menge an Biokraftstoffen auf heutigem Niveau liegt (rd. 110 PJ). Das entspricht einem energetischen Anteil von rund 5,3 % im Jahr 2030.

7.3 Ergebnisse Referenzszenario

Bis zum Jahr 2030 sinken die Treibhausgasemissionen im Verkehr im Referenzszenario gegenüber 2016 von 166 Mio. t CO₂e auf 150 Mio. t CO₂e. Im Verkehrssektor stellt der Straßenverkehr die bei weitem bedeutendste Quelle der Treibhausgasemissionen dar (Tabelle 90). Die Treibhausgasemissionen aus dem Straßenverkehr im Referenzszenario gehen ab 2020 zunächst langsam und ab 2025 etwas schneller zurück. Während die Emissionen des Straßengüterverkehrs sowie der Busse aufgrund der Zunahme der Fahrleistung zwischen 2016 und 2030 um ca. 4 Mio. t CO₂e auf 57 Mio. t CO₂e ansteigen, verzeichnet der Pkw-Verkehr bis 2030 einen Rückgang um 18 Mio. t auf 88 Mio. t CO₂e. Grund dafür ist Effizienzsteigerung (inkl. Elektromobilität) bei neuen Pkw, welche die Zunahme der Pkw-Fahrleistung überkompensiert. Der bereits im Jahr 2009 beschlossene CO₂-Standard für neu zugelassene Pkw in Höhe von 95 g CO₂/km ab den Jahren 2020/2021 ist (im Gegensatz zur Fortschreibung der Standards nach 2021) in der Referenzentwicklung enthalten und schlägt sich bis 2030 spürbar in der Effizienz des Pkw-Bestandes nieder.

Das Sektorziel nach Klimaschutzgesetz wird in der Referenzentwicklung im Jahr 2030 um 55 Mio.t CO₂e verfehlt.

Tabelle 90: Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Inländischer ziviler Luftverkehr	2,4	2,5	2,6	2,4	2,3	2,3	2,3	2,2
Straßenverkehr	154,3	154,0	147,6	160,3	161,7	154,7	145,4	134,0
Schienerverkehr	2,9	1,4	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8
Schiffsverkehr	3,7	2,0	1,7	2,0	1,5	1,6	1,8	1,7
Gesamt	163,3	159,9	153,0	165,6	166,4	159,5	150,3⁹⁵	138,6
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz					150,0	123,0	95,0	
Abweichung vom Sektorziel					16,4	36,5	55,3	
Nachrichtlich:								
Internationaler ziviler Luftverkehr ⁹⁶	12,1	22,9	24,2	26,4	27,0	28,6	29,9	30,6
Internationaler Schiffsverkehr	6,5	7,2	8,3	8,3	7,6	7,8	7,9	7,7
Gesamt inkl. nachrichtlich	181,9	190,0	185,5	200,3	201,0	195,9	188,1	176,9

Quelle: Berechnungen Öko-Institut auf Basis der Referenzentwicklung der Nationalen Plattform Mobilität (NPM)

7.4 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Zum Zeitpunkt der Bewertung war im Verkehrssektor der größere Teil der Instrumente bereits beschlossen; bei einigen Instrumenten war die konkrete Ausgestaltung jedoch noch unklar. Es wurde die aktuelle Beschlusslage für die Parametrisierung mit Stand Januar 2020 zu Grunde gelegt. In den unklaren Fällen wurde eine mögliche bzw. wahrscheinliche Ausgestaltungsvariante für die Quantifizierung gewählt.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Instrumente des Klimaschutzprogramms 2030 im Sektor Verkehr, den Umsetzungsstand zum Zeitpunkt der Modellierung, sowie die Berücksichtigung der Instrumente im Szenario Klimaschutzprogramm 2030. Einige Kapitel des Klimaschutzprogramms 2030 enthalten mehrere relevante Instrumente, die entsprechend separat aufgeführt sind (in der Tabelle kursiv dargestellt).

⁹⁵ Durch den gegenüber dem MMS des Projektionsberichts geringeren Anstieg der Fahrleistungen im Straßenverkehr sowie optimistischere Annahmen zur Effizienzentwicklung von Pkw und Lkw sinken die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor im Referenzszenario stärker als im MMS des Projektionsberichts 2019. Im MMS lagen die THG-Emissionen in 2030 bei 159 Mio. t CO₂e (Bundesregierung 2019d).

⁹⁶ Alle abgehenden grenzüberschreitenden Flüge, sowohl in EU- als auch in Nicht-EU-Länder.

Tabelle 91: Instrumente des Klimaschutzprogramms 2030 im Sektor Verkehr

Kapitel Klimaschutzprogramm 2030	Instrument	Ausgestaltung bereits beschlossen (Stand 31.1.2020)	Bewertung im Szenario KSP (Jan 2020)
3.4.3.1	Stärkung des Schienenpersonenverkehrs		
	<i>Luftverkehrsabgabe + MWSt Bahn-Fernverkehr</i>	Ja	Ja
	<i>Elektrifizierung Schienenpersonenverkehr</i>	(Ja)	Ja
3.4.3.2	Attraktivität des ÖPNV erhöhen		
	<i>Mittelerhöhung GVFG + Regionalisierungsmittel</i>	Ja	Ja
	<i>Elektrische Busse im ÖPNV</i>	Ja, vor KSP (EU-Regulierung)	Ja
3.4.3.3	Ausbau von Radwegen und Fahrradparkmöglichkeiten sowie Verbesserung der Rahmenbedingungen	Ja	Ja
3.4.3.4	Entwicklung strombasierter Kraftstoffe	Nein	Ja
3.4.3.5	Unterstützung fortschrittlicher Biokraftstoffe	Nein	Ja
3.4.3.6	Stärkung des Schienengüterverkehrs		
	<i>Verlagerung auf den Schienengüterverkehr</i>	Ja, vor KSP	Ja
	<i>Elektrifizierung Schienengüterverkehr</i>	(Ja)	Ja
3.4.3.7	Modernisierung der Binnenschifffahrt und Nutzung von Landstrom in Häfen	Nein	Ja
3.4.3.8	CO ₂ -arme Pkw auf die Straße bringen		
	<i>Fortschreibung Pkw-Standards</i>	Ja, EU-Regulierung (Dez 2018)	Ja
	<i>Kaufprämie E-Pkw</i>	Ja	Ja
	<i>Kfz-Steuer</i>	Nein	Ja
	<i>Dienstwagenbesteuerung</i>	Ja (Dez 2019)	Flankierend
3.4.3.9	Pkw: Tank- und Ladeinfrastruktur ausbauen		Flankierend
3.4.3.10	CO ₂ -arme Lkw auf die Straße bringen		
	<i>Lkw-Standards</i>	Ja, EU-Regulierung (Mrz 2019)	Ja
	<i>LNF-Standards</i>	Ja, EU-Regulierung (Dez 2018)	Ja

Kapitel Klimaschutzprogramm 2030	Instrument	Ausgestaltung bereits beschlossen (Stand 31.1.2020)	Bewertung im Szenario KSPR (Jan 2020)
	<i>Kaufprämie Lkw</i>	Ja	Ja
	<i>Lkw-Maut</i>	Nein	Nein
3.4.3.11	Lkw: Tank-, Lade- u. Oberleitungsinfrastruktur ausbauen	Nein	Flankierend
3.4.3.12	Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen, innovative Mobilitätsformen ermöglichen	Nein	Keine Wirkung
3.4.3.13	Steuerliche Förderung der Elektromobilität (Jahressteuergesetz 2019)	Ja	In obigen Instrumenten enthalten / flankierend
3.2.1	CO ₂ -Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr	Ja	Ja
3.3.2	Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler	Ja	Ja

Quelle: Zusammenstellung Öko-Institut

7.4.1 Luftverkehrsabgabe (3.4.3.1)

Seit Januar 2011 wird gemäß Luftverkehrssteuergesetz (LuftVStG) in Deutschland eine Luftverkehrssteuer auf Flugbuchungen von einem inländischen Startort erhoben. Der Steuer unterliegt ausschließlich die gewerbliche Beförderung von Personen durch Luftverkehrsunternehmen. Post- und Frachtverkehre werden hingegen nicht besteuert. Die Steuersätze knüpfen an die pauschalierte Entfernung zum Zielort an und sind in drei Distanzklassen gegliedert („Kurzstrecke“ bis 2.500 km, „Mittelstrecke“ bis 6.000 km und darüber hinaus). Für die Einordnung eines Ziellandes in eine Distanzklasse ist die Entfernung zwischen Frankfurt am Main, als dem größten deutschen Verkehrsflughafen, zu dem jeweils größten Verkehrsflughafen des Ziellandes maßgeblich.

Hinterlegt wird folgende Erhöhung der Luftverkehrsabgabe ab dem 1. April 2020:

- ▶ Kurzstrecken: von 7,38 € (2019) auf 13,03 € (+75 %)
- ▶ Mittelstrecken: von 23,05 € (2019) auf 33,01 € (+42 %)
- ▶ Langstrecken: von 41,49 (2019) auf 59,43 € (+42 %)

Die Wirkung einer erhöhten Luftverkehrsabgabe auf die Verkehrsnachfrage wird über Preiselastizitäten abgebildet.

Es wird ein Kostensatz von durchschnittlich 8 ct/pkm (2017) im internationalen Luftverkehr hinterlegt. Für nationale Flüge wird die höhere Luftverkehrsabgabe und Mehrwertsteuer sowie der etwas höheren Energieverbrauch im nationalen Luftverkehr berücksichtigt, wodurch sich ein höherer Kostensatz von 13,2 ct/pkm (2017) für nationale Flüge ergibt.

Der Anteil nationaler bzw. internationaler Flüge sowie die Verteilung der Luftverkehrsteuer auf die drei Streckenkategorien wird aus Destatis-Veröffentlichungen abgeleitet. Im nationalen Luftverkehr erhöht sich die Luftverkehrsteuer um 75 % von umgerechnet 1,7 ct/pkm auf 3 ct/pkm.

Im internationalen Luftverkehr erhöht sich die Luftverkehrsabgabe um 55 % von 0,42 ct/pkm auf 0,56 ct/pkm. Der Kosteneffekt durch die Erhöhung der LuftVst ab 1. April 2020 beträgt demnach +10 % national und +2,5 % international.

Es werden auf Basis von (Peter et al. 2012) Preiselastizitäten von -0,9 (national) und -0,76 (international) angenommen, welche zu einer Nachfragereduktion führen.

7.4.2 Mehrwertsteuersenkung Bahn-Fernverkehr (3.4.3.1)

Seit dem 1. Januar 2020 beträgt die MWSt im Bahn-Fernverkehr 7 % statt bisher 19 %. Es wird angenommen, dass sich die Mehrwertsteuersenkung vollständig auf die Ticketpreise niederschlägt und das Bahnfahren somit um 10 % günstiger wird. Bewertet wird die Maßnahme anhand einer Preiselastizität von -0,5 (Nordenholz et al. 2016), d.h. es kommt gegenüber der Referenz um einen Anstieg von 5 % des Bahn-Fernverkehrs.

7.4.3 Elektrifizierung Schienenverkehr (3.4.3.2 und 3.4.3.6)

Derzeit sind etwa 60 % des Eisenbahnnetzes in Deutschland elektrifiziert. Die Bundesregierung hat sich im aktuellen Koalitionsvertrag vorgenommen, den Elektrifizierungsanteil der Streckenkilometer bis zum Jahr 2025 auf 70 % zu erhöhen. Da vor allem die stärker befahrenen Trassen elektrifiziert werden, liegt bezogen auf die Fahrleistungen der elektrische Anteil höher als in Bezug auf die Strecken. Im Personennahverkehr werden derzeit gut 80 % der Fahrleistung elektrisch erbracht und im Personenfernverkehr 98 %. Dies wird fortgeschrieben, so dass bis zum Jahr 2030 90 % der bisher nicht elektrifizierten Fahrleistung elektrisch wird. Das entspricht beim Personennahverkehr 98 % und beim Güterverkehr 99 %. Die Annahme ist optimistisch, da planungsrechtliche Hürden einen schnellen Ausbau behindern können. Zur Erreichung des Ziels in 2025 müssen pro Jahr rund 500 km elektrifiziert werden (Allianz pro Schiene 28.10.2019).

7.4.4 Mittelerhöhung GVFG und Regionalisierungsmittel (3.4.3.2)

Die Bundesmittel nach dem Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) für den Ausbau des ÖPNV liegen derzeit (2020) bei 333 Mio. € pro Jahr. Mit dem 3. Gesetz zur Änderung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes vom 6. März 2020 (Deutscher Bundestag 06.03.2020a) wurde beschlossen, die Mittel auf 1 Mrd. € jährlich ab 2021 und auf 2 Mrd. € ab 2025 zu erhöhen, mit einem weiteren Anstieg um 2,5 % p.a. ab 2026. Die Erhöhung auf 1 Mrd. € war dabei bereits im Koalitionsvertrag im Jahr 2018 beschlossen worden.

Weiterhin werden die Regionalisierungsmittel laut dem Fünften Gesetz zur Änderung des Regionalisierungsgesetzes in den Jahren 2020, 2021 und 2023 um zusätzlich 150 Millionen erhöht, dynamisiert um 1,8 % (Deutscher Bundestag 06.03.2020b). Die folgende Tabelle stellt die zusätzlich gegenüber der Referenzentwicklung verfügbaren Mittel für den öffentlichen Verkehr dar.

Tabelle 92: Zusätzliche Mittel für den öffentlichen Personennahverkehr

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030	2035
Regionalisierungsmittel	150	302	308	464	472	481	525	574
GVFG	333	667	667	667	667	1.667	1.930	2.228
Gesamt	483	970	976	1.131	1.139	2.148	2.456	2.802

Quelle: (Deutscher Bundestag 06.03.2020a), (Deutscher Bundestag 06.03.2020b), Berechnungen Öko-Institut

Durch den Mittelanstieg wird eine Ausweitung des ÖV-Angebots erreicht. Bisher finanziert die öffentliche Hand den ÖPNV mit rund 17 Mrd. €; der Anteil der Nutzerfinanzierung liegt bei gut 40 % (Deutscher Bundestag 2016).

Es wird unterstellt, dass es durch die zusätzlichen Mittel für den ÖV zu einer Angebotsausweitung kommt, wobei eine Angebotselastizität von 0,5 angenommen wird. Das bedeutet, dass es durch die zusätzlichen Mittel zu einer Verbesserung und Erweiterung des ÖV-Angebots kommt und eine Erhöhung der Mittel um 3,5 % im Jahr 2021 darin resultiert, dass sich die Personenkilometer im ÖV um $0,5 \cdot 3,5 \% = 1,75 \%$ erhöhen.

7.4.5 Elektrische Busse im ÖPNV (3.4.3.2)

Die Clean Vehicle Directive (EU-Richtlinie 2019/1161 zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge) schreibt für Deutschland bis 2025 45 % und ab 2026 65 % „saubere“ Busse (in der öffentlichen Beschaffung) vor. Davon muss die Hälfte „emissionsfrei“ sein.

Im Jahr 2025 wurden hälftig Gas- und Elektrobusse mit insgesamt 45 % der Neuzulassungen angenommen. Der Anteil steigt bis 2030 auf 66 %. Für Elektrobusse werden niedrigere Jahresfahrleistungen angenommen. Insgesamt ergibt sich im Bestand der Busse des öffentlichen Verkehrs im Jahr 2030 ein Fahranteil von 14,1 % elektrischer Busse und 19,6 % Gasfahrzeuge.

7.4.6 Ausbau von Radwegen und Fahrradparkmöglichkeiten sowie Verbesserung der Rahmenbedingungen (3.4.3.3)

Verwendet wird die Methodik aus dem Aktionsprogramm Klimaschutz (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2019). Es wird eine Verlagerung von Pkw-Verkehr auf Radverkehr in Höhe von 0,9 pkm je investiertem € in die Radverkehrsinfrastruktur angenommen.

Es werden insgesamt 900 Mio. € zusätzliche Haushaltsmittel für den Radverkehr für die Jahre 2020-2023 angenommen⁹⁷, die sich wie folgt zusammensetzen:

Tabelle 93: Zusätzliche Fördermittel für den Radverkehr (Mio. €)

Titel	Zweckbestimmung	2020	2021	2022	2023
882 92	Finanzhilfen an die Länder für Investitionen in den Radverkehr durch das Sonderprogramm "Stadt und Land"	20	185	225	226
891 91	Förderung von Modellvorhaben des Radverkehrs Zuschüsse an Länder und sonstige juristische Personen des öffentlichen Rechts	25	30	35	35
891 92	Zuschüsse für den Ausbau und die Erweiterung des "Radnetzes Deutschland"	5	10	15	15
882 91	Zuweisungen an Länder zum Bau von Radschnellwegen		25	24	23

⁹⁷ <https://fragdenstaat.de/anfrage/900-millionen-fur-den-radverkehr-quellen/429582/anhang/brief.pdf>

Titel	Zweckbestimmung	2020	2021	2022	2023
Gesamt		50	250	300	300

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Die weiteren Haushaltstitel mit Radverkehrsbezug (Nationaler Radverkehrsplan, Bau von Radwegen) werden in gleicher Höhe fortgeschrieben.

7.4.7 Entwicklung strombasierter Kraftstoffe (3.4.3.4)

Im Klimaschutzprogramm 2030 wird unter der Maßnahme „Entwicklung strombasierter Kraftstoffe“ die Förderung von Erzeugungsanlagen, die Erarbeitung einer Strategie zu Wasserstoff und erneuerbaren Kraftstoffen genannt, sowie die Prüfung einer Quote im Rahmen der nationalen Umsetzung der RED II. Zum Zeitpunkt der Modellierung war noch keine konkrete Ausgestaltung von Instrumenten absehbar.

Bei strombasierten Kraftstoffen handelt es sich um Technologien, die sich noch im Demonstrationsstadium befinden. Der Aufbau der Erzeugungskapazitäten beziehungsweise die Skalierung der zur Bereitstellung der Kraftstoffe benötigten Technologiekomponenten (z.B. Elektrolyseure, CO₂-Abscheideanlagen, zusätzliche erneuerbare Stromerzeugungskapazitäten, Reverse Wasser-gas-Shift-Reaktion) brauchen auch bei idealen Förder- und Rahmenbedingungen Zeit bis zur Umsetzung.

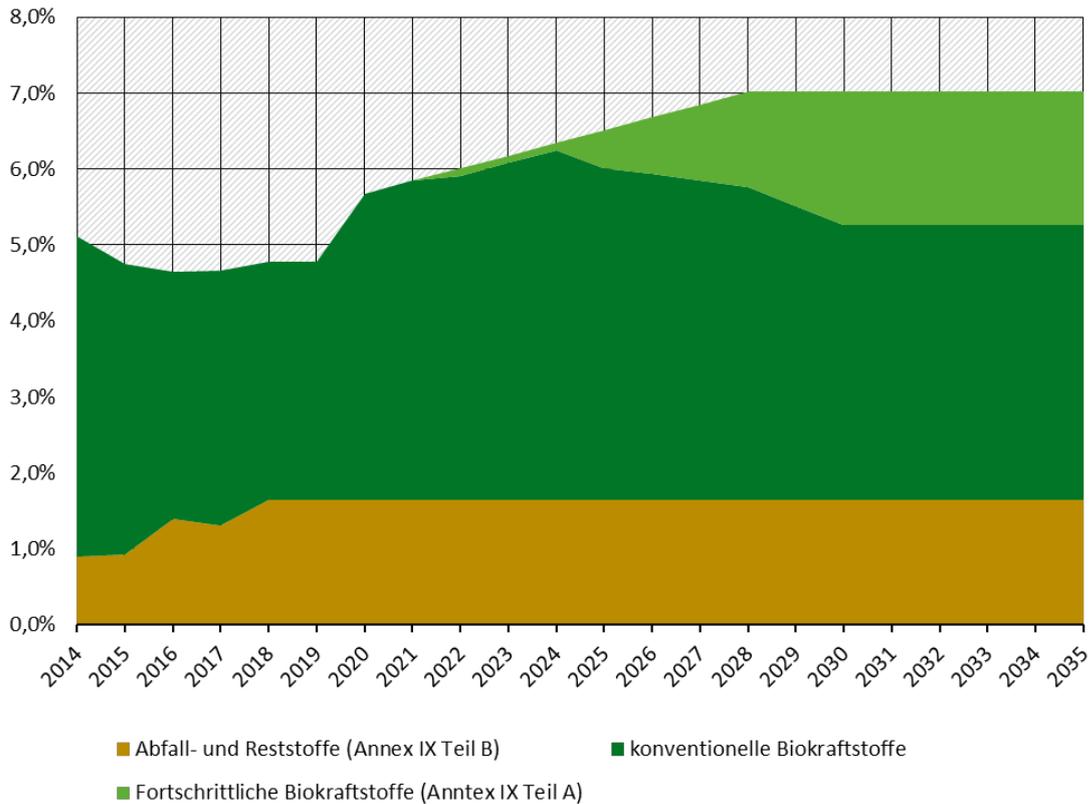
Es wird auf Basis von (Timmerberg und Kaltschmitt 2019) angenommen, dass bis 2030 zwei Großanlagen (je 150 MW_{th}) realisiert werden können, so dass bis zu 8 PJ strombasierte Kraftstoffe in 2030 für den Verkehrssektor zur Verfügung stehen.

7.4.8 Unterstützung fortschrittlicher Biokraftstoffe (3.4.3.5)

Der zukünftige Einsatz von Biokraftstoffen wird von der Ausgestaltung der THG-Minderungsquote abhängen. Hierzu lag im Frühjahr 2020 noch kein Entwurf vor, so dass für die Modellierung Annahmen getroffen werden mussten, welche sich u.a. an den Vorgaben der RED II (siehe Kasten unten) orientieren. Die Vorgaben der RED II werden über die Weiterentwicklung der bestehenden THG-Minderungsquote umgesetzt. Grundsätzliche Leitidee der RED II ist es, die bisher vorwiegend eingesetzten Biokraftstoffe auf Basis von Nahrungs- und Futtermitteln zunehmend durch sogenannte „fortschrittliche Biokraftstoffe“ zu ersetzen, die aus Ausgangsstoffen wie bspw. Stroh, Abfällen, Waldrestholz hergestellt werden.

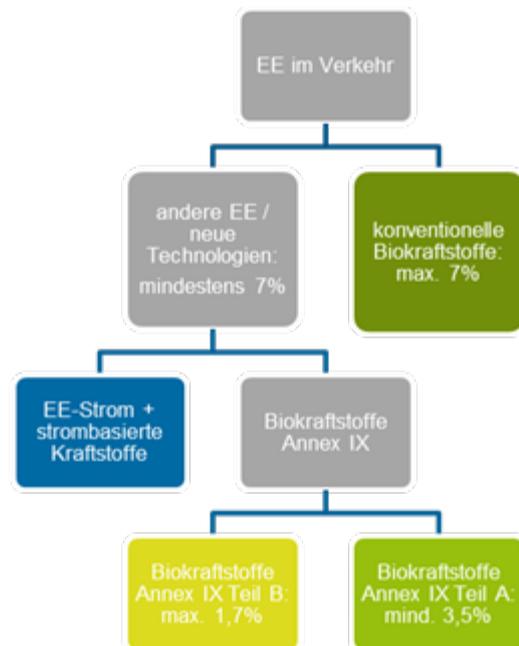
Angenommen wird, dass die THG-Minderungsquote weitergeführt wird und dabei so ausgestaltet wird, dass der Anteil von Biokraftstoffen auf Basis von Nahrungs- und Futtermitteln in etwa auf heutigem Niveau bleibt. Die energetische Unterquote für fortschrittliche Biokraftstoffe (RED II Annex IX Teil A) wird auf 1,75 % im Jahr 2030 entsprechend der Mindestvorgabe der RED II erhöht. Dadurch werden zusätzlich 30 PJ fortschrittliche Biokraftstoffe eingesetzt. Das entspricht im Szenario also einem Biokraftstoffeinsatz von insgesamt rund 140 PJ in 2030 (heutiges Niveau rund 110 PJ sowie rund 30 PJ Biokraftstoffe nach Annex IX Teil A).

Abbildung 36: Annahmen zum Biokraftstoffanteil im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))



Quelle: eigene Annahme

Abbildung 37: Differenzierung der EE im Verkehr nach RED II – Vorgaben für 2030



Quelle: eigene Darstellung Öko-Institut

Hintergrund: RED II im Verkehr

Die RED II gibt Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Biokraftstoffe (sowie generell des Einsatzes erneuerbarer Energien) im Verkehr nach 2020 vor. Abbildung 37 stellt die Klassifikation der Kraftstoffe nach RED II im Überblick dar. Grundsätzliche Leitidee der RED II ist es, die bisher vorwiegend eingesetzten Biokraftstoffe auf Basis von Nahrungs- und Futtermitteln zunehmend durch sogenannte „fortschrittliche Biokraftstoffe“ zu ersetzen, die aus Ausgangsstoffen wie bspw. Stroh, Abfällen, Waldrestholz hergestellt werden.

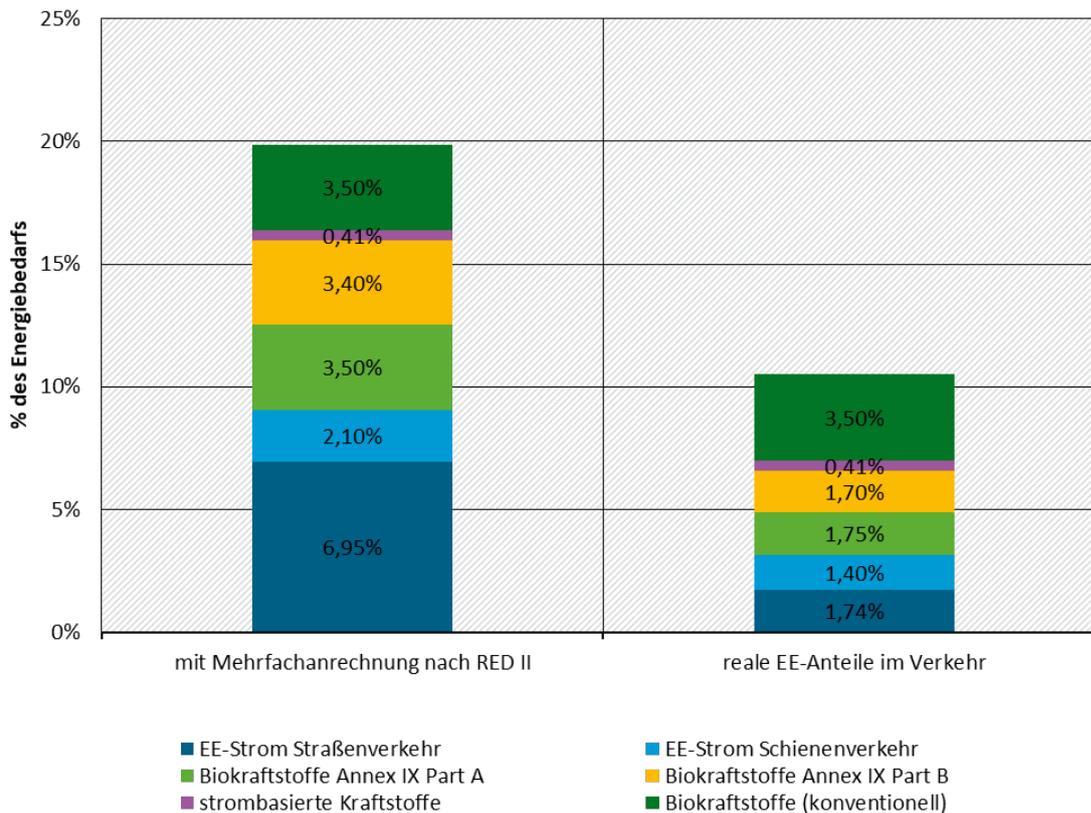
Das Gesamtziel für den Einsatz erneuerbarer Energien im Straßenverkehr liegt bei 14 %. Konventionelle Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln sind zur Erfüllung der Verpflichtungen der RED II nicht notwendig, da bei geringerem Einsatz von konventionellen Biokraftstoffen das Gesamtziel von 14 % entsprechend reduziert werden kann („opt out“).

Die RED II sieht für das Jahr 2030 den Einsatz von mindestens 1,75 % fortschrittlichen Biokraftstoffen aus Abfällen, Reststoffen und nicht für die Ernährung geeigneten Kulturpflanzen vor (hellgrüner Kasten, Annex IX Teil A der RED II)⁹⁸. Diese Kraftstoffe werden mit einem Multiplikator von 2 versehen, d.h. sie werden doppelt angerechnet und tragen somit 3,5 % zum EE-Ziel bei. Hinzu kommen Biokraftstoffe gemäß Anhang IX Teil B (gelber Kasten), wobei es sich vorwiegend um Alt-speiseöle und -fette handelt. Ihre Anrechnung auf das Ziel ist auf 1,7 % begrenzt⁹⁹. Weiterhin können der Einsatz von EE-Strom im Verkehr und strombasierte Kraftstoffe (blauer Kasten) zur Zielerreichung beitragen. Hier werden die realen Anteile ebenfalls mit Multiplikatoren von 1,5 für EE-Strom im Schienenverkehr und 4 für EE-Strom im Straßenverkehr auf das Ziel angerechnet.

⁹⁸ Innerhalb des Gesamtanteils von 7% beträgt der Beitrag von Biokraftstoffen (inkl. Biogas) aus den in Anhang IX Teil A aufgeführten Ausgangsstoffen im Jahr 2022 mindestens 0,2%, im Jahr 2025 1% und bis 2030 mindestens 3,5%.

⁹⁹ Eine Erhöhung dieser Grenze kann durch den Mitgliedsstaat beantragt werden.

Abbildung 38: EE-Anteile im Verkehr 2030 im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP (Jan 2020)) (real und mit Multiplikatoren nach RED II)



Quelle: eigene Darstellung Öko-Institut

Abbildung 38 stellt die EE-Anteile im Verkehr im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 im Jahr 2030 nach realen Anteilen (rechter Balken) sowie mit den Multiplikatoren nach RED II (linker Balken) dar. Der EE-Anteil im Jahr 2030 liegt nach der Berechnungslogik der RED II (mit Mehrfachanrechnung und EE-Strom) bei etwa 20 %. Der reale Anteil von Biokraftstoffen liegt bei 7 % und von strombasierten Kraftstoffen bei 0,4 %.

7.4.9 Stärkung des Schienengüterverkehrs: Netzausbau + Kapazitätserhöhung (3.4.3.6)

Für die Abbildung der Maßnahmenwirkung wird auf die Ergebnisse des Förderbündels (IID) aus dem Zwischenbericht der AG 1 der NPM zurückgegriffen (Elektrifizierung des Schienenverkehrs, Halbierung der Trassenpreise, Förderung des Kombinierten Verkehrs, Umsetzung des 740-m-Netzes flächendeckend sowie 1.500 m auf den Hauptkorridoren, ETCS auf Nicht-Kernnetz und digitale Stellwerke auf dem gesamten Schienennetz), bei dem sich ein Modal Split des Schienenverkehrs von 22,7 % ergibt (8. Sitzung AG 1). Die Mehrheit dieser Maßnahmen (Halbierung der Trassenpreise, die Förderung des kombinierten Verkehrs, 740m Netz und Elektrifizierung) waren dabei bereits vor dem Klimaschutzprogramm 2030 vereinbart worden (siehe Koalitionsvertrag bzw. Masterplan Schienengüterverkehr). Eine über die reinen Fördermaßnahmen hinausgehende zusätzliche Verlagerungswirkung hat der CO₂-Preis im Straßengüterverkehr, so dass im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 ein Modal Split der Schiene von 23,1 % resultiert.

7.4.10 Modernisierung der Binnenschifffahrt und Nutzung von Landstrom in Häfen (3.4.3.7)

Bisher wird der während der Liegezeiten von Binnenschiffen in Häfen benötigte Strom an Bord durch den Betrieb von Hilfsmotoren erzeugt. Mit dieser Maßnahme wird der Einsatz von Landstrom während der Liegezeiten gefördert. Es wird angenommen, dass bis 2030 die Nutzung von Landstrom in Binnenhäfen verpflichtend wird.

In (Knörr et al. 2011) wird auf Basis einer Literaturrecherche ein Anteil von 1 % des gesamten Brennstoffverbrauchs der Binnenschiffe für die Stromversorgung abgeleitet. Durch die Maßnahme reduziert sich demnach der Dieserverbrauch in der Binnenschifffahrt um 1 %.

7.4.11 Pkw-Standards für 2025 und 2030 (3.4.3.8)

Im Dezember 2018 wurde auf EU-Ebene die Verordnung zur Fortführung der CO₂-Standards für Pkw beschlossen (European Parliament (EP); European Council 2019). Demnach sollen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von Neuwagen bis 2025 um 15 % und bis 2030 um 37,5 % sinken, jeweils bezogen auf das Basisjahr 2021.

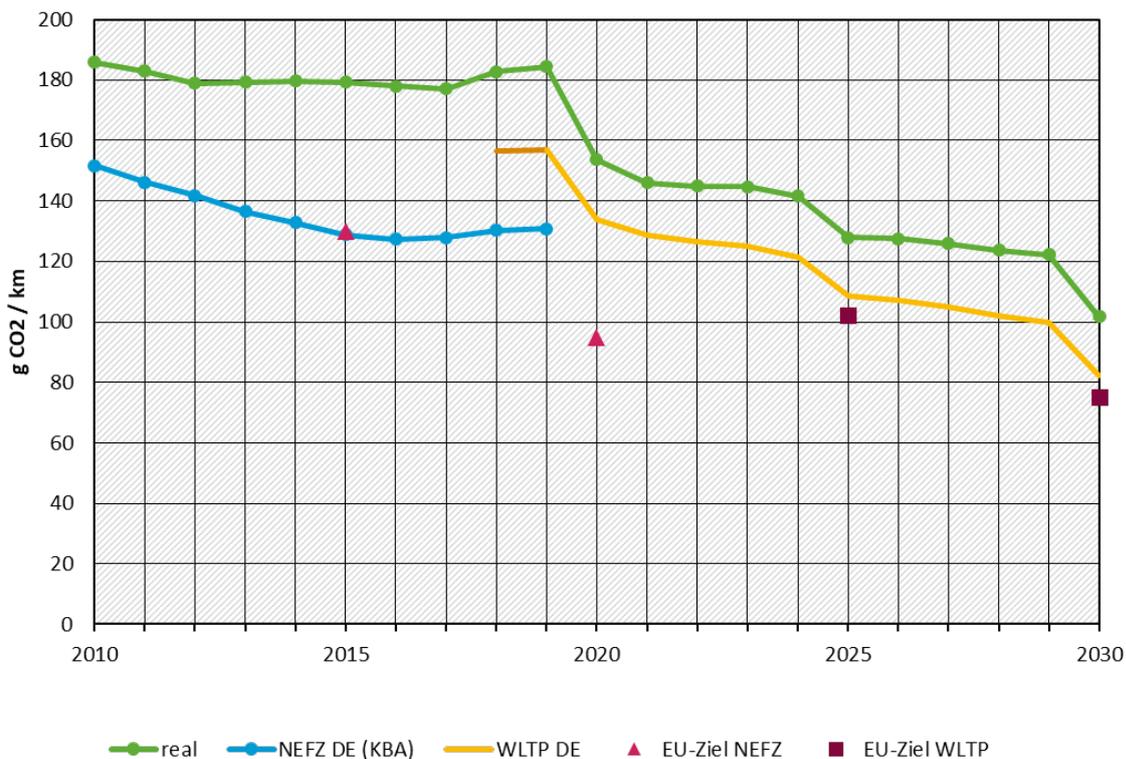
Hersteller, die einen hohen Anteil von niedrig emittierenden Fahrzeugen („zero and low emitting vehicles“ bzw. ZLEVs) an den Neuzulassungen haben, können ihren Flottenzielwert um bis zu 5 % abschwächen, und zwar um so viel Prozentpunkte, wie sie oberhalb des Benchmarks für ZLEV liegen (15 % im Jahr 2025 und 35 % in 2030). Ab 2021 müssen außerdem alle neuen Fahrzeuge mit einem On-Board-Kraftstoffverbrauchsüberwachungsgerät ausgestattet sein. Anhand der damit gesammelten Daten wird die Europäische Kommission von 2021 bis 2026 die Entwicklung der Abweichung zwischen Testzyklus und Realverbrauch überwachen.

Diese Maßnahme ist nicht im eigentlichen Sinne Bestandteil des Klimaschutzprogramms 2030. Zwecks Konsistenz mit der Referenzentwicklung der NPM wurden die Pkw-Standards jedoch ebenfalls nicht in die Referenzentwicklung aufgenommen. Dagegen ist der für 2021 gültige und bereits im Jahr 2009 auf EU-Ebene beschlossene CO₂-Standard für Pkw von 95 g CO₂/km (NEFZ) in der Referenzentwicklung enthalten.

Durch die EU-Pkw-CO₂-Standards werden für die Jahre 2025 und 2030 Flottenziele festgelegt; nicht aber für die Zwischenjahre. Bisher wurde für die Zwischenjahre oft ein linearer Reduktionpfad angenommen. Vor dem Hintergrund der Erfahrungen mit dem 2020/21-er Ziel - es ist ein deutlicher Sprung zu erwarten - sowie dem nicht-linearen Hochlauf der Elektromobilität ist ein linearer Verlauf jedoch wenig wahrscheinlich. Die „worst case“-Annahme wäre, dass jeweils nur die Mindestziele eingehalten werden. Es wird eine mittlere Annahme getroffen und davon ausgegangen, dass die CO₂-Emissionen der Neuzulassungen zwischen 2021 und 2024 um 3 g CO₂/km p.a. sinken und 2025 um weitere 10 g CO₂/km; ähnlich zwischen 2025 und 2030.

Die EU-CO₂-Standards für Pkw und Lkw sind im Flottenmittel über alle in der EU zugelassenen Fahrzeuge zu erfüllen. Die durch die CO₂-Standards zu erwartende Minderung in Deutschland hängt somit auch davon ab, wie hoch die CO₂-Minderung der Neuzulassungen in den anderen Ländern ausfällt. Für die Berechnung wird angenommen, dass auch weiterhin die Pkw in Deutschland 7 % mehr emittieren als im EU-Schnitt.

Abbildung 39: Entwicklung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen von Pkw-Neuzulassungen im Zeitraum 2010-2030 mit CO₂-Standards bis 2030 (NEFZ, WLTP, real)



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Daten des ICCT und eigenen Berechnungen.

7.4.12 Kaufprämie für elektrische Pkw (3.4.3.8)

Mit der am 13. Februar 2020 veröffentlichten „Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus)“ (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 13.02.2020) wurde die Kaufprämien für elektrische Pkw (in Abhängigkeit des Listenpreises) erhöht und bis Ende 2025 verlängert.

Bund und Industrie sollen weiterhin hälftig für die Prämie aufkommen. Der Bundesanteil der Kaufprämie stellt sich demnach wie folgt dar:

Tabelle 94: Kaufprämie für elektrische Pkw (Bundesanteil)

	Mai 2016-2019	2020-2025
BEV unter 40 Tsd. €	2.000	3.000
BEV 40 – 65 Tsd. €	2.000	2.500
PHEV unter 40 Tsd. €	1.500	2.250
PHEV 40 – 65 Tsd. €	1.500	1.875

Quelle: (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 13.02.2020)

Niedrigere Preise für E-Pkw erhöhen den Anteil der Käufer, die sich für einen E-Pkw entscheiden. In der Modellierung wird nur der Bundesanteil der Kaufprämie bei der Wirkung auf die Pkw-Preise berücksichtigt, da Mitnahmeeffekte angenommen werden. Die Begründung dafür ist wie folgt: Die Bemessungsgrundlage für den Beitrag der Automobilhersteller zur Kaufprämie ist der niedrigste Nettolistenpreis des Basismodells im Euroraum. Gegenüber dieser Bemessungsgrundlage musste der tatsächliche Kaufpreis bisher – bis Ende 2019 - im Vertrag um mind. 2.000 € für BEV bzw. 1.500 € für PHEV niedriger liegen; ab 2020 erhöht sich dieser Wert entsprechend. Rabatte in dieser Größenordnung (gegenüber dem Nettolistenpreis) werden jedoch häufig – auch für verbrennungsmotorische Fahrzeuge – gewährt. Der Bundesrechnungshof stellte entsprechend fest, dass der von den Automobilherstellern zu tragende Anteil am Umweltbonus offensichtlich oft mit den bereits bestehenden Rabatten verrechnet wurde (Bundesrechnungshof 2018).

Es ist zu beachten, dass es hohe Wechselwirkungen zwischen der Kaufprämie und den Pkw-CO₂-Standards gibt. Je höher der Anteil der E-Pkw an den Neuzulassungen ausfällt, desto geringer ist die bei den verbrennungsmotorischen Pkw notwendige Effizienzsteigerung zur Erfüllung der Pkw-CO₂-Standards. Diese Wechselwirkung wird in der Modellierung berücksichtigt. Daher ist insgesamt der zusätzliche Effekt durch die Kaufprämie für elektrische Pkw gering. Besonders hoch ist die Wechselwirkung im Jahr 2025, da ab diesem Jahr ein verschärfter CO₂-Standard für Pkw gilt. Hier ist darauf zu verweisen, dass es aufgrund der Wechselwirkungen mit den CO₂-Standards hohe Unsicherheiten hinsichtlich der Wirkung des Instruments gibt. Es könnte auch sein, dass die Kaufprämie vollständig zu Mitnahmeeffekten führt und keine CO₂-Minderung gegenüber den EU-Flottengrenzwerten entsteht.

Die erforderlichen Haushaltsmittel sollen aus dem Sondervermögen "Energie- und Klimafonds" (EKF) zur Verfügung gestellt werden. Für die Förderung sind ab dem Jahr 2020 Bundesmittel aus dem EKF in Höhe von 2,09 Milliarden € vorgesehen. Die Förderung erfolgt bis zur vollständigen Auszahlung dieser Mittel, längstens bis 2025.

Für die Modellierung wurde eine Laufzeit der Kaufprämie bis 2025 angenommen, allerdings ohne Begrenzung der Mittel. Die insgesamt ausgezahlten Mittel im Zeitraum 2020-2025 liegen nach der Modellierung bei rund 6,3 Mrd. €.

7.4.13 Dienstwagenbesteuerung (3.4.3.8)

Wird ein Dienstwagen auch privat genutzt, wird dieser Vorteil grundsätzlich mit 1 % des inländischen Listenpreises als geldwerter Vorteil versteuert (sog. Listenpreismethode). Bereits seit Januar 2019 ist für Elektro- und extern aufladbare Hybridelektrofahrzeuge diese Bemessungsgrundlage auf 0,5 % halbiert, so dass Dienstwagennutzer durch einen geringeren Abzug des geldwerten Vorteils von der Steuer profitieren.

Mit dem „Gesetz zur weiteren steuerlichen Förderung der Elektromobilität und zur Änderung weiterer steuerlicher Vorschriften“ (Deutscher Bundestag 12.12.2019) wurde diese Regelung bis zum 31. Dezember 2030 verlängert. Elektrofahrzeuge mit einem Listenpreis unter 40.000 € werden sogar nur noch mit 0,25 % versteuert.

Ab dem Jahr 2022 muss die (rein elektrisch betriebene) Mindestreichweite der geförderten Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge 60 km betragen oder ein maximaler CO₂-Ausstoß von 50 g/km gelten. Ab 2025 steigt die Mindestreichweite dann auf 80 km (oder max. CO₂-Ausstoß von 50 g/km).

Die Dienstwagenbesteuerung wird nicht gesondert quantifiziert, sondern als unterstützend für die Erreichung der Pkw-Standards bewertet.

7.4.14 Änderung der Kfz-Steuer für Pkw (3.4.3.8)

Das Klimaschutzprogramm 2030 sieht eine stärkere Ausrichtung der jährlich anfallenden Kfz-Steuer an CO₂ vor: „Die Bundesregierung wird die Kraftfahrzeugsteuer stärker an den CO₂-Emissionen ausrichten und dazu ein Gesetz zur Reform der Kraftfahrzeugsteuer bei Pkw vorlegen, so dass von dieser eine deutlich stärkere Lenkungswirkung beim Neuwagenkauf hin zu emissionsärmeren bzw. emissionsfreien Antrieben ausgeht. Für Neuzulassungen ab dem 1. Januar 2021 wird die Bemessungsgrundlage der Steuer hauptsächlich auf die CO₂-Prüfwerte pro km bezogen und oberhalb 95 g CO₂ / km in zwei Emissionsstufen erhöht.“

Zu diesem Instrument lag zum Zeitpunkt der Berechnung keine genauere Ausgestaltung vor. Für die Modellierung wurde folgende Annahme getroffen: Für Neuzulassungen ab dem 1. Januar 2021 oberhalb von 95 g CO₂/km (WLTP) fallen 4 € (statt bisher 2 €) je g CO₂ pro Jahr an, oberhalb von 115 g CO₂/km sind es 5,50 € je g CO₂. Die Hubraumkomponente bleibt konstant.

Die Kfz-Steuer wirkt auf die Kosten des Pkw-Besitzes und hat somit Einfluss auf die Antriebswahl. Die Höhe der zusätzlich anfallenden Steuer ist jedoch gering: Für einen vergleichsweise effizienten Verbrenner mit 125 g CO₂/km (WLTP) sind es beispielsweise 75 € jährlich.

7.4.15 Tank- und Ladeinfrastruktur ausbauen (3.4.3.9)

Die wesentlichen Festlegungen zum Ausbau der Ladesäuleninfrastruktur im Klimaschutzprogramm 2030 sind:

- ▶ eine Million öffentlich zugängliche Ladepunkte bis 2030 mit entsprechenden Förderprogrammen bis 2025
- ▶ Förderung von gemeinsam genutzter privater und gewerblicher Ladeinfrastruktur
- ▶ Schaffung guter Rahmenbedingungen, damit die Verteilnetzbetreiber in die Intelligenz und Steuerbarkeit der Netze investieren und ihr Netz vorausschauend ausbauen können
- ▶ Vereinfachung im Wohneigentumsgesetz (WEG) und im Mietrecht hinsichtlich der Vorschriften für die Errichtung von Ladeinfrastruktur, insb. soll dabei das Einstimmigkeitsprinzip durch das Mehrheitsprinzip ersetzt werden
- ▶ Einrichtung einer „Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur“ für einen koordinierten Hochlauf der Ladeinfrastruktur

Genauere Ausführungen dazu sind im „Masterplan Ladeinfrastruktur“ enthalten. (Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland 2019). Insgesamt sind laut Angaben des BMVI 3 Mrd. € für die Ladeinfrastruktur bei Pkw und Lkw bis 2030 vorgesehen (BMVI 2019).

Der Aufbau einer Ladeinfrastruktur ist zwingend für hohen E-Pkw-Anteil. Er flankiert die Förderung von E-Pkw und wird nicht separat quantifiziert.

7.4.16 Lkw-Standards (3.4.3.10)

Im Februar 2019 wurden in der EU CO₂-Emissionsstandards für neue schwere Nutzfahrzeuge beschlossen (Parliament and Council of the European Union 2019). Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen sollen bis 2025 um 15 % und bis 2030 um 30 % gegenüber einem von Juli 2019 bis Juni 2020 ermittelten Bezugswert sinken.

Betroffen sind Lkw mit einem Gesamtgewicht von mehr als 16 Tonnen und mit 4x2- und 6x2-Achsenkonfiguration; dies entspricht knapp 80 % der THG-Emissionen von Lkw (>3,5 t) in Deutschland (TNO 2018). Reguliert werden dabei je Hersteller die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen (tank-to-wheel) im Flottenmittel, ausgedrückt in g CO₂/tkm (Rodriguez 2019).

Für die Modellierung wird angenommen, dass die Ziele durch Effizienzsteigerung von konventionellen Lkw erreicht werden. Die aktuelle Entwicklung im Bereich batterieelektrischer Lkw lässt auch eine Erfüllung der Ziele durch einen höheren Anteil elektrischer Fahrzeuge denkbar werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein höherer Anteil elektrischer Lkw im Gegenzug zu einer entsprechend geringeren Effizienzsteigerung der konventionellen Lkw führen würde, so dass der THG-Minderungsbeitrag ähnlich ausfallen würde oder sogar niedriger ausfallen könnte. Grund dafür ist, dass die Regulierung zusätzliche Anreize für niedrig emittierende Lkw vorsieht (in Form von Supercredits bis 2024 bzw. einem Benchmark-System ab 2025), wobei auch die nicht-regulierten Lkw-Größenklassen berücksichtigt werden. Durch Mehrfachanrechnung können die CO₂-Emissionen der Hersteller (auf dem Papier) um zusätzlich bis zu 3 % reduziert werden.

Im Unterschied zu den Pkw-CO₂-Standards ist für die Zielerfüllung der Lkw-Standards durch die Einführung des Borrowing (Verschieben der Zielerfüllung bei Nicht-Erreichen des Ziels mithilfe von Emissionsschulden/Debts) und des Banking (Nutzung von Emissionsrechten/Credits bei starker frühzeitiger Reduktion) mehr Flexibilität vorhanden. Aufgrund der derzeitigen Marktsituation wird davon ausgegangen, dass keine frühzeitigen Credits erworben werden, sondern eher die Möglichkeit des Borrowings in Anspruch genommen wird. Dies führt zu einer verzögerten Reduktion der Emissionen. Im Jahr 2030 ergibt sich dennoch die vorgegebene Minderung. Das Emissionsniveau liegt im Jahr 2025 so, dass Emissionsschulden erworben werden, deren Höhe mit 2,5 % bezüglich des Emissionsziels des Jahres 2025 die Hälfte des erlaubten Werts an Emissionsschulden aufweist. Ausgeglichen werden die Emissionsschulden im Jahr 2029. Emissionsfreie Fahrzeuge im nicht regulierten Segment können auf die Zielerreichung angerechnet werden. Insgesamt wird in den Berechnungen von einer Minderung der spezifischen Emissionen der konventionellen Lkw im Jahr 2025 um 11,7 % und im Jahr 2030 von 29 % (jeweils gegenüber 2019) ausgegangen.

7.4.17 Standards für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) (3.4.3.10)

Berücksichtigt werden die EU-LNF-CO₂-Standards für die Jahre 2025 und 2030. Für die Zwischenjahre werden Annahmen ähnlich zu den Pkw getroffen, d.h. die Reduktion ist nicht linear, sondern es werden in den Jahren 2025 und 2030 stärkere Reduktionen erreicht.

Die Ziele werden überwiegend durch emissionsfreie Fahrzeuge erreicht. Der Anteil von batterieelektrischen Fahrzeugen steigt bis 2025 auf 10 % und bis 2030 auf rund 20 % der Neuzulassungen.

7.4.18 Kaufprämie und Mautbegünstigung von Lkw mit alternativen Antrieben (3.4.3.10)

Es werden die Konditionen des bisherigen Förderprogramms unterstellt („Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO₂-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs“, (BMVI 22.05.2018)) unterstellt mit folgenden Kaufprämien:

- ▶ E-Lkw ab 12t 40.000 €
- ▶ Lkw ab 7,5t bis 12t: E-Lkw 12.000 €, LNG-Lkw 12.000 €, Erdgasfahrzeuge 8.000 €

Die Mittel werden über den EKF bereitgestellt. Bisher sind dort Verpflichtungsermächtigungen von 650 Mio. € für die Jahre 2021-2023 vorgesehen, welche allerdings nur einen Teil der gesamt verfügbaren Mittel darstellen. Hinterlegt wird das in der folgenden Tabelle dargestellte Förder- volumen von insgesamt knapp 1 Mrd. €.

Tabelle 95: Haushaltsmittel für Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben (Mio. €)

Titel	Zweckbestimmung	2020	2021	2022	2023
89308-332	Zuschüsse für die Anschaffung von Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben		210	338	410,6

Quelle: (BMVI 22.05.2018)

Ferner wurde für die Berechnungen unterstellt, dass Elektro-Lkw von 2019-2022 und mit Erdgas betriebene Fahrzeuge bis Ende 2020 komplett von der Lkw-Maut befreit sind. Ab dem 1. Januar 2021 wurde mit einem reduzierten Mautsatz gerechnet, der 1,1 Cent/km günstiger als für ein vergleichbares Diesel-Fahrzeug der Euro 6-Norm ist. Dazu gehören Fahrzeuge mit Erdgasantrieb (Compressed Natural Gas – CNG) und Flüssigerdgasantrieb (Liquefied Natural Gas – LNG).

Es wird angenommen, dass die Kaufprämie im Nutzfahrzeugbereich in den Jahren 2021 bis 2023 zusammen mit der Mautbefreiung / Mautbegünstigung von Lkw zu 3 % BEV an den Neuzulassungen der Lkw zwischen 7,5 und 16 t führt und zu 5 % LNG-Fahrzeugen bei den schweren Nutzfahrzeugen. Diese Anteile wurden auf Basis von Marktanteilsprognosen der Hersteller für alternative Antriebe abgeleitet. Die Fördersumme von 1 Mrd. € wird dadurch nur zu rund einem Drittel abgerufen.

7.4.19 CO₂-Spreizung der Lkw-Maut (3.4.3.10)

Die Höhe des CO₂-Aufschlags auf der Lkw-Maut bzw. der Mautspreizung ist im Klimaschutzprogramm 2030 nicht angegeben. Es wurde keine über die Kaufprämie und den CO₂-Preis hinausgehende Wirkung modelliert.

7.4.20 Tank-, und Lade- und Oberleitungsinfrastruktur ausbauen (3.4.3.11)

Bisher ist noch kein konkretes Politikinstrument zum Aufbau einer Tank-, Lade- und Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr beschlossen oder konkret absehbar. Daher wird kein Aufbau einer Infrastruktur für alternative Antriebe im Güterverkehr angenommen.

7.4.21 Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen, innovative Mobilitätsformen ermöglichen (3.4.3.12)

Laut Klimaschutzprogramm 2030 soll eine Anpassung des Personenbeförderungsgesetzes Voraussetzungen für neue digitale Mobilitätsdienste schaffen.

Mit einer gezielten Regulierung könnten digitale Mobilitätsdienste das konventionelle Verkehrsangebot im Umweltverbund gezielt ergänzen und so die Attraktivität gegenüber dem Pkw deutlich steigern. Dagegen kann eine völlige Freigabe digitaler Mobilitätsdienste genau die gegenteilige Wirkung haben, indem die neuen Mobilitätsangebote zulasten des ÖPNV gehen und damit sogar zu Mehrverkehren führen. Durch sinkende Betriebskosten und alternative Beschäftigungen während der Reisezeit sind auch generell erhebliche Mehrverkehre infolge von Rebound-Effekten möglich. Da noch nicht beschlossen ist, wie das Personenbeförderungsgesetz angepasst

wird und damit nicht klar ist, welche Auswirkungen dies auf die Verkehrsnachfrage haben wird, wurde keine Wirkung der Maßnahme angenommen.

7.4.22 Steuerliche Förderung der Elektromobilität (Jahressteuergesetz 2019) (3.4.3.13)

Die steuerlichen Maßnahmen aus dem Jahressteuergesetz (Deutscher Bundestag 12.12.2019) sind bereits in den obigen Maßnahmen enthalten bzw. werden als flankierend gewertet, z.B. die vergünstigte Besteuerung von Dienstwagen.

7.4.23 CO₂-Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr

Der CO₂-Preis wirkt auf die Kraftstoffpreise. Der Benzinpreis erhöht sich im Jahr 2030 real (in € 2010) um 23,4 ct/Liter und der Dieselpreis um 26,1 ct/Liter (zuzüglich Mehrwertsteuer). Die Kraftstoffpreiselastizität der Pkw-Fahrleistung wird mit -0,3 angenommen und die Transportkostenelastizität der Lkw-Fahrleistung mit -0,6. Dies entspricht bei schweren Lkw einem Kraftstoffkostenanteil an den Transportkosten von 27 % einer Kraftstoffpreiselastizität der Lkw-Fahrleistung von etwa -0,15. Berechnet wurde die Minderungswirkung gegenüber einem Szenario mit Pkw- und Lkw-Standards.

7.4.24 Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler

Mit der Entfernungspauschale können Wegekosten zwischen Wohn- und Arbeitsstätte als Werbungskosten von der Einkommensteuer abgesetzt werden. Sie beträgt derzeit 30 ct je Entfernungskilometer und Arbeitstag. Es zählt die (einfache) Entfernung, nicht die Anzahl der täglich gefahrenen Strecken.

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 wird die Pauschale ab dem 21. Entfernungskilometer auf 35 ct (2021-2023) bzw. 38 ct (2024-2026) angehoben (Deutscher Bundestag 21.12.2019). Ab dem 20. Entfernungskilometer können Geringverdienende, die keine Steuern zahlen, auf Antrag eine „Mobilitätsprämie“ in Höhe von 14 % der Entfernungspauschale erhalten.

Wie hoch die zusätzliche Steuerersparnis ausfällt, hängt vom individuellen Einkommensteuersatz ab. Bei 40 km Entfernung zum Arbeitsplatz und 220 Arbeitstagen bekommt man im Jahr 2021 bei einem niedrigen Einkommen (Grenzsteuersatz von 20 %, also etwa ein monatliches zu versteuerndes Einkommen von knapp unter 1000 €) pro Jahr zusätzlich (durch die Erhöhung der Entfernungspauschale) 44 € erstattet

Gutverdiener mit einem Grenzsteuersatz von 40 % (monatliches zu versteuerndes Einkommen von gut 4000 €) bekommen durch die erhöhte Entfernungspauschale doppelt so viel zurück.

Umgerechnet entspricht die Erhöhung der Entfernungspauschale bei einem Durchschnittsverbrauch von 7,5 Liter/100km je nach Einkommensteuersatz einer Entlastung von ca. 5-16 Cent/Liter Benzin (je nach Grenzsteuersatz 15-47 %).

Durch die Anhebung der Entfernungspauschale erhöht sich die Attraktivität des Fernpendelns (> 20 km). Es wird davon ausgegangen, dass der Anteil der Fernpendler (>20 km) mit dem Pkw bis 2025 um ca. 1 % steigt. Das entspricht 69.000 Pkw-Pendlern. Bei 220 Arbeitstagen und durchschnittlich 40 km Entfernung zur Arbeit ergibt sich eine um 1,2 Mrd. km höhere Pkw-Fahrleistung. Weiterhin wird angenommen, dass sich die zusätzliche Pkw-Fahrleistung durch das Auslaufen der höheren Entfernungspauschale bis 2030 um 50 % reduziert.

7.5 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

7.5.1 Gesamtergebnisse

Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sinken die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 auf 128,4 Mio. t CO₂e (Tabelle 96). Gegenüber dem Ziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes von 95 Mio. t CO₂e verbleibt also eine Lücke von 33,4 Mio. t CO₂e. Der THG-Minderungsbeitrag im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 gegenüber dem Referenzszenario liegt im Jahr 2025 bei 9,5 Mio. t CO₂e und steigt bis zum Jahr 2030 auf 21,9 Mio. t CO₂e an. Es zeigt sich, dass bereits ab 2020 die im Bundes-Klimaschutzgesetz vorgegebenen Emissionsbudgets des Verkehrssektors nicht eingehalten werden.

Tabelle 96: Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Inländischer ziviler Luftverkehr	2,4	2,5	2,6	2,4	2,2	2,1	2,1	2,0
Straßenverkehr	154,3	154,0	147,6	160,3	161,7	145,7	124,5	100,0
Schienenverkehr	2,9	1,4	1,1	1,0	1,0	0,6	0,1	0,1
Schiffsverkehr	3,7	2,0	1,7	2,0	1,5	1,6	1,7	1,7
Gesamt	163,3	159,9	153,0	165,6	166,3	150,0	128,4	103,7
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz					150,0	123,0	95,0	
Abweichung vom Sektorziel					16,3	27,0	33,4	
Nachrichtlich:								
Internationaler ziviler Luftverkehr ¹⁰⁰	12,1	22,9	24,2	26,4	26,9	28,2	29,3	29,9
Internationaler Schiffsverkehr	6,5	7,2	8,3	8,3	7,6	7,8	7,9	7,7
Gesamt inkl. nachrichtlich	181,9	190,0	185,5	200,3	200,8	186,0	165,7	141,3

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Größter Treiber für die Minderung sind die (auf EU-Ebene bereits beschlossenen) Fortschreibungen der europäischen CO₂-Grenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge und die Einführung von CO₂-Grenzwerten für Lkw. Diese tragen im Jahr 2030 mit insgesamt rund 8 Mio. t CO₂e zur THG-Minderung bei (Tabelle 97 und Tabelle 98). Die Fahrzeugstandards wirken auf die Neuzulassungen nach 2021 und haben durch die verzögerte Wirkung auf den Fahrzeugbestand vor allem langfristig gegen Ende der 20er Jahre sowie in der darauffolgenden Dekade einen spürbaren THG-Minderungseffekt.

Bei den Pkw kommt es im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 mit 5,6 Mio. elektrischen Pkw (BEV und PHEV) im Bestand zu einem spürbaren Antriebswechsel, was zum Großteil auf die europäischen Pkw- CO₂-Standards zurückzuführen ist. Die Kaufprämien für Pkw haben dagegen

¹⁰⁰ Alle abgehenden grenzüberschreitenden Flüge, sowohl in EU- als auch in Nicht-EU-Länder.

nur eine begrenzte Wirkung. Wichtiger Grund dafür ist, dass es Wechselwirkungen mit den CO₂-Standards gibt. Der Verkauf von E-Pkw ist für die Hersteller notwendig, um die CO₂-Standards einzuhalten. Eine zusätzliche Kaufprämie hat daher nur einen begrenzten Effekt.

Im Schwerlastverkehr gibt es im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 keinen deutlichen Antriebswechsel, da die dafür aller Voraussicht nach notwendiger Umgestaltung der Lkw-Maut bisher im Klimaschutzprogramm 2030 noch nicht hinreichend konkretisiert und daher im Szenario nicht berücksichtigt ist. Lediglich die Kaufprämie für alternative Lkw-Antriebe führt in den Jahren 2021 bis 2023 zur Neuzulassung eines geringen Anteils von Gas- und Elektro-Lkw.

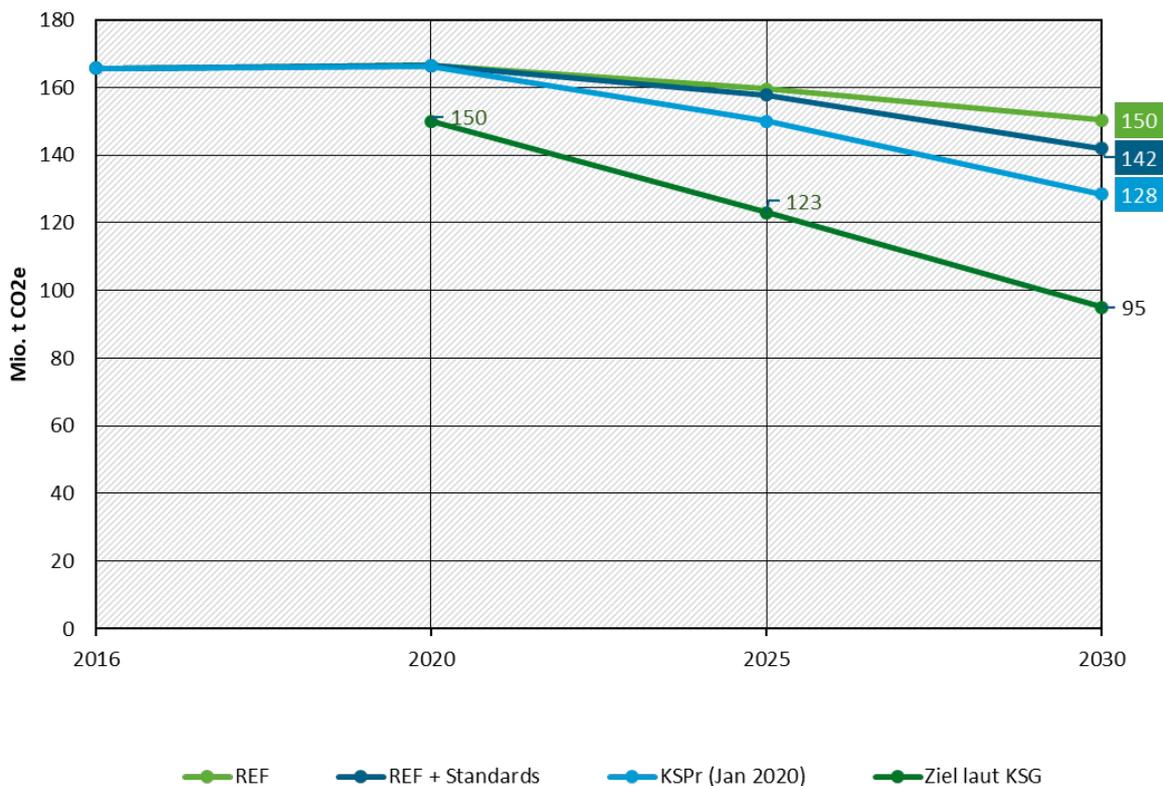
Der zusätzliche Minderungsbeitrag durch das Klimaschutzprogramm beläuft sich auf 7,7 Mio. t im Jahr 2025 und 13,6 Mio. t im Jahr 2030.

Tabelle 97: Treibhausgasminderung im Verkehrssektor im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
REF	163,3	159,9	153,0	165,6	166,4	159,5	150,3	138,6
Minderung durch Fortschreibung CO ₂ -Standards für Pkw und LNF (post-2020) sowie Lkw-Standards	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,8	-8,3	-15,7
REF + CO ₂ -Standards (post-2020)	163,3	159,9	153,0	165,6	166,4	157,7	142,0	122,9
Minderung durch das Klimaschutzprogramm 2030	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-7,7	-13,6	-19,2
KSPr (Jan 2020)	163,3	159,9	153,0	165,6	166,3	150,0	128,4	103,7

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 40: Entwicklung der THG-Emissionen im Verkehrssektor 2010-2030



Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts mit TEMPS

7.5.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Bei der Bewertung der Einzelinstrumente ist zu beachten, dass zwischen den Instrumenten in der Realität Wechselwirkungen auftreten. Besonders relevant ist dies bei den Instrumenten zur Effizienzsteigerung und Elektrifizierung von Pkw, da hierauf zahlreiche Instrumente wirken (Pkw-Standards, Kaufprämie, Kfz-Steuer, Dienstwagenbesteuerung, Ladeinfrastruktur). Für die Bewertung der Einzelinstrumente wurde wie folgt vorgegangen:

- ▶ In einem ersten Schritt wurde die Wirkung der CO₂-Standards für Pkw, Lkw und leichte Nutzfahrzeuge ermittelt, da diese auf EU-Ebene bereits beschlossen sind.
- ▶ Die Wirkung aller weiteren Instrumente wurde gegenüber dem Szenario mit Fortschreibung der Fahrzeugstandards (Szenario „REF+Standards“) ermittelt.
- ▶ Die Summe der Wirkung der Einzelinstrumente ist aufgrund von Überschneidungseffekten etwas höher (ca. 5 %) als die Gesamtwirkung des Klimaschutzprogramms 2030. Die bottom-up berechnete Wirkung der Einzelinstrumente wurde auf die Gesamtwirkung kalibriert.

In Tabelle 98 und Abbildung 42 sind die Instrumente im Verkehrssektor zum Zwecke einer besseren Übersicht aggregiert zu Instrumentenbündeln dargestellt. Das Bündel „Förderung Schiene + ÖV + Rad“ enthält die Instrumente Erhöhung Luftverkehrsabgabe, die Reduktion der Mehrwertsteuer im Bahn-Fernverkehr, die Mittelerhöhung für den Radverkehr und den ÖPNV. Die Elektrifizierung von Schienenverkehr, Bussen, und Lkw wurde ebenfalls zusammengefasst. Tabelle 99 zeigt die Bewertung der Einzelinstrumente im Detail.

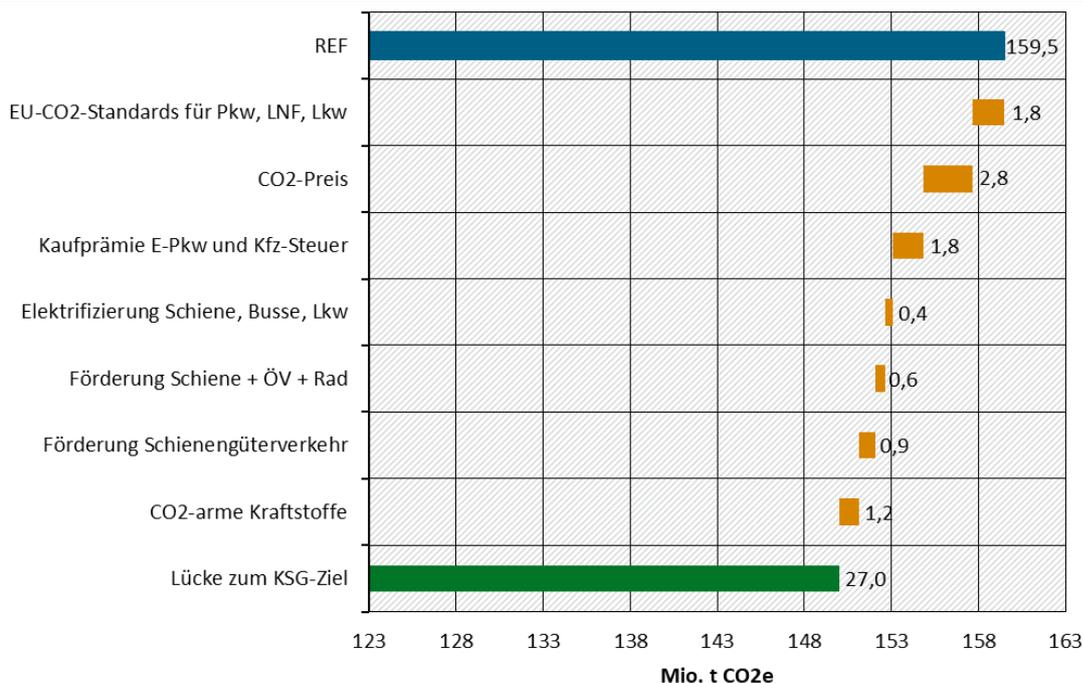
Nach den EU-CO₂-Standards hat die zweitgrößte Wirkung der CO₂-Preis¹⁰¹ mit 6 Mio. t CO₂e im Jahr 2030. Die übrigen Instrumente des Klimapakets tragen zusammen weitere gut 8 Mio. t CO₂e zur THG-Minderung im Jahr 2030 bei, davon knapp 3 Mio. t CO₂e durch zusätzliche fortschrittliche Kraftstoffe.

Tabelle 98: THG-Minderungsbeitrag der Instrumentenbündel im Verkehrssektor in der Übersicht (direkte THG-Emissionsreduktion im Verkehr, ohne Vorketten der Stromerzeugung)

Instrumentenbündel	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e		
EU-CO ₂ -Standards für Pkw, LNF, Lkw	1,82	8,33	15,74
CO ₂ -Preis und Entfernungspauschale	2,84	6,08	8,58
Kaufprämie E-Pkw und Kfz-Steuer	1,76	1,37	0,60
Elektrifizierung Schiene, Busse, Lkw	0,42	0,95	1,00
Förderung Schiene + ÖV + Rad	0,60	0,64	0,55
Förderung Schienengüterverkehr	0,91	1,79	1,73
CO ₂ -arme Kraftstoffe	1,16	2,74	6,71

Quelle: Eigene Berechnungen

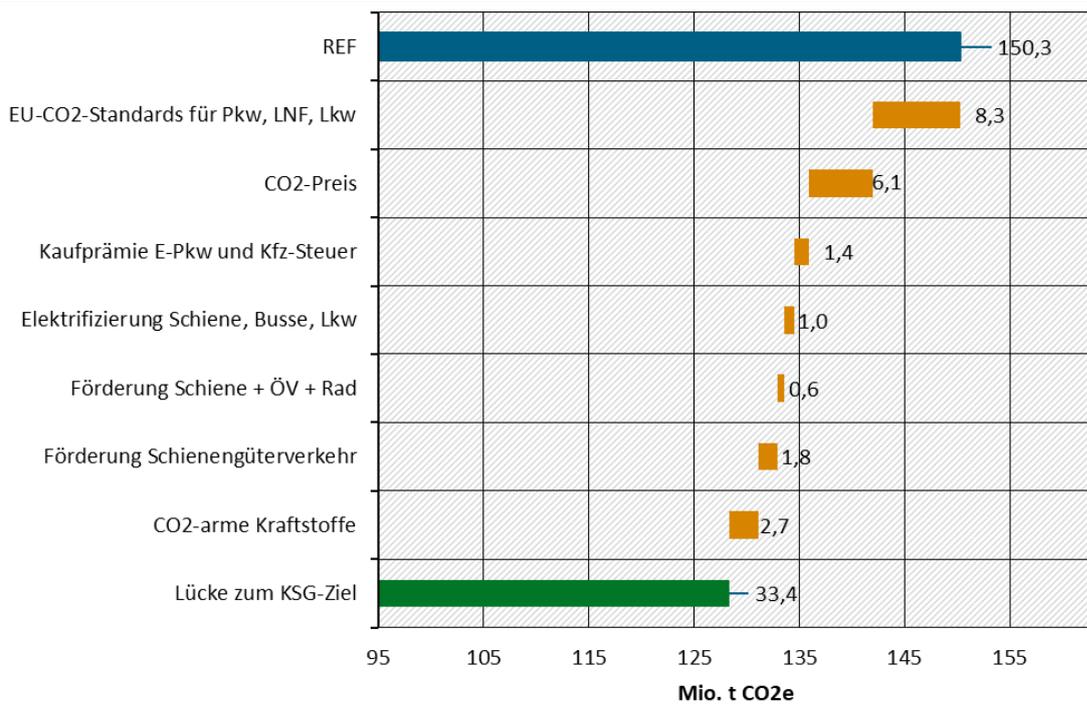
Abbildung 41: THG-Minderungsbeitrag der Instrumentenbündel im Verkehr im Jahr 2025



Quelle: Eigene Berechnungen

¹⁰¹ Einschließlich der Rückerstattung über die Senkung der EEG-Umlage.

Abbildung 42: THG-Minderungsbeitrag der Instrumentenbündel im Verkehr im Jahr 2030



Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 99: THG-Minderungsbeitrag der Einzelinstrumente

Kapitel im KSP	Instrument	2025	2030	2035
		Mio. t CO _{2e}		
3.4.3.1	Stärkung des Schienenpersonenverkehrs			
	<i>Luftverkehrsabgabe + MwSt. Bahn-Fernverkehr</i>	0,29	0,27	0,24
	<i>Elektrifizierung Schienenpersonenverkehr</i>	0,18	0,42	0,38
3.4.3.2	Attraktivität des ÖPNV erhöhen			
	<i>Mittelerhöhung GVFG + Regionalisierungsmittel</i>	0,23	0,30	0,26
	<i>Elektrische Busse im ÖPNV</i>	0,08	0,23	0,36
3.4.3.3	Ausbau von Radwegen und Fahrradparkmöglichkeiten sowie Verbesserung der Rahmenbedingungen	0,08	0,07	0,06
3.4.3.4	Entwicklung strombasierter Kraftstoffe	0,00	0,60	4,52
3.4.3.5	Unterstützung fortschrittlicher Biokraftstoffe	1,16	2,14	2,19
3.4.3.6	Stärkung des Schienengüterverkehrs			
	<i>Verlagerung auf den Schienengüterverkehr</i>	0,91	1,79	1,73
	<i>Elektrifizierung Schienengüterverkehr</i>	0,11	0,28	0,25

Kapitel im KSP	Instrument	2025	2030	2035
3.4.3.7	Modernisierung der Binnenschifffahrt und Nutzung von Landstrom in Häfen	0,00	0,01	0,02
3.4.3.8	CO ₂ -arme Pkw auf die Straße bringen			
	<i>Pkw-Standards</i>	0,37	2,34	6,30
	<i>Kaufprämie Pkw, Kfz-Steuer, Dienstwagenbesteuerung</i>	1,76	1,37	0,60
3.4.3.9	Pkw: Tank- und Ladeinfrastruktur ausbauen			
3.4.3.10	CO ₂ -arme Lkw auf die Straße bringen			
	<i>Lkw-Standards</i>	1,40	5,13	7,47
	<i>LNF-Standards</i>	0,04	0,86	1,96
	<i>Kaufprämie Lkw</i>	0,05	0,02	0,00
3.4.3.11	Lkw: Tank-, Lade- u. Oberleitungsinfrastruktur ausbauen			
3.4.3.12	Verkehr automatisieren, innovative Mobilitätsformen	0,00	0,00	0,00
3.4.3.13	Steuerliche Förderung der Elektromobilität (Jahressteuergesetz 2019)			
3.2.1	CO ₂ -Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr	3,00	6,16	8,59
3.3.2	Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler	-0,16	-0,08	-0,01
Gesamt		9,50	21,90	34,90

Quelle: Eigene Berechnungen

7.5.3 Einordnung der Unsicherheiten

Unsicherheiten bei der Projektion der Szenarien und der THG-Emissionen können verschiedene Ursachen haben. Bereits in der Referenzentwicklung gibt es Unsicherheiten, die sich beispielsweise aus den externen Rahmenbedingungen (Ölpreis, Batteriepreisentwicklung) sowie aus gesellschaftlichen Trends ergeben.

Bei der Modellierung der Wirkung des Klimaschutzprogramms 2030 können sich Unsicherheiten daraus ergeben, dass a) die politische Umsetzung von Instrumenten unklar ist, oder b) es Unsicherheiten hinsichtlich der Wirkung der Instrumente gibt, z.B. da es nicht ausreichend empirische Grundlagen oder Vorerfahrungen mit der Wirkmächtigkeit von Instrumenten gibt.

Unsicherheiten bzgl. der politischen Umsetzung von Instrumenten ergeben sich vor allem bei den folgenden Instrumenten:

- Das Ziel der Elektrifizierung Schwerlastverkehr (Ziel „1/3 Fahrleistung elektrisch/strombasiert“) ist noch kaum mit Instrumenten hinterlegt. Es wurde daher kein Aufbau Infrastruktur (z.B. für O-Lkw) und keine Spreizung der Lkw-Maut hinterlegt. Wenn hier eine ambitionierte Umsetzung erfolgt, sind höhere THG-Minderungen im Straßengüterverkehr denkbar.

- ▶ Das Klimaschutzprogramm 2030 gibt keine klaren Vorgaben für den Einsatz alternativer Kraftstoffe. Der THG-Minderungsbeitrag wird wesentlich von der Umsetzung der THG-Minderungsquote abhängen.
- ▶ Zum Zeitpunkt der Berechnungen gab es noch keinen Beschluss zur Kfz-Steuer. Es wurde nur eine geringfügige Erhöhung gegenüber heute angenommen, von der eine auch nur geringe CO₂-Minderung ausgeht (ab 2021: oberhalb von 95 g CO₂/km (WLTP) fallen 4 € statt bisher 2 € je g CO₂ an, oberhalb von 115 g CO₂/km sind es 5,50 € je g CO₂.)

Unsicherheiten gibt es auch bei der Wirkung der Instrumente. Den größten Einfluss auf die vorliegenden Ergebnisse dabei haben folgende Unsicherheiten

- ▶ Die Wirkung des CO₂-Preises hängt von den jeweils angenommenen Preiselastizitäten ab (hier: -0,3 im Pkw-Verkehr).
- ▶ Welche Wirkung die Pkw- und Lkw-CO₂-Standards in Deutschland haben, hängt u.a. auch von den möglichen zusätzlichen Instrumenten in anderen EU-Ländern ab.
- ▶ Wechselwirkungen von Instrumenten entstehen vor allem durch die zahlreichen Instrumente mit Wirkung auf die Elektromobilität bei Pkw (CO₂-Standards, Kaufprämien, vergünstigte Dienstwagenbesteuerung, Kfz-Steuer, Ladeinfrastruktur).

7.6 Vergleich der Szenarien

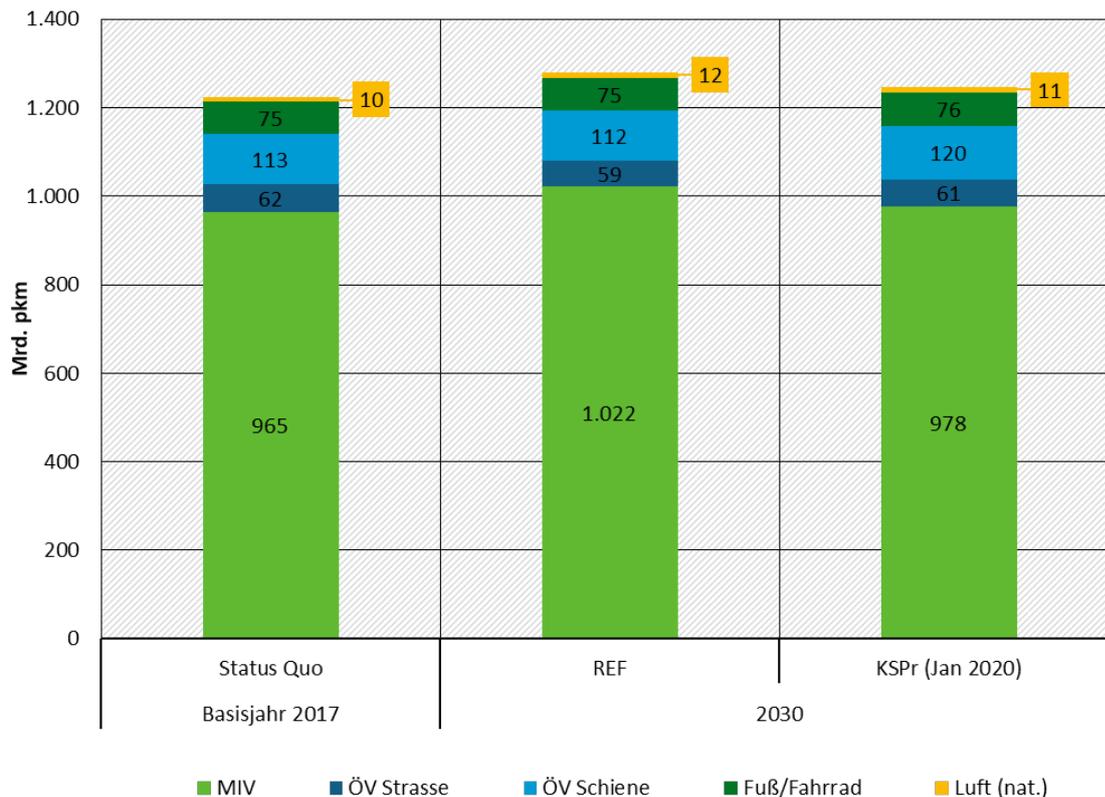
7.6.1 Verkehrsnachfrage Personenverkehr

Im Referenzszenario (welches auf dem Referenzszenario der NPM basiert) steigt die Verkehrsnachfrage im Personenverkehr bis 2030 weiter leicht an, wobei vor allem der Pkw-Verkehr zunimmt. In der Referenzentwicklung der NPM waren - bedingt durch den Zeitpunkt der Erstellung - aktuelle Trends und Daten der letzten zwei Jahre noch nicht vollumfänglich berücksichtigt, wie beispielsweise die deutliche Zunahme des Radverkehrs.

Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 liegt der Pkw-Verkehr um 4,4 % (44 Mrd. pkm) niedriger als im Referenzszenario, was überwiegend auf die veränderten Nutzerkosten durch den CO₂-Preis zurückzuführen ist. Die durchschnittlichen Kilometerkosten für Energie (d.h. Kraftstoffe bzw. Strom) sind im Referenzszenario im Jahr 2030 auf gleichem Niveau wie 2017. Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 liegen sie dagegen um rd. 14 % höher. Durch den CO₂-Preis steigen die Kosten auf fossile Kraftstoffe um 20 % für Benzin bzw. 5 % für Diesel gegenüber der Referenzentwicklung an. Der Anstieg wird allerdings teilweise durch die stärkere Effizienzentwicklung und den höheren Anteil an Elektrofahrzeugen kompensiert.

Der Radverkehr nimmt gegenüber der Referenzentwicklung um 1,2 Mrd. pkm (3 %) zu. Der Schienenverkehr wird durch die zusätzlichen Mittel gestärkt und wächst um 7,4 % gegenüber der Referenzentwicklung.

Abbildung 43: Verkehrsnachfrage im Personenverkehr 2030 in Referenzszenario (REF) und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))



Quelle: Modellrechnungen des Öko- Instituts

7.6.2 Verkehrsnachfrage Güterverkehr

Im Referenzszenario (basierend auf dem Referenzszenario der NPM) steigt die Verkehrsnachfrage im Güterverkehr bis 2030 weiter an.

Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 ist der Lkw-Verkehr um 4,5 % (25 Mrd. tkm) niedriger als im Referenzszenario. Der CO₂-Preis führt zu einer Erhöhung der Dieselpreise. Die höheren Kosten für fossilen Diesel werden ebenso wie bei den Pkw teilweise durch die Effizienzsteigerung der Lkw kompensiert. Daher steigen die Energiekosten im Straßengüterverkehr gegenüber der Referenzentwicklung im Jahr 2030 um lediglich 6 % an.

Die Verlagerung ist nicht allein auf den CO₂-Preis zurückzuführen, sondern auch auf die angenommene deutliche Stärkung des Schienengüterverkehrs. Der Modal Split des Schienengüterverkehrs steigt im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 auf 23,1 % gegenüber 19,4 % im Referenzszenario.

Abbildung 44: Verkehrsnachfrage im Güterverkehr 2030 in Referenzszenario (REF) und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))

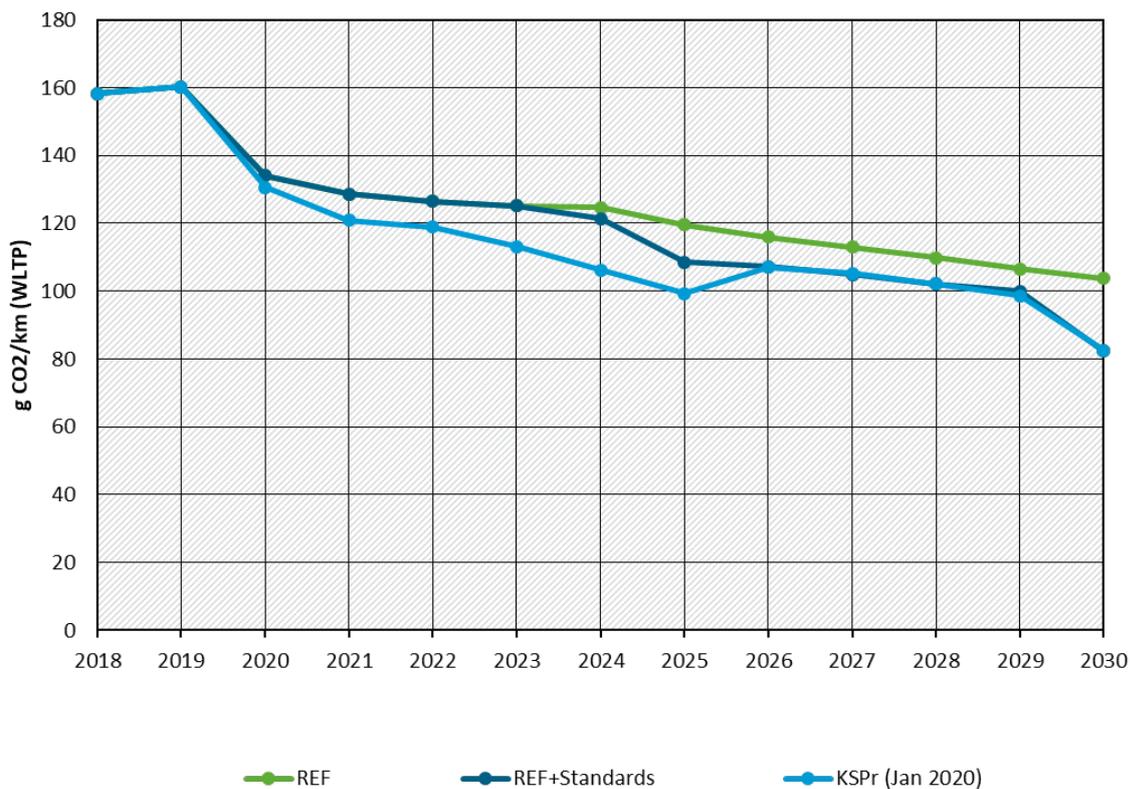


Quelle: Modellrechnungen des Öko- Instituts

7.6.3 Pkw

Abbildung 45 zeigt die Entwicklung der CO₂-Emissionen neu zugelassener Pkw nach dem Testzyklus WLTP im Szenariovergleich. Durch den Pkw-Standard für 2025 bzw. 2030 kommt es im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 ab dem Jahr 2025 zu einer stärkeren Effizienzentwicklung als im Referenzszenario.

Abbildung 45: CO₂-Emissionen neu zugelassener Pkw (nach WLTP) in Deutschland, 2018-2030

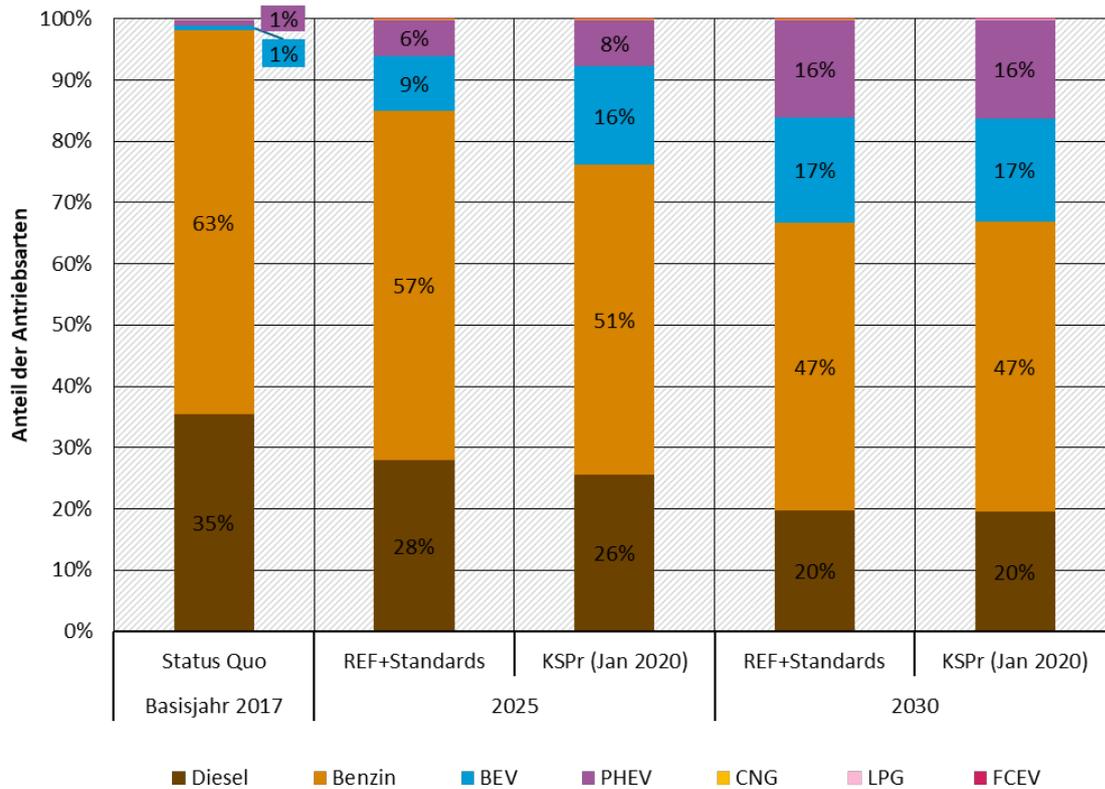


Quelle: Modellrechnungen des Öko- Instituts

Die Fortschreibung der EU-Pkw-CO₂-Standards mit den Zielwerten für 2025 und 2030 wird zum überwiegenden Teil (etwa 2/3 der Zielerreichung) durch Elektrofahrzeuge erfüllt und zu einem kleineren Teil durch Effizienzsteigerung bei den verbrennungsmotorischen Fahrzeugen. Im Szenario mit Fortschreibung der Pkw-Standards steigt der Anteil von E-Pkw an den Neuzulassungen auf 15 % in 2025 (Abbildung 46). Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 ist der Anteil von E-Pkw im Jahr 2025 mit 24 % etwa 9 %-Punkte höher, was durch die zusätzlichen Instrumente (CO₂-Preis, Kaufprämie, und Kfz-Steuer) bedingt ist.

Im Jahr 2030 steigt der Anteil von Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen auf 33 % in beiden Szenarien. Mit den getroffenen Annahmen gibt es also in der Modellierung durch die Instrumente des Szenario Klimaschutzprogramm 2030 keinen zusätzlichen Effekt auf die Neuzulassungen an Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 gegenüber den Pkw-Standards. Die Kaufprämie ist nur bis zum Jahr 2025 in Kraft. Das zusätzliche Preissignal durch den CO₂-Preis ist im Modell nicht hoch genug, um im Jahr 2030 einen über die Pkw-Standards hinausgehenden Effekt auf die Neuzulassungen zu generieren. Hier ist allerdings anzumerken, dass es deutliche Unsicherheiten in Bezug auf die Nutzerreaktion bei der Pkw-Kaufentscheidung gibt.

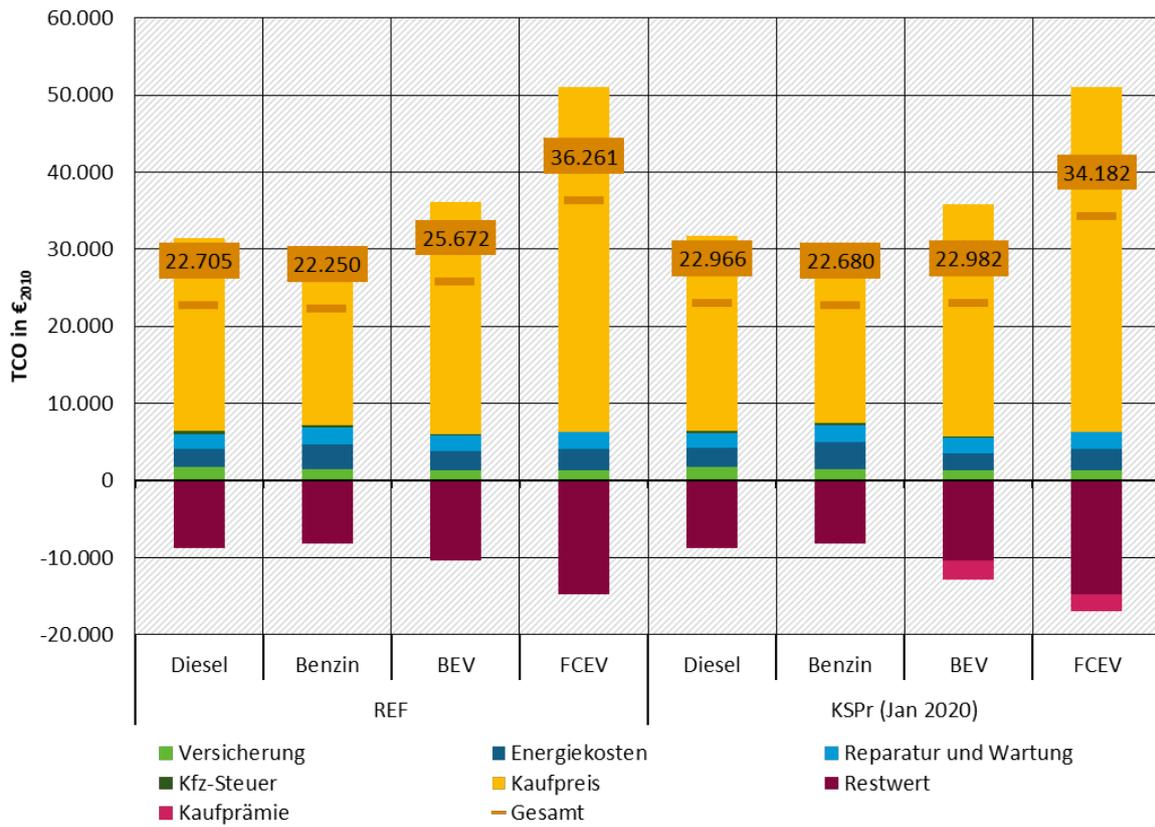
Abbildung 46: Anteile der Antriebsarten an den Pkw-Neuzulassungen



Quelle: Modellrechnungen des Öko- Instituts. Antriebe: BEV = batterieelektrisch, PHEV = Plug-In-Hybrid, CNG = Erdgas, LPG=Flüssiggas, FCEV = Brennstoffzellenfahrzeug.

In Abbildung 47 sind die Gesamtkosten der Pkw-Nutzung (TCO) im Jahr 2025 für ein beispielhaftes Nutzerprofil eines Kompaktklasse-Pkw mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 km und einer Haltedauer von drei Jahren dargestellt. Die TCO des batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV) liegen im Referenzszenario für dieses Nutzerprofil durch den höheren Kaufpreis über denen von Diesel- und Benzin-Pkw. Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 liegen die TCO des BEV hingegen ähnlich hoch wie die der konventionellen Fahrzeuge. Dies liegt vor allem an der Kaufprämie und zum kleineren Teil an den niedrigeren Stromkosten durch die Senkung der EEG-Umlage. Außerdem sind die konventionellen Fahrzeuge im Szenario KSPr etwas teurer in der Anschaffung, da mehr Effizienztechnologien im Fahrzeug verbaut sind. Die Energiekosten je Kilometer der konventionellen Fahrzeuge liegen im Szenario KSPr nur leicht höher als im Referenzszenario, da die höhere Effizienz dem Effekt des CO₂-Preises entgegenwirkt. Die TCO von Wasserstoff-Pkw (FCEV) liegen in beiden Szenarien durch die höheren Anschaffungspreise weit höher als bei BEV, was sich in einem sehr niedrigen Anteil dieser Fahrzeuge an den Neuzulassungen auswirkt.

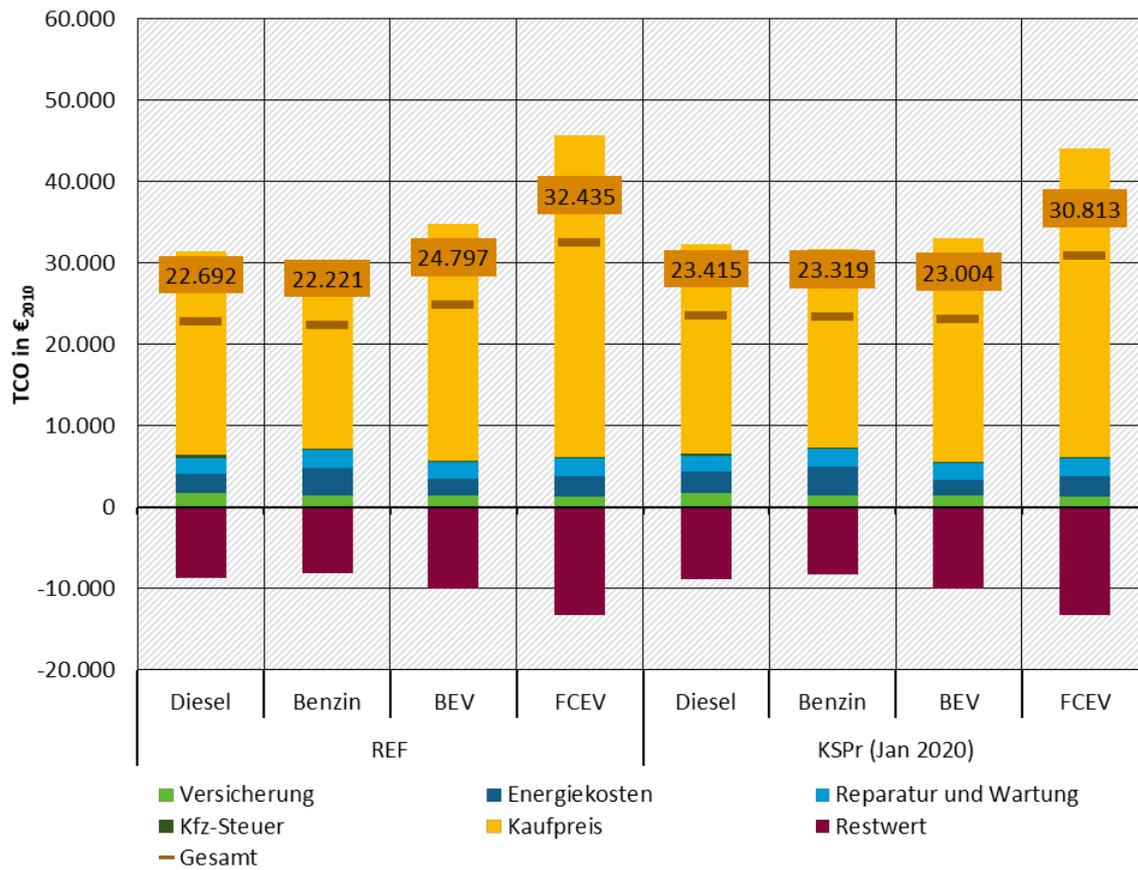
Abbildung 47: TCO für einen im Jahr 2025 neu zugelassenen Kompaktklasse-Pkw



Quelle: Modellrechnungen des Öko- Instituts

Im Jahr 2030 (Abbildung 48) gibt es keine Kaufprämie für elektrische Antriebe. Der Kaufpreis für batterieelektrische Fahrzeuge ist dennoch im Szenario KSPr um rd. 1600 € niedriger als im Szenario REF. Grund dafür ist die im Modell hinterlegte interne Preiskalkulation der Hersteller: Um die Pkw-CO₂-Standards einzuhalten, werden batterieelektrische Pkw und Brennstoffzellen-Pkw günstiger verkauft, während gleichzeitig Diesel- und Benzinfahrzeuge teurer werden.

Abbildung 48: TCO für einen im Jahr 2030 neu zugelassenen Kompaktklasse-Pkw

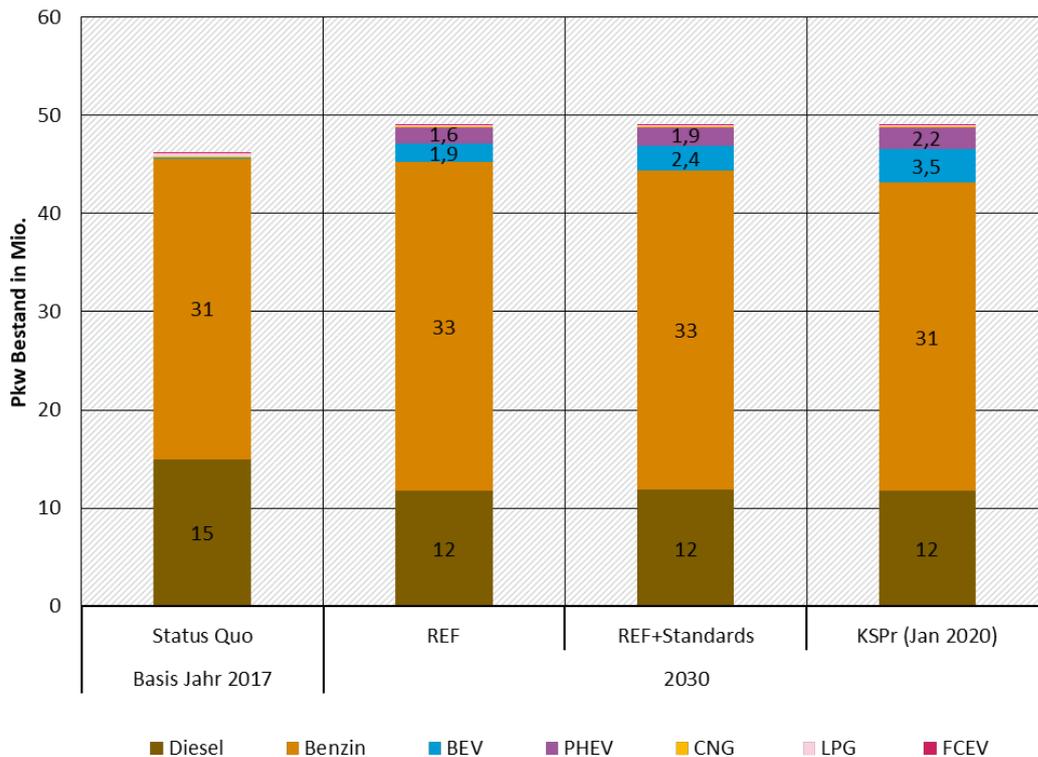


Quelle: Modellrechnungen des Öko- Instituts

Für den Pkw-Bestand in 2030 (Abbildung 49) sind die Neuzulassungen über den gesamten Zeitraum bis 2030 relevant. Bei den typischen Überlebenskurven ist der Großteil der derzeitigen Pkw-Neuzulassungen auch im Jahr 2030 noch im Fahrzeugbestand.

In der Referenzentwicklung sind im Jahr 2030 3,5 Mio. E-Pkw (BEV und PHEV) im Bestand. Bereits durch die Pkw-Standards steigt der Anteil von E-Pkw auf 4,3 Mio. im Jahr 2030. Der Pkw-Bestand an elektrischen Fahrzeugen liegt im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 bei 5,7 Mio. Fahrzeugen.

Abbildung 49: Pkw-Bestand 2030 im Referenzszenario (REF) und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))



Quelle: Modellrechnungen des Öko- Instituts. Antriebe: BEV = batterieelektrisch, PHEV = Plug-In-Hybrid, CNG = Erdgas, LPG=Flüssiggas, FCEV = Brennstoffzellenfahrzeug.

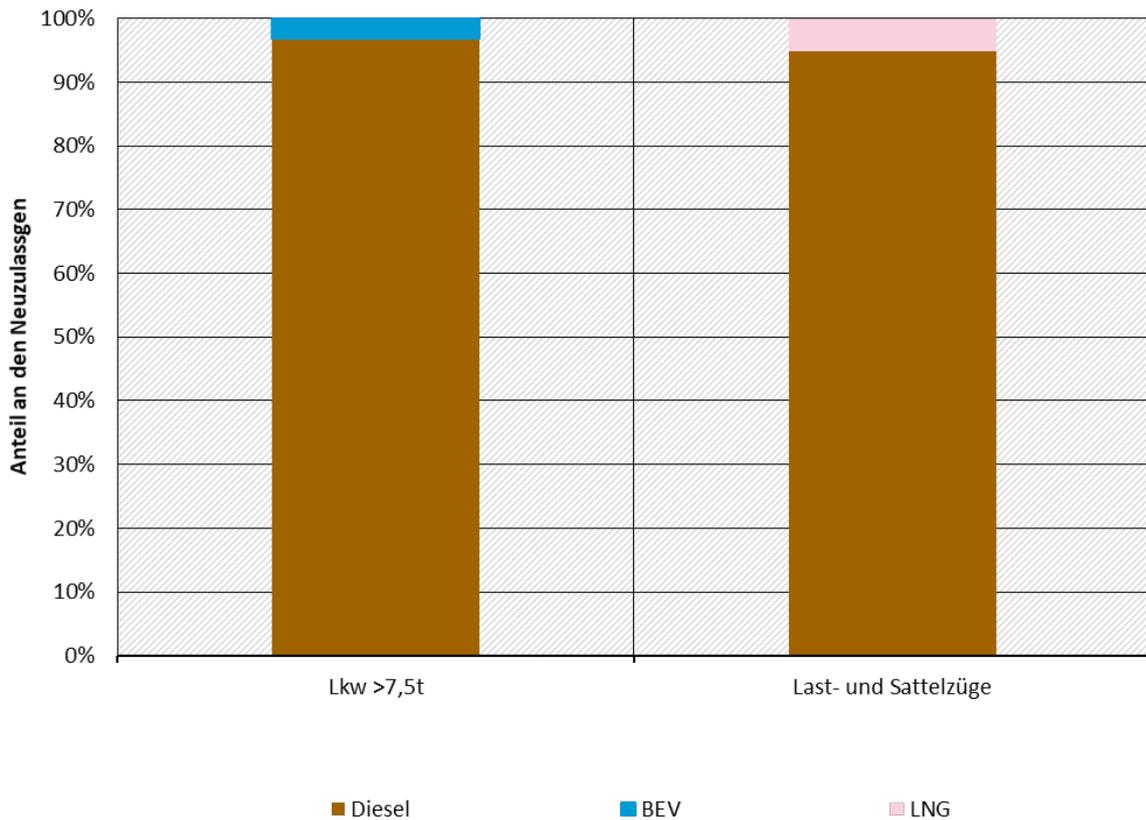
7.6.4 Lkw und leichte Nutzfahrzeuge

Wie bei den Pkw sind für den Bestand der Lkw und leichten Nutzfahrzeuge im Jahr 2030 die Neuzulassungen über den gesamten Zeitraum relevant.

Sowohl im Referenzszenario als auch im Szenario Referenz + Standards werden ausschließlich Diesel-Lkw zugelassen, da angenommen wird, dass die Ziele der EU-Standards durch Effizienzsteigerung bei den konventionellen Antrieben erreicht werden.

Die Kaufprämie führt in den Jahren 2023 bis 2025 zur Neuzulassung von jeweils rund 3 % batterieelektrischen Lkw (>7,5t) und 5 % LNG-Fahrzeugen bei den Last- und Sattelzügen (Abbildung 50). Im Jahr 2025 machen diese Fahrzeuge einen Anteil am Fahrzeugbestand von knapp 1 % BEV bei den Lkw und 2,5 % LNG bei den Last- und Sattelzügen aus. Von diesen Fahrzeugen befinden sich im Jahr 2030 noch knapp 30 % im Bestand.

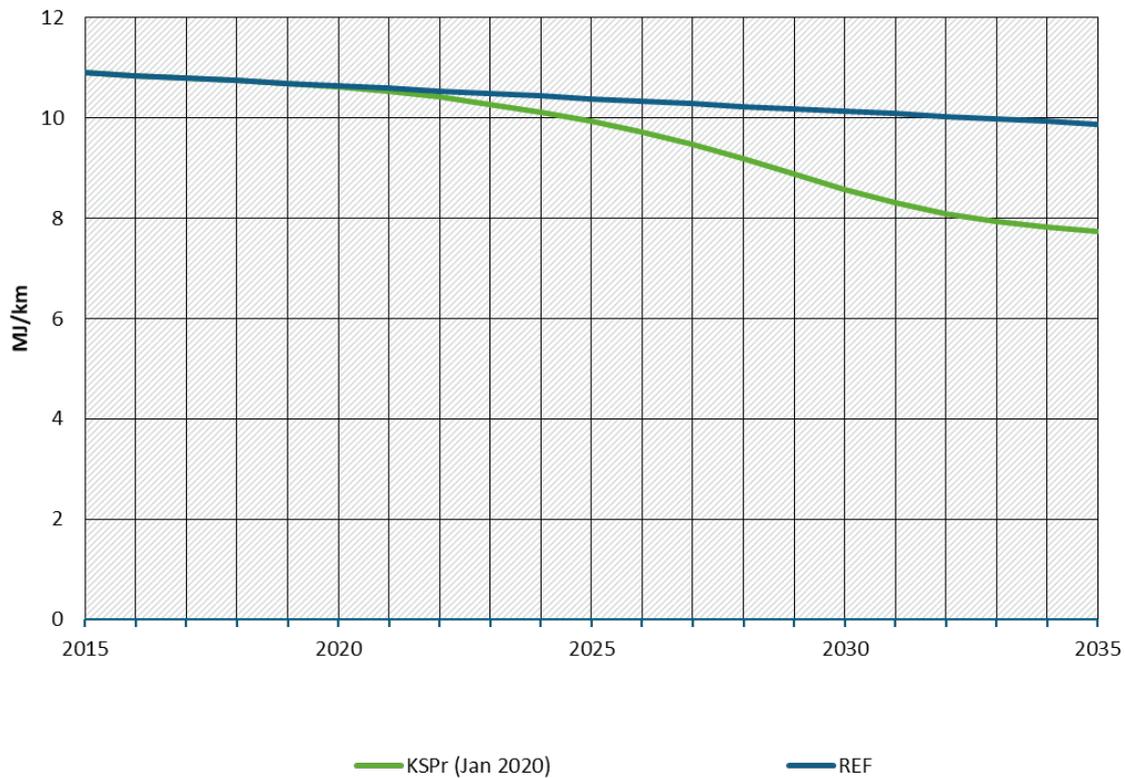
Abbildung 50: Antriebsanteile der Neuzulassungen von Lkw >7,5t und Last- und Sattelzügen im Jahr 2023 im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))



Quelle: Modellrechnungen des Öko- Instituts

Die Effizienzsteigerung der Last- und Sattelzüge beträgt im Referenzszenario rund 0,5 % pro Jahr (Abbildung 51). Zwischen 2019 und 2030 wird der Bestand an Last- und Sattelzügen damit rund 5 % effizienter. Durch die EU-Lkw-Standards wird eine höhere Effizienzsteigerung von knapp 2 % pro Jahr erreicht. Der Bestand wird bis 2030 somit um etwa 20 % effizienter.

Abbildung 51: Entwicklung der Effizienz des Bestands an Last- und Sattelzügen im Referenzszenario (REF) und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))



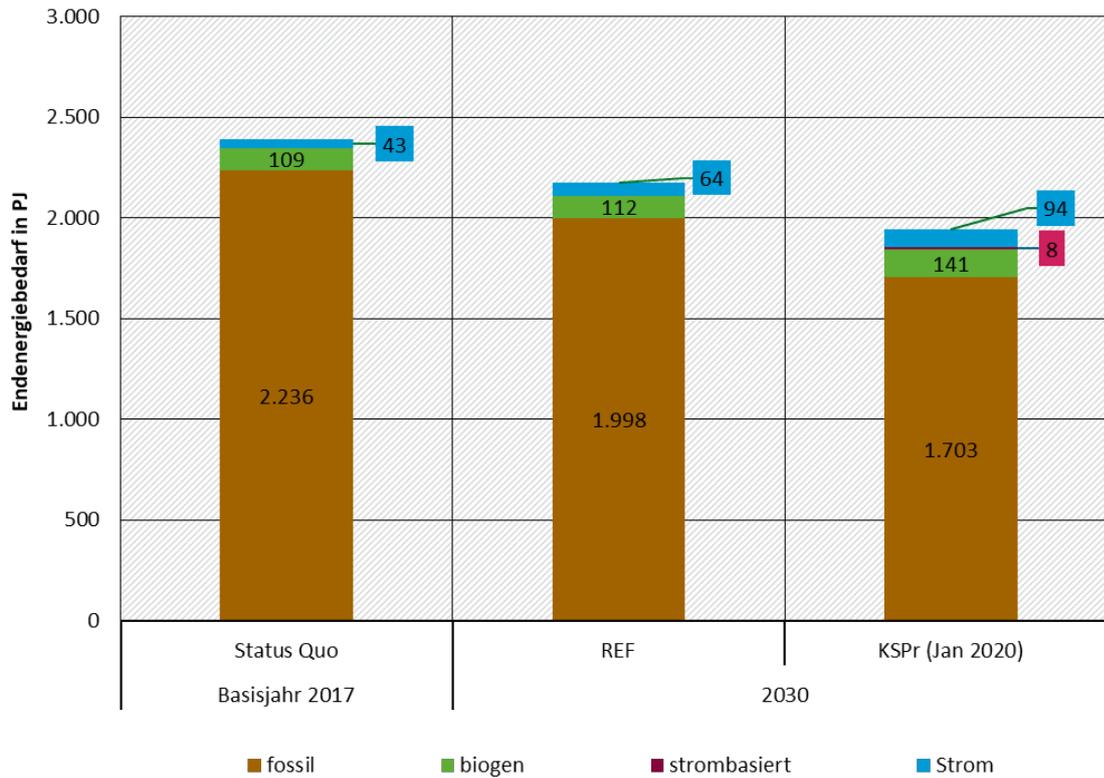
Quelle: Modellrechnungen des Öko- Instituts

7.6.5 Endenergieverbrauch

Im Referenzszenario geht der Endenergieverbrauch zwischen 2017 und 2030 um 9 % zurück (Abbildung 52). Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 beträgt die Reduktion 18,5 %. Der Einsatz fossiler Kraftstoffe sinkt im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 um 24 % im selben Zeitraum.

Der Einsatz von Biokraftstoffen steigt annahmegemäß im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 auf 141 PJ im Jahr 2030. Gleichzeitig nimmt die Elektrifizierung des Verkehrs zu, vor allem durch den Einsatz von Strom in Elektrofahrzeugen. Der Strombedarf im Jahr 2030 beträgt im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 12 TWh für die Schiene und 15 TWh für Pkw (ohne Ladeverluste). Hinzu kommt der Strombedarf für die Herstellung der gut 2 TWh strombasierter Kraftstoffe.

Abbildung 52: Endenergieverbrauch 2030 im Referenzszenario (REF) und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020))



Quelle: Modellrechnungen des Öko- Instituts

7.6.6 Treibhausgasemissionen inklusive internationalem Verkehr

Tabelle 100 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen inklusive des internationalen Verkehrs im Szenariovergleich (für einen Vergleich in Bezug auf den nationalen Verkehr siehe Abschnitte 7.3 und 7.5.1).

Tabelle 100: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Verkehrssektor (inklusive internationalem Verkehr) zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
Mio. t CO ₂ e								
CO₂-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	180,3	189,9	184,9	199,4				
REF					200,1	195,0	187,3	176,1
KSPr (Jan 2020)					199,9	185,1	165,1	140,9
CH₄-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	1,3	0,3	0,2	0,1				

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
REF					0,2	0,2	0,2	0,1
KSPr (Jan 2020)					0,2	0,1	0,1	0,1
N₂O-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	1,4	1,4	1,6	2,0				
REF					2,0	1,9	1,8	1,7
KSPr (Jan 2020)					2,0	1,8	1,6	1,4
Summe CO₂+CH₄+N₂O								
Entwicklung 1990 – 2016	183,0	191,5	186,7	201,6				
REF					202,2	197,0	189,3	178,0
KSPr (Jan 2020)					202,0	187,1	166,9	142,4
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 1990 in %							
Entwicklung 1990 – 2016		4,7	2,0	10,2				
REF					10,5	7,7	3,4	-2,7
KSPr (Jan 2020)					10,4	2,3	-8,8	-22,2
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 2005 in %							
Entwicklung 2005 – 2016			-2,5	5,2				
REF					5,6	2,9	-1,2	-7,1
KSPr (Jan 2020)					5,5	-2,3	-12,9	-25,6

Quelle: (UBA 2018b, 2018c), Modellrechnungen Öko-Institut

8 Projektionen Sektor Landwirtschaft

8.1 Methodik Referenzszenario

8.1.1 Landwirtschaftliche Böden, Nutztierhaltung und Sonstiges

Die Methodik sowie die Annahmen und Parameter zum Referenzszenario wurden unverändert aus den Berechnungen zum Projektionsbericht 2019 (Bundesregierung 2019c) übernommen.

8.1.2 Energieverbräuche der Landwirtschaft

Der Energieverbrauch der Landwirtschaft wurde durch ein einfaches Excel-basiertes Modell bestimmt, dass die Landwirtschaft entsprechend der CRF-Klassifizierung in drei Subsektoren aufteilt:

- ▶ Stationäre Feuerungsanlagen der Landwirtschaft (z.B. Heizungsanlagen von Gebäuden, Gewächshäusern und Ställen sowie Biogasanlagen),
- ▶ Mobile Quellen der Land- und Forstwirtschaft (z.B. Traktoren, Mähdrescher und Harvester, aber auch Motorsägen),
- ▶ Fischerei.

Für jeden der drei Subsektoren unterscheidet das Modell zwischen verschiedenen fossilen und biogenen Brennstoffen. Szenarientwicklungen können dabei einzeln für jeden Brennstoff abgebildet werden. Für die Sektoraufteilung des Klimaschutzplans wird der Energieverbrauch für die Landwirtschaft aus dem GHD-Energieverbrauch herausgerechnet. Für die Projektion des Verbrauchs fließen spezifische Annahmen zum Energieverbrauch und zum Einsatz der Energieträger innerhalb der Landwirtschaft in das Modell ein: Die Input-Parameter für den stationären Bereich sind Annahmen zur Entwicklung der Energieeffizienz in den einzelnen Bereichen Gewächshäusern, Trocknung, Tierhaltung und sonstigen stationäre Anwendungen. Für die mobile Nutzung erfolgt eine Differenzierung zwischen Anwendungen in der Innenwirtschaft und in der Außenwirtschaft im Bereich der schweren Landmaschinen. Die Entwicklung der einzelnen Brennstoffeinsätze im Modell wird ebenfalls v.a. durch Annahmen von außen gesteuert. Dies bildet die vorab exogen ermittelten Maßnahmenwirkungen ab. Die CO₂, CH₄ und N₂O Emissionen werden über die aktuellen Emissionsfaktoren der Brennstoffe berechnet. Änderungen wie beispielsweise eine Reduktion des Methanschlupf aus Biogasanlagen infolge einer Verbesserung der Anlagentechnik erfolgten über eine Anpassung der Emissionsfaktoren.

8.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario

8.2.1 Landwirtschaftliche Böden, Nutztierhaltung und Sonstiges

Der folgende Text wurde dem Projektionsbericht 2019 entnommen:

„Die Projektion für die Umfänge der Flächennutzung, Tierhaltung und der Erträge erfolgt auf Basis der Thünen-Baselineprojektion (Thünen 2018) [..].

Die Thünen-Baseline stellt keine Prognose der Zukunft dar, sondern beschreibt die erwarteten Entwicklungen unter bestimmten Annahmen zur Entwicklung exogener Faktoren und Politiken. Die agrarökonomischen Projektionen beruhen auf den im Juli 2017 vorliegenden Daten und Informationen zur weltwirtschaftlichen Entwicklung. Die Thünen-Baseline geht von einer Beibehaltung der derzeitigen Agrarpolitik bzw. der Umsetzung bereits beschlossener Politikänderungen aus. Für die

Thünen-Baseline 2017 – 2027 bedeutet dies im Wesentlichen, dass das mit der EU-Verordnung Nr. 1307/2013 beschlossene Direktzahlungssystem sowie dessen nationale Umsetzung bis zum Jahr 2027 fortgeführt wird. Weiterhin beinhaltet die Baseline u. a. das Auslaufen der Milch- und Zuckerquotenregelungen. Die Projektionen umfassen Ergebnisse für Agrarhandel, Preise, Produktion, Einkommen und Umweltwirkungen. Methodische Grundlagen und Annahmen für die Baseline sind in (Thünen 2018) und für die Emissionsberechnungen durch GAS-EM in (Haenel et al. 2018) beschrieben.

Das Zieljahr der Baselineprojektion ist das Jahr 2027. Die Aktivitätsumfänge werden für die Jahre 2030 und 2035 statisch fortgeschrieben. Für die im „Referenzszenario (MMS im Projektionsbericht 2019) „abgebildeten Maßnahmen werden auf Grundlage der Aktivitätsumfänge in der Thünen-Baseline zusätzliche Annahmen zur Veränderung der Aktivitätsdaten getroffen, die in das Emissionsmodell GAS-EM übernommen werden. Das OMS bildet die Situation ohne diese Maßnahmen ab. Auf diesen Grundlagen wurden Wirkungen der Maßnahmen abgeschätzt. Die Angaben der historischen Aktivitätsdaten und Emissionen für die Jahre 1990, 2005, 2010 und 2016 stammen aus der Submission 2018, die in der hier dargestellten Differenzierung in (Haenel et al. 2018) dokumentiert sind“ (Bundesregierung 2019d, S. 183-184).

8.2.2 Energieverbräuche der Landwirtschaft

Bei den stationären Feuerungsanlagen dominiert mit einem Anteil von knapp 60 % der Einsatz von Biogas (UBA 2018c).¹⁰² Dieser wird im Modell an die Biogasentwicklung im Stromsektor gekoppelt. Um die Instrumente des Referenzszenarios abzubilden, wurde für die übrigen Brennstoffe ein Rückgang von in Summe 10 % bis 2030 angenommen, wobei sich die brennstoffspezifische Entwicklung am GHD-Sektor orientiert. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Umweltbundesamt (UBA) 02.04.2019, 02.04.2019)

Für die mobilen Quellen der Land- und Forstwirtschaft gibt es unterschiedliche Trends: Die Maschinen werden größer und leistungsstärker, aber effizienter. Die bodenschonende Bearbeitung nimmt zu und spart Energie ein, gleichzeitig steigt der Ökolandbau, mit ihm nimmt der mechanische Pflanzenschutz zu. Inwiefern die Digitalisierung und Teilschlagbearbeitung tatsächlich zu einer Energieeinsparung führen, ist nicht eindeutig. Für das Referenzszenario wurde angenommen, dass sich diese Effekte gegenseitig kompensieren. Die Energieverbräuche wurden daher konstant fortgeschrieben.

Die Fischerei hat nur eine sehr untergeordnete Bedeutung, daher wurden die Energieverbräuche fortgeschrieben.¹⁰³

8.2.3 Instrumente im Referenzszenario

8.2.3.1 Landwirtschaftliche Böden, Nutztierhaltung und Sonstiges

Für die Beschreibung der Instrumente im Referenzszenario sei auf das MMS des Projektionsberichts 2019 verwiesen (Bundesregierung 2019d).

¹⁰² Allerdings bestehen hier große Unsicherheiten inwieweit die aus Biogas bereitgestellte Wärme auch wirklich verbraucht wird. Mit der Einführung des KWK-Bonus stieg der Wärmeverbrauch in der Landwirtschaft drastisch an. Als zusätzliche Wärmenutzung wird vor allem die Trocknung von Holz angegeben, vergleiche DBFZ Report Nr. 30 (2017); https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_30.pdf

¹⁰³ Da es in den Zeitreihen für die Fischerei deutliche Sprünge gibt, wurde für die Fortschreibung der Mittelwert der Jahre 2014 bis 2016 genutzt.

8.2.3.2 Energieverbräuche der Landwirtschaft

Für die Reduktion der energiebedingten Emissionen des Landwirtschaftssektors ist vor allem das bestehende Bundesprogramm zur Förderung der Energieeffizienz in der Landwirtschaft und im Gartenbau relevant. Im Rahmen dieses Programms wird zum einen die Energieberatung landwirtschaftlicher Unternehmen gefördert, zum anderen werden über das Programm Fördermittel an Betriebe in der Landwirtschaft und im Gartenbau vergeben. Hauptsächlich geht es um die Reduzierung des Energieverbrauchs durch Einzelmaßnahmen und systemische Optimierung. Brennstoffwechsel zu weniger emissionsintensiven Brennstoffen oder der Wechsel auf erneuerbare Energie soll angereizt werden, in dem eine Förderung ausgeschlossen ist, wenn Kohle oder Öl verwendet werden¹⁰⁴. Bisher wurden seit Programmstart im Jahr 2016 insgesamt 4.500 Förderanträge¹⁰⁵ gestellt.

Für die nächsten drei Jahren (2021-2023) stehen nach dem Wirtschaftsplan des Energie- und Klimafonds Fördermittel in Höhe von 45 Mio. € zur Verfügung.

8.3 Ergebnisse Referenzszenario

Der Landwirtschaftssektor umfasst verbrennungsbedingte Emissionen landwirtschaftlicher Maschinen sowie Emissionen aus der Viehwirtschaft und anderen landwirtschaftlichen Aktivitäten (Tabelle 101).

„Während die Emissionen aus der tierischen Verdauung (Fermentation) im Referenzszenario nach 2010 nahezu unverändert bleiben, sinken die Emissionen aus der Düngewirtschaft aufgrund eines erhöhten Gülleanteils, der in Biogasanlagen genutzt wird. Hinzu kommen die bis 2016 ansteigenden Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen, die ab 2020 langsam zurückgehen“ (Bundesregierung 2019d, S. 184f).

Die Treibhausgasemissionen aus den restlichen Quellgruppen bleiben im Referenzszenario im Projektionszeitraum in etwa konstant.

¹⁰⁴ Siehe https://www.ble.de/DE/Themen/Klima-Energie/Bundesprogramm-Energieeffizienz/bundesprogramm-energieeffizienz_node.html.

¹⁰⁵ https://www.ble.de/DE/Themen/Klima-Energie/Bundesprogramm-Energieeffizienz/bundesprogramm-energieeffizienz_node.html

Tabelle 101: Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft im Referenzszenario (REF), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Verbrennung von Brennstoffen	10,6	5,9	6,1	6,6	6,5	6,4	6,3	6,3
Fermentation bei der Verdauung	34,7	24,9	24,7	24,5	24,8	24,7	24,7	24,7
Wirtschaftsdünger-Management	13,2	10,9	10,3	9,9	10,0	9,1	9,0	9,0
Landwirtschaftliche Böden	28,4	24,8	24,3	26,4	24,4	24,2	23,9	23,9
Kalkung	2,2	1,4	1,5	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Harnstoffanwendung	0,5	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
Andere kohlenstoffhaltige Dünger	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Anderes	0,0	0,3	1,1	1,6	1,5	1,4	1,4	1,4
Gesamt	90,0	69,2	68,7	71,8	69,7	68,4	67,8	67,8
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz					70,0	64,0	58,0	
Abweichung vom Sektorziel*					-0,3	4,4	9,8	

Quelle: (Bundesregierung 2019d, Abschnitt 3.1.11.2) für nicht-verbrennungsbedingte Emissionen, Öko-Institut für verbrennungsbedingte Emissionen sowie Ergebniszusammenführung.

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

8.4 Methodik Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Jan2020)

Die Berechnung des Szenarios Klimaschutzprogramm 2030 erfolgt durch das Öko-Institut und basiert auf dem internen Landwirtschaftsmodell „LiSE - Livestock and Soil Emissions“. Das Modell besteht aus Modulen zur Tierhaltung, Bodennutzung und Energieanwendung (s.o.). Das Modell ist in MS Excel erstellt und basiert auf den jeweils aktuellsten RMD-Datensatz des Thünen Instituts. Für die Projektion werden die Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren auf der Basis von Szenarioannahmen fortgeschrieben.

Das Teilmodell zur Tierhaltung rechnet die Emissionen für Rinder, Schweine und Geflügel in einem Bottom-up-Ansatz aus, während die Emissionen der anderen Tiergruppen lediglich anhand einer reinfachen Fortschreibung dargestellt werden. Es fließen Leistungsparameter, Güllelagerung und -vergärung und Haltungsformen, in die Berechnungen ein, die nach den Vorgaben der deutschen Treibhausgasberichterstattung (Haenel et al. 2018) erstellt werden. Die Fortschreibung dieser Größen sowie die der Tierbestände erfolgen auf Basis der gewählten Storyline des jeweiligen Szenarios oder auf Basis von Trendanalysen. Das Modul zur Abschätzung der Entwicklung der Treibhausgase aus der Tierhaltung erzeugt Daten, die direkt in die Projektionen der Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden einfließen. In das Modul der landwirtschaftlichen Böden fließen externe Annahmen zur Entwicklung der Tierbestände und der Entwicklung der Energiepflanzengärreste durch die Biogasnachfrage aus den anderen Sektoren ein. Die Berechnung des Mineraldüngereinsatzes erfolgt auf Basis der Stickstoffeinträge pro Hektar unter Berücksichtigung von Flächenänderungen (Grünland, Ackerland und Bewirtschaftung organischer Böden)

und der Ausweitung des Ökolandbaus. Aus den direkten Stickstoffeinträgen werden die indirekten Lachgasemissionen, die durch die Auswaschung von Stickstoff in Böden oder die Freisetzung in die Atmosphäre entstehen, ermittelt.

In einem ersten Schritt wurde das Modell auf die Daten und Berechnungen des Referenzszenarios parametrisiert und anhand historischer Daten kalibriert. Damit kann das Referenzszenario abgebildet werden. Der zweite Schritt erfolgt dann analog zu allen anderen Sektoren, d.h. die Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 werden in einem weiteren Szenario parametrisiert, und die Minderungswirkungen der Maßnahmen werden ggü. dem Referenzszenario abgebildet.

Die Berechnung der energiebedingten Emissionen erfolgt mit dem Excel-basierten Modell auf Basis einer literaturbasierten Zuordnung der Energieeinsätze zu den einzelnen Energienachfragen. Berücksichtigt werden Gewächshäuser, Trocknung, Tierhaltung (Stallheizung, Milchkühlung etc.), Sonstiges (schätzungsweise landwirtschaftliche Wohngebäude, Dieseleinsatz in der Innen- und Außenwirtschaft). Auf Basis dieser Zuordnungen werden für die einzelnen Gebiete Annahmen zu Durchdringungsgrad und Effizienzgewinnen getroffen.

8.5 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030

Das Klimaschutzprogramm 2030 enthält insgesamt vier Maßnahmen, die direkten Einfluss auf die Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft haben. Eine Maßnahme (Moorbodenschutz) betrifft den LULUCF-Sektor, kann aber auch zu THG-Minderungen im Sektor Landwirtschaft führen. Die Maßnahme Erhöhung der Energieeffizienz führt zu Minderungswirkungen im Bereich der energiebedingten Emissionen des Landwirtschaftssektors, welche nach der Zuordnung des Klimaschutzplans 2050 ebenfalls zum Sektor Landwirtschaft zählen.

Die Maßnahmen im Landwirtschaftssektor beruhen zum Großteil auf einer Fortführung und Weiterentwicklung bestehender Instrumente wie z.B. der Düngeverordnung, des EEG zur Förderung der Güllevergärung oder den Ausbau des Öko-Landbaus über die EU-Agrarpolitik. Allerdings ist die konkrete Maßnahmenausgestaltung teilweise noch unklar. Beispielsweise lag zum Zeitpunkt der Maßnahmenbewertung noch keine abschließende Fassung der neuen Düngeverordnung vor. In diesem Fall werden die Zielerfüllung und eine ambitionierte Maßnahmenumsetzung vorausgesetzt. Ein anderes Beispiel betrifft die geplante Maßnahme zur Verringerung der Emissionen in der Tierhaltung. Angesichts einer fehlenden Konkretisierung dieser Maßnahme ist hier eine konservative Schätzung bezüglich der Maßnahmenwirkung gewählt worden.

Die Ausgestaltung des Klimaschutzprogramm 2030-Szenarios sowie die Annahmen für die Wirkungsabschätzung der einzelnen Maßnahmen und Teilmaßnahmen werden in der folgenden Tabelle beschrieben.

8.5.1 Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen und gezielte Verminderung der Lachgasemissionen Verbesserung der Stickstoffeffizienz

Umsetzung und Vollzug der DüV-2017 sowie weitere Verschärfung der Düngeverordnung

Die Wirkungen der Düngeverordnung sind nicht konkret abschätzbar gewesen, da auf Grund der Nachforderungen der EU Kommission zum Zeitpunkt der Bearbeitung kein aktueller Entwurf vorlag. Die Abschätzungen beziehen sich daher auf das mit der Maßnahme angestrebte Ziel der Nachhaltigkeitsstrategie, welches in der Maßnahme konkret erwähnt wird, die Stickstoffüber-

schüsse von derzeit ca. 98 kg N/ha (Mittelwert der Gesamtbilanz 2015-2017) auf 70 kg N zu senken.¹⁰⁶ Es wird angenommen, dass sich der Einsatz des Harnstoffdüngers analog zum Rückgang des gesamten Mineraldüngers entwickelt, damit sinken auch die CO₂-Emissionen aus dem Harnstoffdüngereinsatz.

Evaluierung und Weiterentwicklung der Stoffstrombilanzverordnung

Die zukünftige Ausgestaltung der Stoffstrombilanzverordnung ist unklar, ihre Evaluierung wurde 2020 eingeleitet. Es werden der Verordnung daher keine zusätzlichen Minderungswirkungen gegenüber dem Referenzszenario zugeschrieben. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Weiterentwicklung und Verschärfung der Stoffstrombilanzverordnung zur Erreichung des Ziels (Reduktion auf 70 kg N Überschuss) ein entscheidender Schritt sind.

Senkung der Ammoniakemissionen

Die im Klimaschutzprogramm 2030 festgeschriebenen Punkte zur Reduktion Ammoniakemissionen gehen nicht über die Erfordernisse zur Umsetzung der NEC-Richtlinie hinaus und sind bereits im Referenzszenario berücksichtigt. Daher werden dieser Maßnahme keine zusätzlichen Minderungswirkungen ggü. dem Referenzszenario zugeschrieben.

Gezielte Verringerung von Lachgasemissionen aus Böden

Zur Umsetzung von Maßnahmen zur gezielten Reduktion von N₂O-Emissionen bestehen Unsicherheiten (z.B. langfristige Minderungswirkungen von N₂O-Inhibitoren) weshalb keine weiteren Emissionsminderungen berücksichtigt werden.

Erhöhung des Anteils gasdicht gelagerter Gülle aus der Rinder- und Schweinehaltung auf 70 Prozent

Die Wirkungen einer Gülleabdeckung in Bezug auf Stickstoffemissionen werden teilweise bereits in der Teilmaßnahme Senkung der Ammoniakemissionen im Referenzszenario berücksichtigt und sind weiterhin in der Maßnahme zur Wirtschaftsdüngervergärung enthalten. Die weitere Ausgestaltung der Maßnahme bleibt unklar, da bisher keine zusätzlichen Programme ausgearbeitet sind und keine Finanzierung zur Verfügung steht. Eine Verschärfung des bestehenden Ordnungsrechts ist laut Maßnahmenbeschreibung nicht vorgesehen. Aus der bisherigen Maßnahmenformulierung ist daher keine zusätzliche Minderungswirkung ableitbar.

8.5.2 Energetische Nutzung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und landwirtschaftlicher Reststoffe in Biogasanlagen

Förderung der Wirtschaftsdüngervergärung in Biogasanlagen

Hier bestehen vor allem noch größere Unklarheiten bezüglich der Ausgestaltung der Förderinstrumente für Alt- und Neuanlagen. Für die Maßnahmenbewertung wird trotzdem davon ausgegangen, dass es möglich ist, bis 2030 eine Quote von 40 % der anfallenden Wirtschaftsdünger zu vergären¹⁰⁷. Damit muss eine Erschließungsrate stattfinden, die etwa der Ausbaurate für Biogas zwischen 2009 und 2012 entspricht.

Schaffung von gasdichten Gärrestlagern

Es wird davon ausgegangen, dass die Gärrestlager sämtlicher bestehenden und neu geschaffenen Gülle-Biogasanlagen bis 2030 gasdicht abgeschlossen werden. Die Minderungswirkungen

¹⁰⁶ Dieses methodische Vorgehen wird auch in der Folgenabschätzung des Thünen-Institut angewandt (Osterburg 2019)

¹⁰⁷ Analog zum Vorgehen in der Deutschen THG-Berichterstattung werden hierzu verschiedene Lagerungsoptionen für Wirtschaftsdünger unterschieden, denen jeweils ein spezifischer Emissionsfaktor zugeordnet ist. Die Massenströme werden dann gemäß der Szenarioannahmen auf diese Lagerungsformen aufgeteilt und mit den Emissionsfaktoren multipliziert

wurden im Modell auf Basis der Methodik des Thünen-Instituts zur Erstellung des Treibhausgasberichts berechnet (Haenel et al. 2018).

8.5.3 Ausweitung der ökologisch bewirtschafteten Fläche

Ausbau der Förderung, Förderung der Vermarktung und Forschung für den ökologischen Landbau

Für die Ausgestaltung der Maßnahme wird die aktuelle Ausbaurate der Jahre 2015 - 2018 fortgeschrieben, das entspricht einem Zuwachs von 118.000 ha pro Jahr. Bis zum Jahr 2030 werden ggü. 2018 zusätzlich 1,42 Mio. ha auf Ökolandbau umgestellt. Das entspricht einem Anteil von 18 % an der derzeitigen landwirtschaftlichen Nutzfläche. Je nach Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche bis zum Jahr 2030 kann dieser Anteil bei einer Verringerung nach aktuellem Trend der Fläche einem Anteil von 20 % an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche entsprechen.

Die Maßnahme berücksichtigt die Minderungswirkung der Reduktion der Lachgasemissionen durch den Verzicht des Mineraldüngereinsatz (durchschnittlicher Mineraldüngereinsatz auf Nicht-Ökolandbauflächen) auf den zusätzlichen Ökolandbauflächen. Zusätzlich werden die Minderungswirkungen durch die Reduktion der CO₂-Emissionen aus dem Harnstoffeinsatz berücksichtigt, als auch die Minderungswirkung durch eine Reduktion der Erntereste infolge geringerer Erträge im Ökolandbau.

Es bestehen Überschneidungen zu den Maßnahmen zur Verringerung des Stickstoffüberschusses. Je geringer das Düngungsniveau in der konventionellen Bewirtschaftung vor Umstellung liegt, desto geringer fällt der Emissionsminderungsbeitrag durch die Umstellung aus. Diese Überschneidungswirkung ist aus der Stickstoffmaßnahme herausgerechnet worden.

8.5.4 Verringerung der Treibhausgasemissionen in der Tierhaltung

Forschung und Züchtung

Hier werden keine weiteren konkreten Schritte genannt, die sich quantifizieren lassen. Aus der bisherigen Maßnahmenformulierung ist daher keine zusätzliche Minderungswirkung ableitbar.

Kombination von Tierwohl und Umwelt- bzw. Klimaschutzaspekten

Die Ausgestaltung konkreter Einzelmaßnahmen steht hier erst noch aus. Bis 2021 soll eine Gesamtstrategie zur Verringerung der Emissionen aus der Tierhaltung erarbeitet werden. Außerdem wird die Überarbeitung verschiedener Förderrichtlinien genannt. Es können daher keine konkreten Einzelmaßnahmen auf ihre THG-Minderungswirkung abgeschätzt werden.

Angesichts ohnehin sinkender Tierbestände und dem laufenden Prozess der Tierwohl-Initiative des BMEL kann aber davon ausgegangen werden, dass ein Minimum an Emissionsminderungen in diesem Bereich realisiert wird. Für die Berechnung wird konkret davon ausgegangen, dass der Schweinebestand bis 2030 gegenüber dem Referenzszenario um ca. 1,8 Mio. Tiere (-13,1 % ggü. 2016; 8,1 % ggü. 2030 Referenzszenario) verringert werden kann. D.h. marktbedingte Nachfrage-rückgänge werden durch die vermehrte Umsetzung von Tierwohlforderungen in einen dauerhaft geringeren Schweinebestand übersetzt. Für Kühe und Rinder wird keine Minderung gegenüber dem Referenzszenario angenommen. Zwar sinken auch hier die Tierzahlen, doch der Verbrauch an Milchprodukten und Rindfleisch stagniert, zudem sieht das Klimaschutzprogramm 2030 keine verbindliche Ausweitung des Tierwohl-labels auf Wiederkäuer vor.

8.5.5 Schutz von Moorböden

Verbesserung der Rahmenbedingungen für den Moorbodenschutz

Durch die Vernässung der Flächen auf organischen Böden und eine andere Nutzung kann der Düngeeintrag reduziert und auch der aerobe Prozess der Mineralisierung und Nitratbildung reduziert oder gestoppt und damit die N₂O-Emissionen verringert werden. Diese Reduktion wird im Landwirtschaftssektor berichtet. Die N₂O-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutzung drainierter organischer Böden lagen im Jahr 2016 bei einer Fläche von 1,2 Mio. ha bei 2,8 Mio. t CO₂e (Bach et al. 2016; UBA 2018c). Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 wird in Anlehnung an die Berechnungen des LULUCF-Sektors von einer Vernässung von 108.108¹⁰⁸ ha ggü. dem Referenzszenario ausgegangen. Es wird angenommen, dass entsprechend der Verteilung von org. Ackerland und org. Grünland an der Gesamtfläche der organischen Böden von den 108.108 ha 30 % Ackerland und 70 % Grünland wiedervernässt werden.

Für die Abschätzung der Minderungswirkung bestehen große Unsicherheiten. Neben dem Flächenumfang ist entscheidend, ob Ackerland oder Grünland umgewandelt wird. Der N₂O Emissionsfaktor für einen Hektar Ackerland auf organischen Böden beträgt 10,7 kg N₂O-N je Hektar und Jahr, der für Grünland liegt bei 2,3 kg N₂O-N je Hektar und Jahr.

8.5.6 Erhöhung der Energieeffizienz in der Landwirtschaft

Senkung der THG-Emissionen aus der stationären Nutzung

Eine Abschätzung der gesamten Minderungswirkungen in diesem Bereich ist schwierig, da die Datenbasis sehr vage und die Statistiken nicht konsistent sind. Neben dem Wärmeverbrauch von Gewächshäusern, Stallheizungen, Trocknungen scheint ein Großteil des Wärmeverbrauchs aus landwirtschaftlichen Wohnhäusern zu stammen.

Folgende Annahmen werden den Berechnungen zu Grunde gelegt:

- ▶ Gewächshäuser: ermittelter Durchdringungsgrad für die Umrüstung mit Doppelverglasung und Energieschirmen von Gewächshäusern: 37,5 %; Minderungen des Wärmeverbrauchs der Gewächshäuser durch Sanierung: 70 %
- ▶ Trocknung: Durchdringungsgrad: 40 %, Effizienzsteigerung 30 %
- ▶ Tierhaltung (Stallheizung, Milchkühlung etc.): Durchdringungsgrad 40 %, Effizienzsteigerung 30 %
- ▶ Sonstiges: Übertragung durchschnittlicher Einsparungen aus anderen Maßnahmen – wahrscheinlich handelt es sich hierbei überwiegend um landwirtschaftliche Wohngebäude. Doch gibt es diesbezüglich keine Verbrauchsstatistik, so dass auf Basis dieser Annahme entsprechende Übertragungen gewählt wurden.
- ▶ Methanschlupf: Es wird angenommen, dass durch eine regelmäßige Wartung und verbesserte Steuerung der Biogasanlagen die Methanemissionen um bis zu 30 % vermieden werden können.

Die Einführung des CO₂-Preises im Gebäudesektor wirkt unterstützend.

¹⁰⁸ Hier bestehen teilweise Abweichungen zu den konkret ausgewiesenen Flächen im LULUCF-Sektor, da die dort berichteten organischen Grünlandflächen höher sind als die im Inventar im Landwirtschaftsbereich berichteten organischen Grünlandflächen.

Senkung der THG-Emissionen aus der mobilen Nutzung

In der Innenwirtschaft wird der Dieseleinsatz durch eine Umstellung der mobilen Maschinen auf elektrische Antriebe reduziert, es wird ein Durchdringungsgrad von 20 % angenommen.

In der Außenwirtschaft wird für schwere Landmaschinen eine Reduktion des Treibstoffeinsatzes von 5 % unterstellt. Diese basiert auf unterschiedlichen Maßnahmen u.a. einer Zunahme konservierender Bodenbearbeitung, Precision farming und energieeffizientes Fahren. Die Einführung des CO₂-Preises im Verkehrssektor wirkt unterstützend.

8.6 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Basierend auf den oben genannten Annahmen werden die Projektionen für die Jahre 2025, 2030 und 2035 abgeleitet. Tabelle 102 zeigt die projizierte Entwicklung der Aktivitätsdaten zum Tierbestand für die Jahre 2016, 2025, 2030 und 2035. Aufgrund der Einführung des Tierwohllabels und der verstärkten Ausrichtung von Fördermaßnahmen auf Tierwohl, sinken die Schweinebestände durch die Umsetzung der Maßnahme ggü. dem Referenzszenario. Die anderen Tierbestände folgen der Entwicklung des Referenzszenarios.

Tabelle 102: Entwicklung der Tierbestände 2016-2035

	2016	2025	2030	2035
	Anzahl in 1.000 Tiere bzw. 1.000 Stallplätze			
Milchkühe	4.218	4.256	4.240	4.240
Andere Rinder	8.249	8.077	7.917	7.917
Schweine	22.761	20.428	19.912	19.912

Quelle: (Haenel et al. 2018), Berechnungen des Öko-Instituts

Der Stickstoffeinsatz sinkt auf Grund der Umsetzung der Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffüberschüsse und zur Ausweitung des Ökolandbaus. Gegenüber dem Referenzszenario sinken vor allem die Mineraldüngereinsätze. Die Erntereste steigen infolge der geringeren Erträge im Ökolandbau ggü. dem Referenzszenario langsamer an. Die Wirtschaftsdüngerausbringung steigt ggü. 2016 auf Grund einer leichten Zunahme der Milchkühe und einer Erhöhung des Leistungsniveaus der Milchkühe. Gegenüber dem Referenzszenario sinkt die N-Ausbringung auf Grund der Reduktion des Schweinebestandes geringfügig.

Tabelle 103: Entwicklung ausgewählter Aktivitätsdaten für landwirtschaftliche Böden in kt N/Jahr

	2016	2025	2030	2035
Mineraldüngereinsatz	1.711	1.240	1.090	1.090
Wirtschaftsdüngerausbringung	986	1.008	1.002	1.002
Ernterückstände	588	658	667	674

Anmerkung: Wirtschaftsdünger aus tierischen Ausscheidungen ohne Gärreste aus pflanzlichen Gärsubstraten.

Quelle: (Haenel et al. 2018), Berechnungen des Öko-Instituts

Durch die Umsetzung aller Maßnahmen sinken die Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 auf 64,1 Mio. t CO₂e (Tabelle 104). Gegenüber dem Ziel des Bundes-Klimaschutzgesetzes von 58 Mio. t CO₂e verbleibt also eine Lücke von gut 6 Mio. t CO₂e.

Emissionsminderungen ggü. dem Referenzszenario werden im Bereich der landwirtschaftlichen Böden durch eine Reduktion der Stickstoffüberschüsse auf 70 kg N/ha nach der Gesamtbilanz erreicht. Weitere Einsparungen werden durch den Ausbau des Ökolandbaus erzielt. Haupttreiber sind eine Verringerung des Mineraldüngereinsatzes und eine Reduktion der indirekten Emissionen durch eine Verbesserung der Düngemittelausbringung. Ebenso führt der Rückgang des Harnstoffeinsatzes in Folge des reduzierten Mineraldüngereinsatzes zu einem Rückgang der Treibhausgasemissionen. Wesentliche Emissionsreduktionen im Bereich des Wirtschaftsdünger-managements erfolgen durch die Ausweitung der Güllevergärung und gasdichte Gärrestlager. Durch eine leichte Reduktion des Schweinebestandes infolge der angedachten verbesserten Hal-tungsbedingungen aus Tierwohlaspekten nehmen die Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-management weiter ab.

Weitere Minderungen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 erfolgen im Bereich der energiebedingten Emissionen durch die Verbesserung der Energieeffizienz und des Brennstoffwechsels bzw. des Wechsels auf regenerative Energien. Diese werden durch die Nationale Klimaschutz Initiative (Richtlinie Gartenbau und Landwirtschaft) sowie durch das Bundesprogramm zur Stei-gerung der Energieeffizienz in der Landwirtschaft und im Gartenbau (BEELG) erzeugt. Gleichzei-tig können für landwirtschaftliche Wohnhäuser auch alternative Förderprogramme (z.B. KfW) in Anspruch genommen werden.

Die Emissionen aus den restlichen Kategorien wie z.B. zur Kalkung bleiben im Projektionszeit-raum auf dem Niveau des Referenzszenarios.

Tabelle 104: Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Verbrennung von Brennstoffen	10,6	5,9	6,1	6,6	6,4	6,2	5,8	5,7
Fermentation bei der Verdauung	34,7	24,9	24,7	24,5	24,8	24,7	24,6	24,6
Wirtschaftsdünger-Management	13,2	10,9	10,3	9,9	10,0	8,6	7,5	7,5
Landwirtschaftliche Böden	28,4	24,8	24,3	26,4	24,4	23,7	22,7	22,4
Kalkung	2,2	1,4	1,5	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Harnstoffanwendung	0,5	0,6	0,6	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5
Andere kohlenstoffhaltige Dünger	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Anderes	0,0	0,3	1,1	1,6	1,5	1,4	1,4	1,4
Gesamt	90,0	69,2	68,7	71,8	69,6	67,1	64,1	64,0
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz					70,0	64,0	58,0	
Abweichung vom Sektorziel*					-0,4	3,1	6,1	

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

Die Schließung der Lücke durch weitere Maßnahmen wird neben der weiteren Ausnutzung des technischen Minderungspotenzials (Güllevergärung, weitere Reduktion der Stickstoffüberschüsse, weitere Steigerung der Energieeffizienz) zu großen Teilen über eine Reduktion der Tierbestände erfolgen müssen. Allerdings sollte parallel dazu die Nachfrage nach tierischen Produkten entsprechend verringert werden, um keine Leckage-Effekte zu erzeugen. Eine Verringerung der Tierbestände ist nur in Kombination mit Verhaltensänderungen auf der Verbraucherseite sinnvoll. Durch die Erarbeitung eines Masterplans zur Ernährung unter Berücksichtigung der Klimaziele für das Jahr 2050 wird ein paralleler Prozess auf der Ernährungsseite angesprochen.

8.6.1 Ergebnisse Einzelinstrumente

In der folgenden Tabelle 105 werden die Minderungswirkungen der einzelnen Maßnahmen ggü. dem Referenzszenario ausgewiesen. Für viele der Maßnahmen ist bereits ein Großteil der Minderungswirkung im Referenzszenario berücksichtigt.

Tabelle 105: Minderungsbeitrag der Einzelinstrumente (Übersicht) ggü. dem Referenzszenario (REF)

Instrumentenbündel	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e		
Senkung der Stickstoffüberschüsse und -emissionen einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen und gezielte Verminderung von Lachgasemissionen	0,02	0,5	0,5
Energetische Nutzung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und landwirtschaftlicher Reststoffe in Biogasanlagen	0,6	1,6	1,6
Ausweitung der ökologisch bewirtschafteten Fläche	0,53	0,9	0,9
Emissionsminderung in der Tierhaltung	0,2	0,3	0,3
Erhöhung der Energieeffizienz	0,3	0,6	0,6
Schutz von Moorböden	0,04	0,2	0,2
Gesamt-minderungswirkung		4,1	4,2

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

8.6.2 Einordnung der aktuellen Entwicklung

Nach aktuellen Abschätzungen des Umweltbundesamtes 2020 (UBA 2020b) sanken die Emissionen des Sektors Landwirtschaft im Jahr 2019 auf 68,2 Mio. t CO₂e. Damit liegen die Emissionen bereits 3,6 Mio. t CO₂e unter dem Jahr 2016. Gründe hierfür sind vor allem ein starker Rückgang des Mineraldüngereinsatzes um 22 % ggü. dem Mittelwert der Jahre 2015-2017 und ein Rückgang der Tierbestände. Die Minderungswirkungen des Mineraldüngerrückgangs sind im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 bereits berücksichtigt. Bleiben die Mineraldüngereinsätze auf dem derzeitigen Niveau ist ein erheblicher Teil der erforderlichen Minderungen bereits erfolgt. Allerdings sind in diesem Bereich Schwankungen zu erwarten, da die geringen Mineraldüngereinsätze vor allem eine Folge der Dürre in den Jahren 2018 und 2019 waren.

Die derzeit erzielten Minderungswirkungen durch den Rückgang der Tierbestände sind im Szenario Klimaschutzprogramm zu einem großen Teil bisher nicht berücksichtigt. Dies liegt daran, dass die Maßnahme zur Verringerung der Emissionen aus der Tierhaltung in der derzeitigen Ausgestaltung nicht zu einer relevanten THG-Minderung beiträgt, da eine Reduktion der Tierbestände in dieser Maßnahme nicht explizit erwähnt wird. Die aktuelle Verringerung der Tierbestände geht auf Marktveränderungen bzw. steigenden Kostendruck zurück und erscheint aus heutiger Sicht als reversibel. Bleiben die Tierbestände auch langfristig auf dem Niveau des Jahres 2019, wäre eine zusätzliche Minderungswirkung in Höhe von ca. 1,5 Mio. t CO₂e.¹⁰⁹ ggü. 2016 bereits erreicht. Dies gilt es u.a. im Rahmen des Monitorings der Maßnahmen weiter zu beobachten.

8.6.3 Einordnung der Unsicherheiten

8.6.3.1 Unsicherheiten bzgl. der politischen Umsetzung von Instrumenten

- Reduktion der Stickstoffüberschüsse: Wesentliche Treiber sind die Ausgestaltung der Düngerverordnung (DüV) und der Stoffstrombilanzverordnung sowie die Umsetzung der NEC-

¹⁰⁹ Eigene Abschätzungen Öko-Institut

Richtlinie. Auf Grund der bestehenden Unsicherheiten wurde bei der Modellierung eine Zielerfüllung angenommen. Hier bestehen in der Tat Unsicherheiten, ob die künftige Ausgestaltung von DüV und die Maßnahmen im Rahmen der NEC-Richtlinie ausreichen werden, um das Ziel zu erfüllen.

- ▶ **Ökolandbau:** Die Entwicklung der Vergangenheit hat deutlich gezeigt, dass die Umstellungsrate extremen Schwankungen unterliegt, die ihren Ursprung in wechselnden Förderbedingungen und Marktschwankungen hat. Um die Flächenzuwächse abzusichern und zu verstetigen, werden zusätzliche Mittel für flächenbezogene Förderprämien in Höhe von über 400 Mio. € p. a. benötigt, auch über das Jahr 2030 hinaus. Die langfristige Bereitstellung dieser Mittel sowohl auf EU-Ebene als auch die nationale Kofinanzierung durch die Bundesländer sind mit Risiko behaftet. Auf der Nachfrageseite muss sichergestellt werden, dass die Ökoproducte in ausreichender Menge und zu adäquaten Preisen abgesetzt werden können. Mit zunehmendem Marktanteil der Ökolandwirtschaft wird dies eine weitere Herausforderung, und es bedarf zusätzlich entsprechender Instrumente für die Nachfrage (z.B. Bildung/Verbraucherinformation im Sinne einer Qualitätsoffensive) und die gesamte Handels- und Verarbeitungskette.
- ▶ **Wirtschaftsdüngervergärung:** Eine Erhöhung der Wirtschaftsdüngervergärung auf 40 % des anfallenden Wirtschaftsdüngers ist sehr ambitioniert und setzt hohe Zubauraten für Biogasanlagen voraus. Angesichts der bestehenden Unsicherheiten zur Zukunft der Tierhaltung ist die Investitionsbereitschaft der Landwirte begrenzt. Auch sind offene Fragen zum Weiterbetrieb von bestehenden Biogasanlagen nach Auslaufen der EEG-Förderung derzeit noch nicht abschließend geklärt. Inwieweit die geplanten Bundesmittel ausreichen, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht bewertet werden, da noch ungeklärt ist, wie die Fördergelder direkt verwendet werden sollen und in welcher Höhe eine parallele Einspeisevergütung über das EEG stattfindet.
- ▶ **Reduktion der Emissionen aus der Tierhaltung:** Hier bestehen große Unsicherheiten in Bezug auf die zukünftige Entwicklung der Tierbestände. Die aktuellen Zahlen für das Jahr 2019 zeigen bereits einen rückläufigen Tierbestand. Allerdings ist unklar wie sich dieser Trend entwickeln wird. Die Verschärfung der bestehenden Regularien zur DüV etc. erhöht den Druck auf die Tierhaltung. Allerdings wächst die Nachfrage auf dem Weltmarkt (Schweinepest in China, neue Handelsabkommen Japan, Vietnam etc.). Eine erste Einschätzung zur zukünftigen Entwicklung der Tierhaltung kann auf Basis der Agrarökonomischen Baseline des Thünen Instituts erfolgen (voraussichtlich April 2020). Der Maßnahme selbst wird in der bisherigen Ausgestaltung keine große Minderungswirkung unterstellt.

8.6.3.2 Unsicherheiten bei der Modellierung

Unsicherheiten bei der Modellierung bestehen in vielen Bereichen. Im Bereich der Stickstoffüberschüsse wurde mit einer durchschnittlichen Reduktion pro Hektar gerechnet. In Regionen mit hohen Tierbestandsdichten kann die erforderliche Reduktion der Stickstoffüberschüsse allerdings wesentlich höher ausfallen und deshalb auch eine stärkere Wirkung entfalten.

Die Minderungswirkung des Ökolandbaus hängt vor allem von der Intensität der Bewirtschaftung der umstellenden Betriebe ab. Stellen intensiv wirtschaftende Betriebe um, fällt die Minderungswirkung höher aus, als bei bereits extensiv wirtschaftenden Betrieben, auch hier wurde ein Durchschnittswert pro Hektar angenommen.

Im Bereich der energiebedingten Emissionen bestehen große Unsicherheiten in Bezug auf die Datenlage. Ein Großteil der Emissionen aus dem stationären Bereich konnte nicht direkt einer landwirtschaftlichen Nutzung (Gewächshäuser, Stall, Trocknung) zugeordnet werden. Zudem passen statistische Daten zum Brennstoffeinsatz in Gewächshäusern nicht zu Daten des Inventars. Damit bestehen auch Unsicherheiten in Bezug auf die Minderungswirkungen. Zwei Drittel der Emissionen stammen allerdings aus dem landwirtschaftlichen Verkehr mit relativ guter Datenlage.

8.7 Vergleich der Szenarien

Wesentliche Emissionsreduktionen werden im Landwirtschaftssektor bereits im Referenzszenario erzielt. Ggü. 2016 sinken die Emissionen bereits um 4 Mio. t CO₂e. bis zum Jahr 2030. Diese stammen überwiegend aus dem Bereich der Lachgasemissionen aus Böden und lassen sich u.a. auf eine ambitionierte Umsetzung der Düngeverordnung und der Zielerreichung der NEC-Richtlinie zurückführen. Wesentliche Emissionsreduktionen werden damit in diesem Bereich schon im Referenzszenario erzielt. Die folgende Tabelle enthält einen Überblick, über die ermittelten Maßnahmenwirkungen im Referenzszenario und im Klimaschutzprogramm 2030 Szenario.

Tabelle 106: Minderungsbeitrag der Maßnahmen in den beiden Szenarien

Maßnahmen	Maßnahmenwirkung im Referenzszenario ggü. 2016	Maßnahmenwirkung im Klimaschutzprogramm 2030 ggü. Referenzszenario	Gesamtminderungswirkung Referenzszenario + Klimaschutzprogramm 2030 ggü. 2016
Mio. t CO ₂ e			
Reduktion der Stickstoffüberschüsse	3,3	0,5	3,8
Ausweitung des Ökolandbaus	0,4	0,9	1,3
Steigerung der Güllevergärung	0,8	1,6	2,4
Emissionsminderung Tiere	-	0,3	0,3
Steigerung Energieeffizienz	0,2	0,6	0,8
Moorbodenschutz	0,1	0,2	0,3

Quelle: (Bundesregierung 2019d) für das Referenzszenario, Öko-Institut für das Klimaschutzszenario 2030

Auf Grund der Entwicklungen des Referenzszenarios ist die ausgewiesene Maßnahmenwirkung höher als die Differenz der Emissionen in Tabelle 104. Während die Maßnahmenwirkung bei 8,9 Mio. t CO₂e liegt, sinken die Emissionen zwischen 2016 und 2030 um 7,7 Mio. t CO₂e. Dies liegt

an der Entwicklung anderer Treiber im Referenzszenario. Dort steigen die Emissionen ggü. 2016 vor allem durch eine Erhöhung der Erntereste in Folge höherer Erträge, aber auch durch einen Anstieg der Milchleistung.

8.8 Gesamtergebnisse Landwirtschaft

Für den Sektor Landwirtschaft wird bereits im vorherigen Kapitel dargestellt, wie in den Szenarien die Parameter und Annahmen verändert werden und inwiefern dadurch der Wirkungsbeitrag der einzelnen Maßnahmen reagiert. Aus diesem Grund wird daher auf eine weitere Gesamtdarstellung im Rahmen dieses Kapitels verzichtet.

8.8.1 Vergleich der Szenarien

Gegenüber dem Jahr 2016 sinken die Emissionen aller Gase (CO₂, CH₄ und N₂O) in beiden Szenarien bis zum Jahr 2030. Die Minderung der CH₄-Emissionen lässt sich in beiden Szenarien auf die Ausweitung der Güllevergärung zurückführen. Im Referenzszenario beträgt der Anteil der Güllevergärung 30 %, während die Güllevergärung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 auf 40 % ausgeweitet wird. Gleichzeitig werden Güllelager gasdicht abgedeckt. Bei den N₂O-Emissionen werden bereits im Referenzszenario wesentliche Minderungen über die Umsetzung der NEC Richtlinie und eine ambitionierte Ausgestaltung der Düngeverordnung erreicht. Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sinken die N₂O-Emissionen aus den landwirtschaftlichen Böden durch eine Reduktion der Stickstoffüberschüsse auf 70 kg N/ha nach der Gesamtbilanz und eine Ausweitung des Ökolandbaus weiter gesenkt werden. Die CO₂-Emissionen sinken ebenfalls in beiden Szenarien. Im Bereich der landwirtschaftlichen Emissionen wird die Reduktion überwiegend durch eine Reduktion der Harnstoffdüngung erreicht. Ein wesentlicher Teil der CO₂-Minderung erfolgt allerdings bei den energiebedingten Emissionen der Landwirtschaft. Hier erfolgen die Emissionsminderungen durch eine Ausweitung der Energieeffizienz und eine Umstellung auf regenerative Energien. In der Summe sinken die Gesamtemissionen des Landwirtschaftssektors bis zum Jahr 2030 im Referenzszenario auf 67,8 Mio. t CO₂e und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 auf 64,1 Mio. t CO₂e (siehe Tabelle 107).

Tabelle 107: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen im Sektor Landwirtschaft zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
CO₂-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	13,5	8,1	8,2	8,9				
REF					8,6	8,5	8,5	8,4
KSPr (Jan 2020)					8,5	8,2	7,8	7,7
CH₄-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	43,0	32,1	32,0	32,4				
REF					32,6	31,8	31,7	31,7
KSPr (Jan 2020)					32,6	31,3	30,2	30,2

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
N₂O-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	33,5	28,9	28,5	30,6				
REF					28,5	28,1	27,7	27,7
KSP _r (Jan 2020)					28,5	27,6	26,1	26,1
Summe CO₂+CH₄+N₂O								
Entwicklung 1990 – 2016	90,0	69,2	68,7	71,8				
REF					69,7	68,4	67,8	67,8
KSP _r (Jan 2020)					69,6	67,1	64,1	64,0
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 1990 in %							
Entwicklung 1990 – 2016		-23,1	-23,6	-20,2				
REF					-22,5	-23,9	-24,6	-24,7
KSP _r (Jan 2020)					-22,6	-25,4	-28,7	-28,9
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 2005 in %							
Entwicklung 2005 – 2016			-0,7	3,8				
REF					0,8	-1,1	-1,9	-2,0
KSP _r (Jan 2020)					0,6	-3,0	-7,3	-7,5

Quelle: (UBA 2018b, 2018c), (Bundesregierung 2019d), Modellrechnungen Öko-Institut

9 Projektionen Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges

9.1 Methodik

Die Methodik sowie die Annahmen und Parameter zum Referenzszenario wurden größtenteils aus den Berechnungen zum Projektionsbericht 2019 (Bundesregierung 2019d) übernommen.

Die Methodik zur Berücksichtigung der THG-Minderungswirkung der Deponiebelüftung wurde verbessert und die Daten aktualisiert.

Basierend auf dem vom IPCC entwickelten und vom Öko-Institut erweiterten Multi-Phasen-Abfallmodell (Emissionen der Deponierung, Quellgruppe 5.A) werden die statistischen Daten der Emissionsberichterstattung 2018 als Rahmendaten eingesetzt (UBA 2018a). Die Methanemissionen aus Deponien in Deutschland resultieren aus:

- ▶ den in den Deponien noch verbliebenen Resten abbaubarer Bestandteile unvorbehandelter Abfälle, die vor 2005 und ausnahmsweise z.T. auch nach 2005 deponiert wurden sowie
- ▶ der heutigen Ablagerung von vorbehandelten Abfällen, insbesondere aus der mechanischen biologischen Restabfallbehandlung (MBA).

Für die Deponierung von vorbehandelten Abfällen wurde angenommen, dass diese bezogen auf die Menge je Einwohner unverändert bleiben, in der Summe demzufolge entsprechend der Entwicklung der Einwohnerzahl bis 2020 leicht ansteigen und danach bis 2035 wieder etwas zurückgehen (siehe Abbildung 4). Das Multi-Phasen-Abfallmodell berücksichtigt die einzelnen Abfallfraktionen, so dass über deren unterschiedlichen Halbwertszeiten die Emissionen berechnet und anschließend summiert werden. Das kinetische Modell zur Emissionsberechnung aus der Abfalldeponierung bildet neben der Ausgasung der deponierten organischen Materialien über die Zeit auch die Erfassung von Deponiegas ab¹¹⁰.

Die Berechnung der Minderungswirkung der Deponiebelüftung erfolgt nach einer derzeit ermittelten Methodik der Ingenieurgruppe RUK GmbH für das UBA zur Berechnung der aeroben In-Situ Stabilisierung von Deponien. In der Modellierung werden die ausgewiesenen Emissionsreduktionen aus den Daten des Ptj¹¹¹ zur THG-Minderung aus der Deponiebelüftung anteilig auf die Entwicklung des Anteils des Degradable Organic Carbons (DOC_m) des Abfallmodells berechnet. Damit wird auch die Zusammensetzung der Gase (ca. 50 % Methan, 50 % CO_2) berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt wie der Projektionsbericht 2019 auf Basis der Inventarsubmission 2018 (Inventarjahr 1990-2016).

Für die Emissionen aus den Anlagen der Bioabfallbehandlung (5.B) werden die in Kompostierungs- (5.B.1) und Vergärungsanlagen (5.B.2) eingesetzten Mengen mit den jeweiligen Emissionsfaktoren (Cuhls et al. 2015a; Umweltbundesamt (UBA) 2016a; UBA 2018a; Cuhls et al. 2015b; Cuhls et al. 2015a) für Methan und Lachgas verknüpft. Bis zum Jahr 2030 wird mit einer Steigerung des Bioabfallaufkommens infolge der Vorgaben zur getrennten Bioabfallerfassung gerechnet.

Für die Unterquellgruppen kommunale und industrielle Abwasserbehandlung (5.D) und andere (5.E) werden die einwohnerspezifischen Daten aus dem Inventarbericht 2018 unverändert fortgeschrieben.

¹¹⁰ Für nähere Details zum Modell vgl. UBA 2018a.

¹¹¹ Aufstellung des Projektträgers Jülich zu den im Rahmen der Initiative „Investive Klimaschutzmaßnahmen - Klimaschutz bei stillgelegten Siedlungsabfalldeponien“ bewilligten Deponiebelüftungsprojekten in den Jahren 2013 bis 2018.

9.2 Annahmen und Parameter Referenzszenario

Für die Beschreibung der Instrumente sowie der verwendeten Annahmen und Parameter im Referenzszenario sei auf das MMS des Projektionsberichts 2019 verwiesen (Bundesregierung 2019d). Es wurden im Referenzszenario (REF) des vorliegenden Berichts nur an wenigen Stellen Änderungen vorgenommen, die im Folgenden beschrieben werden.

Gegenüber dem Projektionsbericht 2019 erfolgte im Referenzszenario eine Anpassung der Berechnungsgrundlage für die Berücksichtigung der Emissionsminderung aus der Deponiebelüftung. Damit reduziert sich die ausgewiesene Minderungswirkung dieser Maßnahme ggü. dem Projektionsbericht 2019. Die folgende Tabelle 108 zeigt die neu berechnete Minderungswirkung der Maßnahme zur Minderung der Deponiebelüftung an.

Tabelle 108: Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen im Abfallsektor

	2025	2030	2035
	Mio.t CO ₂ e		
Deponiebelüftung	0,09	0,11	0,09

Quelle : Berechnungen des Öko-Instituts

9.3 Ergebnisse Referenzszenario

Der Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges umfasst die Abfalldponierung, Bioabfallbehandlung sowie die Abwasserbehandlung. Die Müllverbrennung zur Stromgewinnung wird in der Energiewirtschaft (öffentliche Kraftwerke) bzw. Industrie (Industriekraftwerke) bilanziert.

Der Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges wird von Methanemissionen aus der Abfalldponierung dominiert (Tabelle 109). Die starke Reduktion der Methanemissionen aus dem Abfallsektor im Referenzszenario ist auf eine verminderte Deponierung organischer Abfälle ab dem Jahr 2005 aufgrund des Deponierungsverbots zurückzuführen. Zusätzlich werden Maßnahmen zur Deponiebelüftung durchgeführt.

Die biologische Abfallbehandlung wurde im Jahr 1990 kaum praktiziert, entwickelt sich aber seitdem immer weiter. Die CH₄-Emissionen aus der Kompostierung und der Abfallvergärung steigen im Referenzszenario bis 2025 durch eine Erhöhung der Abfallbehandlungsmengen und steigende Bevölkerungszahlen weiter an und sinken danach bis 2035 wieder geringfügig ab durch eine Verbesserung der Behandlungs- und Lagerungsprozesse und sinkende Bevölkerungszahlen.

Im Abwasserbereich sind die CH₄-Emissionen vor allem zwischen 1990 und 2005 durch eine verbesserte Abwasserbehandlung wie z.B. der Anschluss der Haushalte an die öffentliche Kanalisation gesunken. Nach 2016 bleiben die CH₄-Emissionen aus der Abwasserbehandlung im Referenzszenario nahezu konstant.

Tabelle 109: Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstiges im Referenzszenario (REF), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Abfalldeponierung	34,3	19,1	12,6	8,4	6,5	4,6	3,7	2,9
Bioabfallbehandlung	0,0	0,7	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Abwasserbehandlung	4,1	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Andere Bereiche	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gesamt	38,4	21,2	14,6	10,5	8,7	7,0	5,8	5,0
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz					9,0	7,0	5,0	
Abweichung vom Sektorziel*					-0,3	0	0,8	

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

9.4 Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Im Maßnahmenprogramm werden zwei Maßnahmen ausgewiesen, die zu Minderungswirkungen im Abfallsektor führen.

Durch das Förderprogramm zur Ausweitung der Deponiebelüftung und der Optimierung der Gaserfassung soll die aerobe Stabilisierung verstärkt in großen Deponien erfolgen. Zusätzlich wird im Rahmen der Kommunalrichtlinie die optimierte Sammlung der Gase auf Deponien gefördert, wodurch eine Verbesserung der bestehenden Gaserfassung um mindestens 25 % erreicht werden soll. Nach einer bereits bestehende Selbstverpflichtung der Deponiebetreiber sollen durch diese Maßnahmen bis 2027 mindestens 1 Mio. t CO₂e jährlich eingespart werden.

Der Berechnung dieser Maßnahme liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- ▶ Die Berechnung der Deponiebelüftung erfolgt nach einer derzeit ermittelten Methodik der Ingenieurgruppe RUK GmbH für das UBA zur Berechnung der aeroben In-Situ-Stabilisierung von Deponien. Die Berechnung erfolgt auf Basis des Abfallmodells, welches die ermittelten Einsparungen durch die Deponiebelüftung prozentual auf die Gesamtergebnisse umlegt. Es wird angenommen, dass ab dem Jahr 2021 bis zum Jahr 2029 sieben Projekte jährlich mit durchschnittlichen jährlichen Minderungswirkungen von 50.000 t CO₂e/Deponie gestartet werden.
- ▶ Zusätzlich wird die Förderung der optimierten Gaserfassung in sieben Projekten jährlich (Minderungspotenzial pro Jahr ca. 0,025 Mio. t CO₂e/Projekt) berücksichtigt.

Als sektorübergreifende Maßnahme wird im Maßnahmenprogramm die Reduktion der Lebensmittelabfälle genannt. Während der THG-Minderungseffekt dieser Maßnahme in anderen Sektoren schwer zu quantifizieren ist, wirkt diese Maßnahme direkt auf die Emissionen des Abfallsektors. Der Berechnung dieser Maßnahme liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- ▶ Nach einer aktuellen Studie des Thünen-Instituts wird von durchschnittlichen Lebensmittelverlusten von 75 kg/Einwohner in den Haushalten ausgegangen (Schmidt et al. 2019). Hinzu

kommen ca. 20 kg Lebensmittelverluste pro Einwohner aus der Außer-Hausverpflegung. Eine Reduktion um 50 % bis zum Jahr 2030 würde insgesamt zu einer Reduktion um 47 kg/Einwohner führen. Allerdings ist unsicher, ob die bestehenden Instrumente (Informationskampagnen, Dokumentation etc.) ausreichen, um diese Verhaltensänderung herbeizuführen. Daher wird für das Jahr 2030 mit einer 50 % Zielerreichung gerechnet (d.h. eine Reduktion der Lebensmittelabfälle um 24 kg/Einwohner). Für die Berechnung wird daher das Bioabfallaufkommen bis zum Jahr 2030 linear pro Einwohner um 24 kg reduziert. Es wird angenommen, dass die komplette Reduktion in der Kategorie 5.B (Biologische Abfallbehandlung) erfolgt.

9.5 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

9.5.1 Gesamtergebnisse

Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sinken die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 auf 4,9 Mio. t CO₂e. Damit wird das Ziel des Klimaschutzplans von 5 Mio. t CO₂e im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges erreicht (Tabelle 110).

Durch die Umsetzung der Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 können weitere Emissionsreduktionen ggü. dem Referenzszenario erreicht werden.

Wesentliche Treiber für die weitere Reduktion der Emissionen im Bereich der Abfalldeponierung gegenüber dem Referenzszenario sind die Ausweitung der Deponiebelüftung auf große Deponien und die Optimierung der Gaserfassung.

Im Bereich der biologischen Abfallbehandlung sinken die Emissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 geringfügig, durch eine Reduktion der Lebensmittelabfälle bis zum Jahr 2030.

Das Klimaschutzprogramm 2030 enthält keine Maßnahme im Bereich der Abwasserbehandlung, daher bleiben die Emissionen dieser Quellgruppe auf dem Niveau des Referenzszenarios.

Tabelle 110: Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstiges im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

Kategorie	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
Abfalldeponierung	34,3	19,1	12,6	8,4	6,5	4,6	2,9	1,8
Bioabfallbehandlung	0,0	0,7	0,8	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9
Abwasserbehandlung	4,1	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Andere Bereiche	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gesamt	38,4	21,2	14,6	10,5	8,6	6,6	4,9	3,8
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz					9,0	7,0	5,0	
Abweichung vom Sektorziel*					-0,4	-0,4	-0,1	

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

9.5.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Für die Bewertung der Einzelmaßnahmen im Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020) wird die Wirkung der Einzelmaßnahmen des Programms gegenüber der Entwicklung des Referenzszenarios abgeschätzt. Diese Abschätzung erfolgt auf Basis der oben dargestellten Annahmen. Nachfolgende Tabelle 111 gibt einen Überblick über die Minderungswirkung der Einzelmaßnahmen.

Tabelle 111: Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen im Abfallsektor

Maßnahme	2025	2030	2035
	Mio.t CO ₂ e		
Förderprogramm zur Ausweitung der Deponiebelüftung und Optimierung der Gaserfassung	0,3	0,8	1,07
Vermeidung von Lebensmittelabfällen	0,08	0,11	0,11
Summe der Einzelmaßnahmen	0,37	0,92	1,18

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

9.5.3 Einordnung der Unsicherheiten

Unsicherheiten bzgl. der Umsetzung

Im Bereich der Deponiebelüftung läuft bereits die erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen seit 2013. Allerdings wurden bisher überwiegend kleine Deponien mit begrenztem Reduktionspotenzial adressiert. Für die Erreichung des Klimaziels sollen nun verstärkt Einzelprojekte mit einem größeren Reduktionspotenzial durchgeführt werden. Diese müssen identifiziert werden und es müssen entsprechende Spezialfirmen zur Verfügung stehen.

Große Unsicherheiten bezüglich der Umsetzbarkeit bestehen bei der Maßnahme Vermeidung von Lebensmittelabfällen. Da ein Großteil der Abfälle vor allem in den privaten Haushalten besteht, ist die Steuerbarkeit begrenzt und es kommen überwiegend weiche Maßnahmen wie z.B. Informationskampagnen zum Einsatz.

Unsicherheiten durch die Modellierung

Der Projektträger Jülich (PtJ) gibt jährlich Informationen zu den im Rahmen der Initiative „Investive Klimaschutzmaßnahmen - Klimaschutz bei stillgelegten Siedlungsabfalldeponien“ bewilligten Deponiebelüftungsprojekten zu Zuwendungsempfängern und Deponien, die gefördert werden (sollen), geplante Einsparung an CO₂e, Zieljahr der THG-Einsparung, Beginn und Ende der Laufzeit, Vorhabenssumme und Fördersumme heraus. Daten zu den jährlichen Emissionen der projektierten Deponien oder Deponieabschnitten und Daten zu dem betroffenen Ablagerungsvolumen und -alter liegen nicht vor. Deshalb sind konkrete Berechnungen der erreichbaren Einsparungen an Klimagasemissionen schwierig. In der Modellierung auf Basis des Abfallmodells werden die ausgewiesenen Emissionsreduktionen aus den Daten des PtJ zur THG-Minderung aus der Deponiebelüftung anteilig auf die Entwicklung des Anteils des Degradable Organic Carbons (DOC_m) im Abfallmodell berechnet. Damit wird auch die Zusammensetzung der Gase (ca. 50 % Methan, 50 % CO₂) berücksichtigt und es erfolgt eine Verzögerung durch die kinetische Betrachtung des Abfallmodells. Dadurch kann es zu Abweichung zwischen den Daten des PtJ und den Ergebnissen des Abfallmodells kommen.

In Deutschland laufen derzeit Untersuchungen zur Gasformation aus Deponien. Erste Ergebnisse legen nahe, dass die bisher ausgewiesenen Methanemissionen aus Deponien überschätzt werden. Sollte sich das bestätigen, würde sich die berichteten Emissionen aus den Deponien, aber auch die Minderungswirkung der Deponiebelüftungsmaßnahmen ändern.

9.6 Vergleich der Szenarien

Wesentliche Emissionsreduktionen werden bereits im Referenzszenario im Bereich der Abfalldeponierung erzielt. Ggü. 2016 sinken die Emissionen bereits um 4,7 Mio. t CO₂e. bis zum Jahr 2030. Dies lässt sich auf die Verringerung der Deponierung von organischen Abfällen ab dem Jahr 2005 aufgrund des Deponierungsverbots zurückführen. Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sinken die Emissionen durch umfassende Deponiebelüftungsmaßnahmen aus der Abfalldeponierung weiter. Auch im Referenzszenario wurden bereits Maßnahmen zur Deponiebelüftung berücksichtigt, allerdings in sehr viel geringerem Umfang, da überwiegend kleine Deponien belüftet wurden. Weitere Emissionsreduktionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 werden durch eine Verringerung der Lebensmittelabfälle erzielt, die im Referenzszenario noch nicht berücksichtigt wurden. Gegenüber dem Referenzszenario können so weitere 0,92 Mio. t CO₂e. bis zum Jahr 2030 eingespart werden.

Tabelle 112: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen des Sektors Abfallwirtschaft zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
CH₄-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	36,9	20,3	13,8	9,6				
REF					7,8	6,2	5,0	4,1
KSPr (Jan 2020)					7,8	5,8	4,1	3,0
N₂O-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	1,4	0,9	0,8	0,8				
REF					0,8	0,8	0,8	0,8
KSPr (Jan 2020)					0,8	0,8	0,8	0,8
Summe CH₄+N₂O								
Entwicklung 1990 – 2016	38,4	21,2	14,6	10,5				
REF					8,7	7,0	5,8	5,0
KSPr (Jan 2020)					8,6	6,6	4,9	3,8
Summe CH₄+N₂O	Veränderung ab 1990 in %							

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
Entwicklung 1990 – 2016		-44,8	-61,9	-72,7				
REF					-77,4	-81,8	-84,9	-87,1
KSPr (Jan 2020)					-77,6	-82,7	-87,3	-90,2
Summe CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 2005 in %							
Entwicklung 2005 – 2016			-31,0	-50,5				
REF					-59,1	-67,0	-72,6	-76,6
KSPr (Jan 2020)					-59,4	-68,7	-77,0	-82,2

Quelle: (UBA 2018b, 2018c), Modellrechnungen Öko-Institut

10 Projektionen Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)

„In der Quellgruppe LULUCF (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) traten im Jahr 2016 im Saldo über alle Landnutzungen Netto-Kohlenstofffestlegungen in Höhe von ca. 14,5 [Mio. t CO₂e] auf. [Damit war der LULUCF-Sektor eine Senke.] In den Kategorien Ackernutzung, Grünlandnutzung, Siedlungen und Feuchtgebiete entstanden Netto-Emissionen in Höhe von zusammen 45,5 [Mio. t CO₂e]. Der größte Teil stammt aus der Entwässerung organischer Böden zur landwirtschaftlichen Nutzung. Emissionen entstehen aber auch aus Siedlungsflächen auf Moorböden, aus dem Torfabbau und aus der Umwandlung von Grünland in Ackerland. Innerhalb dieser Flächennutzungen wird in geringem Umfang auch Kohlenstoff festgelegt, z. B. durch Umwandlung von Ackerland in Grünland und den Aufwuchs von Gehölzen auf Acker- und Grünlandflächen. In Wäldern und Holzprodukten [wurden im Jahr 2016 zusammen 60 Mio. t CO₂e] pro Jahr an Kohlenstoffvorräten aufgebaut (in Wäldern 57,7 [Mio. t], in Holzprodukten 2,3 [Mio. t]). Maßnahmen im LULUCF-Sektor adressieren [den Erhalt von Dauergrünland, den Schutz von Moorböden auf landwirtschaftlichen Flächen auf organischen Böden (Moorstandorte) einschließlich der Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten] und den Erhalt von Wald als Senke. Darüber hinaus ist in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie [sowie im Klimaschutzplan] das Ziel festgelegt, den Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche (Flächenverbrauch) bis 2020 auf 30 ha pro Tag zu reduzieren (Bundesregierung 2016)“ (Bundesregierung 2019d, S. 92).

Für den LULUCF-Sektor wird im Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung kein THG-Minderungsziel für das Jahr 2030 festgelegt. Derzeit ist der Sektor eine Nettosenke. Das Ziel des Klimaschutzplans 2050 ist es, mit weiteren Maßnahmen im Jahr 2030 die Nettosenke zu sichern (BMU 2016).

Die Methodik, Annahmen, Parameter und Ergebnisse des Referenzszenarios wurden unverändert aus den Berechnungen zum Projektionsbericht 2019 (Bundesregierung 2019c) übernommen (siehe Abschnitte 10.1 und 10.2).

10.1 Methodik und Annahmen und Parameter Referenzszenario

Der folgende Text wurde dem Projektionsbericht 2019 entnommen:

„Für die Aktivitätsdaten (im Wesentlichen Landflächen, differenziert nach Nutzung) in der Berichterstattungskategorie LULUCF werden nach 2016 die Veränderungen der Submission 2018 fortgeschrieben. Das heißt, dass die Flächengrößen für die Landnutzungsänderungen von 2016 auch in derselben Größenordnung für die Folgejahre angenommen werden. Ausnahmen sind die festgelegten Maßnahmen, die [unten] beschrieben sind. Daraus ergeben sich die entsprechenden Flächen für die Verbleibkategorien (Remaining).

Die Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung (Modell WEHAM) beruht auf den Daten der [Bundeswaldinventur] (BWI) 2002, 2008 und 2012.

In der Landnutzungskategorie Wald werden die Emissionsfaktoren für den organischen und mineralischen Boden sowie der Streu über das Jahr 2016 hinaus linear fortgeschrieben. Für den Pool Totholz wird ab dem Jahr 2017 ein mittlerer Emissionsfaktor der Jahre 2006 bis 2015 angewendet. Durch die periodische Ermittlung der Totholzvorratsveränderung durch die Bundeswaldinventuren spiegelt der Mittelwert von 10 Jahren eine realistische Entwicklung wider. Mit der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung (WEHAM) wird ab 2017 die Entwicklung der Biomassevorräte im Wald ermittelt. WEHAM schätzt die Entwicklung des Waldes und das Rohholzpotenzial

für die nächsten vier Jahrzehnte als ein Szenario gemäß den Erfahrungen der letzten Jahre und Erwartungen an die kommenden Jahre. Weitere Informationen zu WEHAM finden sich unter (Thünen 2012) und (BMEL 2016).

Für die anderen Landnutzungskategorien Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete und Siedlungen werden die Zeitreihen der Emissionsfaktoren ab dem Jahr 2017 linear fortgeschrieben. Dies erfolgt für die Pools organische und mineralische Böden, Biomasse und Tote organische Substanz.

Die Angaben der historischen Emissionen/Einbindungen für die Jahre 1990, 2005, 2010 und 2016 beziehen sich auf die Submission 2018“ (Bundesregierung 2019d, S. 188f).

„a) Begrenzung der Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke bis 2030 auf unter 30 Hektar pro Tag.

b) Die Grünlanderhaltung im Rahmen der Greening-Auflagen der GAP wird in Deutschland besonders anspruchsvoll umgesetzt. Nach der bis zum Jahr 2020 geltenden Regelung müssen Betriebe, die Direktzahlungen erhalten und den Greening-Auflagen unterliegen, vor einer Umwandlung von Dauergrünland in Ackerland eine behördliche Autorisierung einholen und darüber hinaus eine gleich große Ersatzfläche nachweisen, auf der neues Dauergrünland etabliert werden muss. Die Erhaltung des Dauergrünlands wird zudem durch neue Regelungen einer Reihe von Bundesländern unterstützt. Wie die Flächennutzungsstatistik zeigt, ist der Rückgang der Dauergrünlandfläche nach 2010 zum Erliegen gekommen. Für die Zeit nach 2020 wird angenommen, dass die Grünlanderhaltung über die Geltung der aktuellen EU-Agrarpolitik hinaus bis zum Jahr 2035 fortgesetzt wird.

c) In Bezug auf Waldbewirtschaftung und den Holzproduktespeicher wird auf Basis der aktuellen, am Thünen-Institut vorliegenden Daten und Berechnungen analysiert, inwieweit Wald und Holzprodukte in Deutschland weiterhin eine Kohlenstoffsénke bleiben. Es wird angenommen, dass sich die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Waldnutzung nicht ändern. Dabei wird entsprechend der durch IPCC (2013) beschriebenen Methodik unterstellt, dass sich die Nutzungsstruktur bei den Holzprodukten nicht ändert.

d) Der Schutz von Moorböden ist eine weitere Maßnahme im Aktionsprogramm Klimaschutz 2020. Alle moorreichen Länder haben Moorschutzprogramme aufgestellt und fördern Moorschutzprojekte mit Finanzierungen aus dem Europäischen Landwirtschaftsfond für die Entwicklung des ländlichen Raumes (ELER) und aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), z.T. untersetzt mit konkreten flächenbezogenen Zielen. Die Umsetzung von Moorschutzprojekten durch die Länder wird daher als Maßnahme des [Referenzszenarios] abgebildet. Die Abschätzung der Wirkungen erfolgt auf Basis einer Fortschreibung der in der aktuellen Finanzierungsperiode für den Moorschutz verfügbaren Budgets und der Kosten und Flächenumfänge bereits umgesetzter Projekte. Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2030 16.000 ha Acker auf Moorböden zu Grünland umgewandelt werden, 53.700 ha Grünland vernässt werden (Umwandlung in Feuchtgebiet), und 17.900 ha entwässerte Feuchtgebietsflächen vernässt werden“ (Bundesregierung 2019d, S. 92f).

10.2 Ergebnisse Referenzszenario

Im Referenzszenario „reduziert sich die Senkenwirkung der Wälder durch veränderte Holznutzung und Verschiebung des Altersklassenverhältnisses von ursprünglich ca. 75 Mio. t CO₂e im Jahr 1990 auf ein Minimum von ca. 11 Mio. t CO₂e im Jahr 2020 und steigt anschließend wieder etwas an. Basierend auf den oben genannten Annahmen werden die Projektionen für die Jahre ab 2016 abgeleitet. Die Tabelle 113 zeigt die historische und projizierte Entwicklung der Aktivitätsdaten und Tabelle 114 die Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors für die Jahre 1990-2035.

Der LULUCF-Bereich entwickelt sich im Zeitraum zwischen 2016 und 2020 von einer Senke in eine Quelle für Treibhausgase. Die projizierte Vorratsentwicklung im Wald mit dem Modell WEHAM führt zu einer Abnahme der Senkenleistung des Waldes, die die Emissionen der anderen Landnutzungen nicht mehr kompensieren kann. Für das Modell WEHAM werden die Daten aus dem WEHAM-Basisszenario verwendet, die die momentan üblichen waldbaulichen Zielsetzungen aufgrund der Erfahrung der letzten Jahre und den Erwartungen an die kommenden Jahre abbilden. Ebenfalls wird in WEHAM die sich verändernde Altersstruktur des Waldes berücksichtigt. Diese führt zu einer Abnahme der Zuwächse im Wald und damit, im Zusammenhang mit der Holznutzung, zu einer Verringerung der Senke. Die Emissionen aus Ackerland gehen aufgrund der Annahme, dass es ab dem Jahr 2016 zu keinen relevanten Umwandlungen von Grünland in Ackerland mehr kommt, bis 2035 deutlich zurück. Die durch die modellierte Vorratsveränderung im Wald veränderten THG-Emissionen übertreffen alle maßnahmenbedingten Änderungen in den anderen Sektoren im Referenzszenario (Tabelle 114). Die Ergebnisse des Referenzszenarios „unterteilt nach den einzelnen Treibhausgasen sind in Tabelle 115 bis Tabelle 117 dargestellt“ (Bundesregierung 2019d, 188f).

Tabelle 113: Entwicklung der Aktivitätsdaten des LULUCF-Sektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	1.000 ha							
Wald	10.929	11.109	11.131	11.168	11.195	11.235	11.282	11.332
Ackerland	13.633	13.275	13.431	13.490	13.303	13.097	12.929	12.790
Grünland	7.345	7.149	6.785	6.439	6.457	6.477	6.517	6.585
Feuchtgebiete	710	712	724	731	735	768	801	807
Siedlungen	3.081	3.504	3.686	3.932	4.070	4.183	4.233	4.248
Sonstiges	82	30	22	20	19	19	18	18
Σ LULUCF*	35.780	35.780	35.780	35.780	35.780	35.780	35.780	35.780

* Anmerkung: Gesamte Landfläche in Deutschland.

Quelle: Übernommen aus (Bundesregierung 2019d, Tabelle 81)

Tabelle 114: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	kt CO ₂ e							
Wald	-75.256	-40.693	-57.983	-57.667	-11.652	-33.525	-22.002	-21.382
Ackerland	12.945	12.450	14.323	15.182	14.219	13.487	11.818	10.618
Grünland	26.225	24.869	23.879	22.612	22.648	22.146	21.535	21.427
Feuchtgebiete	4.127	4.234	4.074	4.086	4.151	4.501	5.059	5.351

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
Siedlungen	1.978	2.124	3.403	3.636	3.842	3.869	3.656	3.428
Holzprodukte	-1.330	-15.044	-4.066	-2.328	-3.680	782	-1.076	-659
Σ LULUCF	-31.312	-12.060	-16.369	-14.479	29.528	11.261	18.990	18.784

Quelle: Übernommen aus (Bundesregierung 2019d, Tabelle 82)

Tabelle 115: Entwicklung der CO₂-Emissionen des LULUCF-Sektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	kt CO ₂							
Wald	-75.542,1	-40.909,6	-58.175,5	-57.839,6	-11.817,9	-33.693,6	-22.173,5	-21.551,0
Ackerland	12.436,4	11.982,8	13.768,5	14.576,6	13.680,5	12.986,4	11.460,7	10.376,8
Grünland	25.543,6	24.202,1	23.244,9	21.997,0	22.033,9	21.544,4	20.944,3	20.836,9
Feuchtgebiete	4.064,0	4.172,5	4.009,8	4.019,9	4.083,8	4.357,5	4.840,9	5.131,7
Siedlungen	1.810,7	1.921,9	3.173,1	3.370,3	3.557,6	3.583,6	3.390,0	3.186,5
Holzprodukte	-1.330,4	-15.043,6	-4.066,0	-2.328,4	-3.680,5	782,0	-1.075,5	-658,7
Σ LULUCF	-33.017,8	-13.673,9	-18.045,3	-16.204,1	27.857,5	9.560,3	17.386,8	17.322,2

Quelle: Übernommen aus (Bundesregierung 2019d, Tabelle 83)

Tabelle 116: Entwicklung der CH₄-Emissionen des LULUCF-Sektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	kt CH ₄							
Wald	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
Ackerland	7,8	8,2	9,4	9,9	9,7	9,3	8,9	8,8
Grünland	23,8	22,8	21,4	20,4	20,2	19,6	19,1	18,9
Feuchtgebiete	1,7	1,6	1,7	1,7	1,8	4,6	7,4	7,5
Siedlungen	1,0	1,3	1,5	1,8	1,9	2,1	2,1	2,2
Holzprodukte								
Σ LULUCF	35,0	34,6	34,7	34,6	34,5	36,5	38,5	38,3

Quelle: Übernommen aus (Bundesregierung 2019d, Tabelle 84)

Tabelle 117: Entwicklung der N₂O-Emissionen des LULUCF-Sektors im Referenzszenario (REF), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	kt N ₂ O							
Wald	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ackerland	1,0	0,9	1,1	1,2	1,0	0,9	0,4	0,1
Grünland	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Feuchtgebiete	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Siedlungen	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6
Holzprodukte								
Σ LULUCF	2,8	2,5	2,7	2,9	2,7	2,6	2,2	1,7

Quelle: Übernommen aus (Bundesregierung 2019d, Tabelle 85)

10.3 Methodik, Annahmen und Parameter Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 werden im LULUCF-Sektor vier Maßnahmen umgesetzt. Diese werden im Folgenden beschrieben, eine Bewertungsmethode entwickelt und Annahmen dargestellt.

10.3.1 Humuserhalt und -aufbau im Ackerland

Die Maßnahme „**Humuserhalt und -aufbau im Ackerland**“ (kurz: Humusaufbau) soll durch die folgenden Aktivitäten umgesetzt werden (Bundesregierung 2019c):

- ▶ *Förderung von Fruchtfolgevorgaben für die Humusmehrung sowie für eine humuserhaltende Bewirtschaftung in Betrieben, die bereits nachhaltigen Humusaufbau betrieben haben und einen hohen Humusanteil auf ihren Flächen erreicht haben und diesen mindestens beibehalten;*
- ▶ *Ausbau der Förderung zur Anlage von Gehölzstreifen, Feldgehölzen, Hecken, Knicks und Alleen, z. B. mit Obstbäumen, vor allem an Feldrändern, sowie von Agroforstsystemen;*
- ▶ *Freiwillige Zertifizierung im Rahmen betrieblicher Audits von humusmehrenden Bewirtschaftungsmaßnahmen und entsprechende Förderung: Für die Durchführung der Maßnahme und die Einhaltung bestimmter Auflagen erhalten Landwirte, die sich zu einer dauerhaften humuserhaltenden Bewirtschaftung verpflichten, jährlich eine Basiszahlung, die eine Anreiz-komponente enthält;*
- ▶ *Entwicklung von Beratungswerkzeugen für die landwirtschaftliche Praxis zur schlaggenauen Bestimmung der Bodenkohlenstoffgehalte.*

Im Rahmen des Gutachterprozesses zur Unterstützung der Entwicklung dieser Maßnahme wurde unter Mitarbeit des Thünen-Instituts und des Öko-Instituts eingeschätzt, dass mit einem Fördervolumen von 75 Mio. € eine THG-Minderung von 1,0 – 2,0 Mio. t CO₂e im Jahr erreicht

werden kann (Mittelwert: 1,5 Mio. t CO₂e/a). Dies entspricht einer THG-Minderung von 20.000 t CO₂e/Mio. €. Diese Einschätzung basiert auf einer Sichtung der Literatur und Experteneinschätzungen der beiden genannten Institute.

Für die Berechnung der THG-Minderung wurden interne Angaben des BMEL zur Mittelbereitstellung für die Jahre 2021 bis 2023 mit den im vorherigen Absatz genannten Werten in Relation gesetzt, um die THG-Minderung zu ermitteln. Der Wert für das Jahr 2023 wurde für 2024 bis 2030 fortgeschrieben.

Zur Darstellung der Ergebnisse wird die mit dieser Maßnahme erreichte THG-Minderung von den im Referenzszenario ausgewiesenen THG-Emissionen für Ackerland abgezogen.

10.3.2 Erhalt von Dauergrünland

Die Maßnahme „**Erhalt von Dauergrünland**“ umfasst folgende zentrale Aktivitäten (Bundesregierung 2019c):

- ▶ *Der Erhalt von Dauergrünland ist eine wichtige Klimaschutzmaßnahme, die im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) gefördert wird. Regelungen zum Grünlanderhalt sollen fortgeführt und eine Grünlandstrategie zur Sicherung und Stärkung einer dauerhaften Grünlandnutzung entwickelt werden.*
- ▶ *Es ist sehr wahrscheinlich, dass das BMEL erreicht, dass im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik nach 2020 auch zukünftig Regelungen für den Erhalt von Dauergrünland beibehalten werden (GLÖZ-Standard).*

Der Erhalt von Dauergrünland wird bereits vollständig im Referenzszenario berücksichtigt.¹¹²

Im Wirtschaftsplan des Energie- und Klimafonds sind keine Mittel für diese Maßnahme eingestellt. Es wird erwartet, dass eine Finanzierung vollständig über Mittel aus Finanztöpfen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) erreicht wird.

Diese Maßnahme wird nicht modelliert, sondern es werden die Ergebnisse des Referenzszenarios übernommen.

10.3.3 Schutz von Moorböden einschließlich Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten

Die Maßnahme „**Schutz von Moorböden einschließlich Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten**“ (kurz: Moorbodenschutz) soll mit den folgenden Aktivitäten umgesetzt werden (Bundesregierung 2019c):

Zum Moorbodenschutz:

- ▶ *Anpassungen bestehender rechtlicher und förderrechtlicher Rahmenbedingungen mit dem Ziel, einen möglichst effektiven Moorbodenschutz zu gewährleisten;*
- ▶ *Eintreten für den im aktuellen GAP-Vorschlag vorgesehenen GLÖZ-Standard zu einem angemessenen Schutz von Feuchtgebieten und Torfflächen einschließlich einer ambitionierten Ausgestaltung;*

¹¹² Das Referenzszenario erreicht gegenüber dem Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS) des Projektionsberichts 2019 eine THG-Minderung von 2,6 Mio. t CO₂e im Jahr 2030.

- ▶ *Schaffung neuer förderrechtlicher Instrumente, einschließlich der dafür notwendigen Finanzierung für Programme zur dauerhaften Wiedervernässung von Moorböden;*
- ▶ *Intensivierung von Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen.*

Bundesprogramm Torfminderung zur Reduzierung des Torfeinsatzes:

- ▶ *Schaffung eines Zuschusses zu einer Ausfallversicherung begrenzt auf 10 Jahre zur Abfederung des Umstellungsrisikos;*
- ▶ *Etablierung förderrechtlicher Instrumente für den Anbau von Torfersatzstoffen als Ergänzung der unter "Moorbodenschutz" genannten Maßnahmen;*
- ▶ *Stärkung der Versuchstätigkeit zur Pflanzeneignung;*
- ▶ *Intensivierung der Forschung zu Ersatzstoffen;*
- ▶ *Schaffung von Beratungsmöglichkeiten für Betriebe;*
- ▶ *Information der Öffentlichkeit über Alternativen zu torfhaltigen Blumenerden;*
- ▶ *Schulung spezieller Verwendungskreise.*

Im Hinblick auf den Moorbodenschutz zeigt sich auf Basis der Sichtung der Literatur und Diskussionen im Gutachterprozess, dass mit THG-Minderungskosten von 27-107 €/t CO₂e gerechnet werden kann (Drösler et al. 2012). Für die Bewertung dieser Maßnahme wird von mittleren THG-Minderungskosten von 67 €/t CO₂e ausgegangen. Interne Angaben des BMEL zur Mittelbereitstellung für die Jahre 2021 bis 2023 wurden bis 2030 fortgeschrieben. Die Summe der Mittel über diesen Zeitraum wurde mit mittleren THG-Minderungskosten von 67 €/t CO₂e in Relation gesetzt und so für den Zeitraum von 10 Jahren eine kumulierte THG-Minderung von 8,36 Mio. t CO₂e berechnet. Die Wiedervernässung von Moorböden mindert die THG-Emissionen im Jahr der Vernässung und in den Folgejahren. Mit zunehmender Fläche an vernässten Moorböden steigt daher die THG-Minderung kontinuierlich an. Die kumulierte THG-Minderung wird entlang dieses kumulativen Effekts auf die 10 Jahre verteilt und bis zum Jahr 2035 fortgeschrieben. Es wird angenommen, dass 50 % der THG-Minderung durch Vollvernässung und 50 % durch Teilvernässung von Grünlandflächen auf Moorböden erreicht wird. In Anlehnung an Reichelt (2015) entspricht eine Vollvernässung einer THG-Minderung von 23 t CO₂e/ha („mäßig feuchtes Moorgrünland“ zu „sehr feuchtem Moorgrünland mit „shunt“-Arten“¹¹³) und eine Teilvernässung einer THG-Minderung von 12 t CO₂e/ha („mäßig feuchtes Moorgrünland“ zu „feuchtem Moorgrünland“). Auf Basis der THG-Minderung werden die benötigten Flächen für den Moorbodenschutz berechnet.

Die Aktivitäten zur Reduzierung des Torfeinsatzes bewirken voraussichtlich keine Änderung der Flächennutzung für den Torfabbau innerhalb von Deutschland, die über das Referenzszenario hinaus geht. Vielmehr ist mit einem Rückgang bzw. einer Vermeidung von Torfimporten zu rechnen, die im Ausland zu THG-Minderungen führen. Aufgrund dieser methodischen Situation wird dieser Aspekt in der Modellierung nicht berücksichtigt und die geplanten Mittel in dieser Maßnahme vollständig dem Moorbodenschutz zugerechnet.

¹¹³ Shunt Arten sind Arten, die zu einer erhöhten Methanemission führen (z.B. *Juncus effusus*, *Phragmites australis*). Dies Arten können die via Aerenchym Methan aus tieferen anoxischen Bodenschichten in die Atmosphäre transportieren können.

Zur Darstellung der Ergebnisse wird die mit dieser Maßnahme erreichte THG-Minderung von den im Referenzszenario ausgewiesenen THG-Emissionen für Grünland abgezogen.

10.3.4 Erhalt und nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder und Holzverwendung

Die Maßnahme „**Erhalt und nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder und Holzverwendung**“ (kurz: Waldbewirtschaftung) setzt für die Umsetzung auf folgende Aktivitäten (Bundesregierung 2019c):

- ▶ *Verstärkte Förderung von Maßnahmen zur Entwicklung von klimatoleranten Mischwäldern (unter Einschluss klimawirksamer Vertragsnaturschutz-Maßnahmen wie z.B. Maßnahmen zur Verbesserung des Kohlenstoff-Speichers im Wald oder des Struktureichtums des Waldes) über die Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK). Unter Beachtung ökologischer und von Klimawirksamkeits-Belangen zielt dies auf*
 - *Wiederbewaldung der Schadflächen (180.000 Hektar, Stand September 2019) und*
 - *Verstärkte Anpassung der Wälder an den Klimawandel;*
- ▶ *Flankierende Maßnahmen (z.B. optimiertes Monitoring, optimiertes Wildtiermanagement, verstärkte internationale Zusammenarbeit in der Sicherstellung von nachhaltiger Waldbewirtschaftung weltweit und Stärkung des Holzkompetenzzentrums zur Vermeidung von Verlagerungseffekten, verstärkte Waldbauforschung);*
- ▶ *Verstärkte Förderung von F&E-Vorhaben, Fach- und Verbraucherinformation, Ideenwettbewerben, Modell-/Demonstrationsvorhaben mit dem Ziel einer*
 - *klimafreundlichen und innovativen Holzverwendung insbesondere im Bereich des Bauens mit Holz, sowie für die stoffliche Verwendung von Laubholz, der Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung*
 - *Förderung von klimabewusstem Verbraucherverhalten.*

Diese Maßnahme zur Waldbewirtschaftung ist derart ausgestaltet, dass die THG-Senkenleistung der Wälder in Deutschland so erhalten bleibt, wie sie bei Fortsetzen der aktuellen Bewirtschaftung erreicht würde. Dies ist im Referenzszenario bereits abgebildet.

Der Aspekt „klimawirksame Vertragsnaturschutz-Maßnahmen wie z.B. Maßnahmen zur Verbesserung des Kohlenstoff-Speichers im Wald“ bietet die Möglichkeit, den Kohlenstoffvorrat im Wald und damit die Senkenleistung zu erhöhen. Der Text der Maßnahme ist aber zu unkonkret, um hierzu eine Berechnung bzw. Modellierung durchzuführen.

Die zusätzliche Verwendung von Holz als langlebige Holzprodukte hat das Potenzial, die CO₂-Senke im Holzspeicher zu erhöhen. Es fehlen aber in der Maßnahmenbeschreibung Angaben zum Umfang einer zusätzlichen Nutzung langlebiger Holzprodukte.

Mit den Angaben in der Maßnahme ist davon auszugehen, dass es zu keiner zusätzlichen Senkenleistung auf Waldflächen und in Holzprodukten kommt. Zur Darstellung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 wird die CO₂-Senkenleistung aus dem Referenzszenario übernommen.

10.4 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

10.4.1 Gesamtergebnisse

Durch die beschriebenen Maßnahmen verändert sich die Flächenkulisse von Grünland und Ackerland nicht gegenüber dem Referenzszenario (Tabelle 118). Innerhalb der Kategorie Grünland ist aber festzuhalten, dass ein Teil der Grünlandflächen auf Moorböden einer feuchteren Nutzung zugeführt werden (neues feuchtes Moorgrünland: 30.610 ha bis 2025, 68.880 ha bis 2030, 107.140 ha bis 2035; sehr feuchtes Moorgrünland (mit „shunt“-Arten): 15.970 ha bis 2025, 35.930 ha bis 2030, 55.900 ha bis 2035; eigene Berechnungen).

Die Treibhausgasemissionen für Acker- und Grünland nehmen durch die Maßnahmen zum Humusaufbau und zum Moorbodenschutz leicht ab. Im Jahr 2030 liegen die THG-Emissionen für Ackerland bei 10,8 Mio. t CO₂e und für Grünland bei 19,9 Mio. t CO₂e. So stellen sich für den LULUCF-Sektor im Jahr 2030 in Summe THG-Emissionen von 16,3 Mio. t CO₂ (Tabelle 119) ein. Damit bleibt der Sektor trotz der Maßnahmen eine Nettoquelle.

In Tabelle 120 bis Tabelle 122 sind für das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 die detaillierten Emissionen für die Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O zusammengestellt.

Tabelle 118: Entwicklung der Aktivitätsdaten des LULUCF-Sektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	1.000 ha							
Wald	10.929	11.109	11.131	11.168	11.195	11.235	11.282	11.332
Ackerland	13.633	13.275	13.431	13.490	13.303	13.097	12.929	12.790
Grünland	7.345	7.149	6.785	6.439	6.457	6.477	6.517	6.585
Feuchtgebiete	710	712	724	731	735	768	801	807
Siedlungen	3.081	3.504	3.686	3.932	4.070	4.183	4.233	4.248
Sonstiges	82	30	22	20	19	19	18	18
Σ LULUCF*	35.780	35.780	35.780	35.780	35.780	35.780	35.780	35.780

* Anmerkung: Gesamte Landfläche in Deutschland.

Quelle: Übernommen aus (Bundesregierung 2019d, Tabelle 81)

Tabelle 119: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	kt CO ₂ e							
Wald	-75.256	-40.693	-57.983	-57.667	-11.652	-33.525	-22.002	-21.382
Ackerland	12.945	12.450	14.323	15.182	14.219	12.487	10.818	9.618
Grünland	26.225	24.869	23.879	22.612	22.648	21.411	19.882	18.856

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
Feuchtgebiete	4.127	4.234	4.074	4.086	4.151	4.501	5.059	5.351
Siedlungen	1.978	2.124	3.403	3.636	3.842	3.869	3.656	3.428
Holzprodukte	-1.330	-15.044	-4.066	-2.328	-3.680	782	-1.076	-659
Σ LULUCF	-31.312	-12.060	-16.369	-14.479	29.528	9.526	16.337	15.213

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 120: Entwicklung der CO₂-Emissionen des LULUCF-Sektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	kt CO ₂							
Wald	-75.542,1	-40.909,6	-58.175,5	-57.839,6	-11.817,9	-33.693,6	-22.173,5	-21.551,0
Ackerland	12.436,4	11.982,8	13.768,5	14.576,6	13.680,5	11.986,4	10.460,7	9.376,8
Grünland	25.543,6	24.202,1	23.244,9	21.997,0	22.033,9	20.776,2	19.215,8	18.148,1
Feuchtgebiete	4.064,0	4.172,5	4.009,8	4.019,9	4.083,8	4.357,5	4.840,9	5.131,7
Siedlungen	1.810,7	1.921,9	3.173,1	3.370,3	3.557,6	3.583,6	3.390,0	3.186,5
Holzprodukte	-1.330,4	-15.043,6	-4.066,0	-2.328,4	-3.680,5	782,0	-1.075,5	-658,7
Σ LULUCF	-33.017,8	-13.673,9	-18.045,3	-16.204,1	27.857,5	7.792,0	14.658,4	13.633,4

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 121: Entwicklung der CH₄-Emissionen des LULUCF-Sektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	kt CH ₄							
Wald	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
Ackerland	7,8	8,2	9,4	9,9	9,7	9,3	8,9	8,8
Grünland	23,8	22,8	21,4	20,4	20,2	21,0	22,1	23,6
Feuchtgebiete	1,7	1,6	1,7	1,7	1,8	4,6	7,4	7,5
Siedlungen	1,0	1,3	1,5	1,8	1,9	2,1	2,1	2,2
Holzprodukte								
Σ LULUCF	35,0	34,6	34,7	34,6	34,5	37,8	41,5	43,0

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Tabelle 122: Entwicklung der N₂O-Emissionen des LULUCF-Sektors im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP_r (Jan 2020)), 1990-2035

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	kt N ₂ O							
Wald	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ackerland	1,0	0,9	1,1	1,2	1,0	0,9	0,4	0,1
Grünland	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Feuchtgebiete	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Siedlungen	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6
Holzprodukte								
Σ LULUCF	2,8	2,5	2,7	2,9	2,7	2,6	2,2	1,7

Quelle: Übernommen aus (Bundesregierung 2019d, Tabelle 85)

10.4.2 Ergebnisse Einzelinstrumente

Die beiden Maßnahmen Moorbodenschutz und Humusaufbau beginnen ab dem Jahr 2021, so dass im Jahr 2020 noch keine THG-Minderungen erzielt werden. Mit der Maßnahme Humusaufbau wird von 2025 bis 2030 eine konstante THG-Minderung von 1 Mio. t CO₂e bilanziert. Die Maßnahme Moorbodenschutz zeichnet sich durch einen kumulativen Effekt aus, da auf vernässelten Moorböden auch in den Folgejahren THG-Emissionen eingespart werden. So wird mit dieser Maßnahme im Jahr 2030 eine THG-Minderung von 1,65 Mio. t CO₂e erreicht (Tabelle 123). Für die Maßnahmen Grünlanderhalt und Waldbewirtschaftung werden keine THG-Minderungen gegenüber dem Referenzszenario erwartet.

Tabelle 123: Minderung der Treibhausgasemissionen durch die Maßnahmen in Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSP_r (Jan 2020)) im LULUCF-Sektor, 2020-2035

	2020	2025	2030	2035
	kt CO ₂ e			
Humusaufbau	0	1.000	1.000	1.000
Moorbodenschutz	0	735	1.653	2.571
Σ Maßnahmen	0	1.735	2.653	3.571

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

10.4.3 Einordnung der Unsicherheiten

Deutliche Unsicherheiten bestehen bei der Dauerhaftigkeit der Maßnahme Humusaufbau, da der Bodenkohlenstoff stark von der Art der Bewirtschaftung der Ackerfläche abhängt. Wird z.B. eine Fruchtfolge umgestellt, sodass sich ein erhöhter Bodenkohlenstoffgehalt einstellt, so muss diese oder eine vergleichbare Fruchtfolge über die nächsten Jahrzehnte beibehalten werden, um den Bodenkohlenstoff auf diesem Niveau zu erhalten. Wird die Fruchtfolge hingegen wieder verändert, so kann der Bodenkohlstoff zeitnah wieder abnehmen.

Die Berechnungen zum Moorbodenschutz basieren auf Kosten zur THG-Minderung durch Wiedervernässung, da in der Maßnahme keine Angaben zu Flächenzielen genannt sind. Je nachdem, ob Flächen zu geringeren oder höheren Kosten wiedervernässt werden können, ist mit Abweichungen der erreichten THG-Minderung zu rechnen.

10.5 Vergleich der Szenarien

Um das Ziel des Klimaschutzplans und -gesetzes, die aktuelle Nettosenke im LULUCF-Sektor zu sichern (BMU 2016; Bundesregierung 2019b), zu erreichen, ist gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2030 eine THG-Minderung von 19,0 Mio. t CO₂e erforderlich. Mit den Maßnahmen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 wird eine THG-Minderung gegenüber dem Referenzszenario von 2,7 Mio. t CO₂e erreicht (Abbildung 53 und Tabelle 124). Dies entspricht 14 % der benötigten THG-Minderung zur Erreichung einer Nettosenke. Um die verbliebene THG-Minderung von 16,3 Mio. t CO₂e im LULUCF-Sektor zu erreichen, sind weitere Maßnahmen nötig. Potenziale liegen in einem verstärkten Moorbodenschutz und insbesondere in der Erhöhung der Senkenleistung der Waldflächen gegenüber dem Referenzszenario.

Abbildung 53: Vergleich der THG-Emissionen im LULUCF-Sektor für das Referenzszenario (REF) und das Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020))



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

Tabelle 124: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen des LULUCF-Sektors zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e							
CO₂-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	-33,0	-13,7	-18,0	-16,2				
REF					27,9	9,6	17,4	17,3
KSPr (Jan 2020)					27,9	7,8	14,7	13,6
CH₄-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	0,9	0,9	0,9	0,9				
REF					0,9	0,9	1,0	1,0
KSPr (Jan 2020)					0,9	0,9	1,0	1,1
N₂O-Emissionen								
Entwicklung 1990 – 2016	0,8	0,7	0,8	0,9				
REF					0,8	0,8	0,7	0,5
KSPr (Jan 2020)					0,8	0,8	0,7	0,5
Summe CO₂+CH₄+N₂O								
Entwicklung 1990 – 2016	-31,3	-12,1	-16,4	-14,5				
REF					29,5	11,3	19,0	18,8
KSPr (Jan 2020)					29,5	9,5	16,3	15,2
Summe CO₂+CH₄+N₂O	Veränderung ab 1990 in %							
Entwicklung 1990 – 2016	Aufgrund des Wechsels von negativen zu positiven Werten ist keine Angabe in relativen Werten möglich.							
REF								
KSPr (Jan 2020)								
Summe CO₂+CH₄+N₂O	Veränderung ab 2005 in %							
Entwicklung 2005 – 2016	Aufgrund des Wechsels von negativen zu positiven Werten ist keine Angabe in relativen Werten möglich.							
REF								
KSPr (Jan 2020)								

Quelle: (Bundesregierung 2019d, Tabelle 88), Berechnungen des Öko-Instituts

11 Entwicklung Primärenergieverbrauch

11.1 Methodik

Die im Folgenden dargestellten Bilanzen des Primär- und Endenergieverbrauch folgen insgesamt dem Schema der Energiebilanzen. Primäre Datengrundlagen für die historischen Daten sind

- ▶ das Zentrale System Emissionen (ZSE) beim Umweltbundesamt (UBA) für alle brennstofffördernden Energieträger
- ▶ sowie die Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) für alle übrigen Energieträger.

Durch die Kombination dieser beiden Datenquellen kommt es im Folgenden zu Abweichungen gegenüber den von der AGEB veröffentlichten Daten.¹¹⁴ Eine vollständige Vereinheitlichung zwischen modellierten Daten (Kombination der Datenquellen ZSE und AGEB) mit den von den AGEB veröffentlichten Daten ist nicht möglich. Schon die Energiebilanzen selbst sind in sich nicht vollständig konsistent, sondern weisen teilweise statistische Differenzen aus.¹¹⁵ Um die Konsistenz zwischen historischen und Projektionsdaten zu wahren, sind auch für die historischen Jahre die Primär- und Endenergieverbräuche aus dem Modell aufgeführt. Dies wird auch deswegen getan, da so die historischen Energieverbräuche konsistent zu den berechneten Emissionen sind. Abweichungen zwischen modellierten und AGEB-Daten mit besonderer Bedeutung sind in den folgenden Unterkapiteln zu Primär- und Endenergieverbrauch vermerkt.¹¹⁶ Zusätzlich ist zu beachten, dass in das nationale Treibhausgasinventar (UBA 2018b, 2018c) aus zeitlichen Restriktionen für das jeweils letzte veröffentlichte Jahr (in diesem Fall also für das Jahr 2016) noch nicht die endgültige Energiebilanz 2016 sondern nur die vorläufige, sogenannte „Schätzbilanz 2016“ berücksichtigt werden kann.

Die im Folgenden dargestellten Bilanzen des Primärenergieverbrauchs (PEV) wurden mit Hilfe eines Modells generiert, an einigen Stellen durch Zusatz- und Anpassungsrechnungen ergänzt und folgen insgesamt dem Schema der Energiebilanzen.¹¹⁷

In diesem Kontext ist anzumerken, dass hinsichtlich der Entwicklung des Primärenergieverbrauchs eine systematische Verzerrung durch die verschiedenen Konventionen der Energiesta-

¹¹⁴ Insbesondere der absolute Beitrag biogener Energieträger ist in den ZSE-Daten für manche Jahre deutlich höher als in der Energiebilanz.

¹¹⁵ So betragen die statistischen Differenzen der Jahre 1990 bis 2016 im Median 3 PJ mit einer Schwankungsbreite zwischen -168 PJ und +115 PJ.

¹¹⁶ Der modellierte PEV ist im Mittel um 0,2% höher und der EEV im Mittel um 1,4% höher als der jeweils von AGEB veröffentlichte.

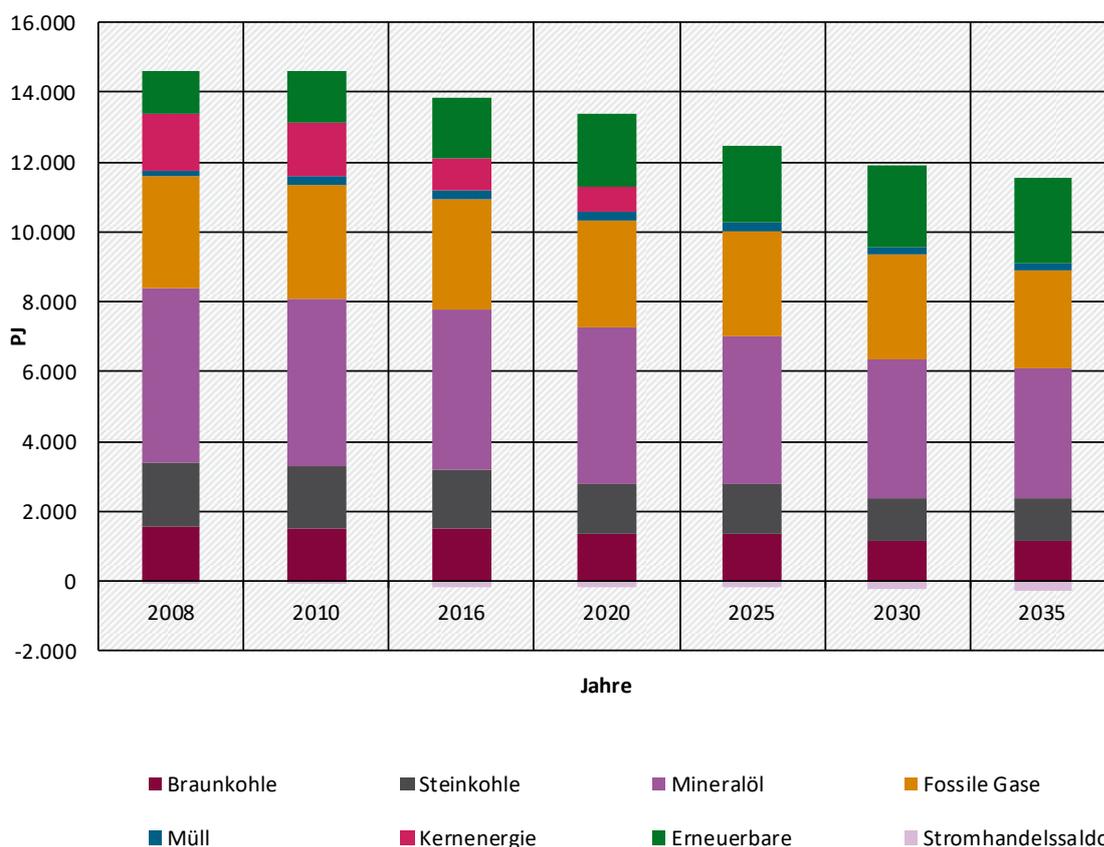
¹¹⁷ Um die Vergleichbarkeit mit dem Mengengerüst für die Emissionsermittlung zu ermöglichen, ist auf die folgenden Unterschiede zwischen der Systematik der Emissionsinventarisierung und der Systematik der Energiebilanzen hinzuweisen: Erstens wird in der Systematik der Energiebilanz beim Endenergieeinsatz der gesamte Energiebedarf des Flugverkehrs, also auch des internationalen Flugverkehrs bilanziert. Dagegen wird der internationale Seeverkehr weder beim Endenergieeinsatz noch beim Primärenergieverbrauch (im Inland), sondern bei den Hochseebunkerungen erfasst. Bei der Emissionsinventarisierung werden dagegen der internationale Luft- und Seeverkehr nur nachrichtlich ausgewiesen. Zweitens errechnet sich in der Systematik der Energiebilanz der Endenergiebedarf des Verarbeitenden Gewerbes und des Übrigen Bergbaus (im Folgenden: Industrie) aus dem direkten Endenergieeinsatz in der Industrie sowie dem der Wärmeerzeugung zuzurechnenden Brennstoffeinsatz in den industriellen Heizkraftwerken. Für die Emissionsermittlung werden dem Sektor Industrie aber die gesamten Energieeinsätze in Industriekraftwerken zugerechnet. Um eine möglichst umfassende Vergleichbarkeit der Energiedaten zu gewährleisten, wurden für die Ermittlung der Energiebedarfsdaten die nachstehenden Konventionen getroffen: Der Energieverbrauch des internationalen Seeverkehrs wird bei der Primärenergiebetrachtung nicht berücksichtigt. Der Energieverbrauch sowohl des nationalen als auch des internationalen Luftverkehrs wird dagegen bei der Primärenergieermittlung voll berücksichtigt.

tistik zu berücksichtigen ist. So wird die Kernenergie nach der verwendeten Wirkungsgradmethode per Konvention primärenergieseitig mit einem Faktor 3 bewertet, wohingegen v.a. erneuerbare Energieträger, abgesehen von Geothermie (hier erfolgt die primärenergieseitige Bewertung mit dem Faktor 10) und Biomasse, mit einem hypothetischen Wirkungsgrad von 100 % in die Primärenergiebilanz eingehen.¹¹⁸ Tendenziell sinkt somit der PEV aufgrund der unterschiedlichen primärenergieseitigen Bewertung der nicht-fossilen Energieträger. In den Primärenergieverbräuchen dieses Berichts ist der nichtenergetische Verbrauch von fossilen Energieträgern enthalten.¹¹⁹ Entsprechend der Methodik der Energiebilanz werden für die Herstellung von Biokraftstoffen keine Umwandlungsverluste berücksichtigt, der Endenergieverbrauch ist hier also identisch zum Primärenergieverbrauch.

11.2 Ergebnisse Referenzszenario

Einen Überblick über die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Referenzszenario bietet Abbildung 54. Detaillierte Ergebnisse können Tabelle 125 entnommen werden.

Abbildung 54: Primärenergieverbrauch im Referenzszenario (REF), 2008-2035



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

¹¹⁸ Auch der Stromaußenhandelssaldo wird primärenergieseitig mit einem Wirkungsgrad von 100% bewertet.

¹¹⁹ Der nicht-energetische Verbrauch fossiler Energieträger wurde über ein einfaches Modell basierend auf den Produktionsdaten der chemischen Industrie ermittelt, beträgt etwa 1.000 PJ und steigt im Zeitverlauf leicht an.

Der gesamte Primärenergieverbrauch sinkt im Referenzszenario von 14.521 PJ im Jahr 2008¹²⁰ auf 11.663 PJ im Jahr 2030 (-20 %). Mit dieser Entwicklung geht eine Verschiebung der Struktur des Primärenergieverbrauchs einher. Der Primärenergieverbrauch von Mineralöl sinkt bis 2030 um 20 %, dennoch bleibt Mineralöl bis 2030 der wichtigste Primärenergieträger. Der Verbrauch von Braun- und Steinkohle geht bis 2030 um 993 PJ (-29 %) zurück. Der Einsatz der Kernenergie zur Stromerzeugung geht aufgrund des Atomausstiegs nach 2022 auf null zurück. Der Verbrauch an fossilen Gasen sinkt bis 2030 um 240 PJ (-7 %). Ein starker Zuwachs ist vor allem bei den erneuerbaren Energieträgern festzustellen, wo sich bis 2030 ein Anstieg um 1.122 PJ (+93 %) einstellt. In erster Linie ist das auf ein deutliches Ansteigen der Windenergie und der Solarenergie zurückzuführen.

Der Anteil der erneuerbaren Energieträger im Referenzszenario steigt von 8 % (2008) bzw. 13 % (2016) auf 20 % im Jahr 2030.

Tabelle 125: Primärenergieverbrauch im Referenzszenario (REF), 2008-2035

Energieträger	2008	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ						
Braunkohle	1.566	1.516	1.525	1.343	1.336	1.164	1.128
Steinkohle	1.823	1.779	1.650	1.423	1.453	1.232	1.223
Mineralöl	4.974	4.765	4.594	4.508	4.237	3.957	3.719
Fossile Gase	3.219	3.301	3.169	3.061	3.015	2.979	2.810
Müll	192	234	257	250	232	222	220
Kernenergie	1.623	1.534	923	728	0	0	0
Biomasse ^a	934	1.164	1.150	1.260	1.267	1.237	1.266
Windenergie	149	140	288	479	534	632	706
Wasserkraft	73	76	74	77	77	77	78
Solarenergie	31	61	165	189	248	305	337
Geothermie und Umweltwärme	17	20	46	56	68	75	80
Stromhandelssaldo	-81	-64	-193	-190	-151	-219	-278
Synthetische Kraftstoffe	0	0	0	0	0	0	0
PEV gesamt^b	14.521	14.526	13.648	13.187	12.316	11.663	11.290
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-6,0 %</i>	<i>-9,2 %</i>	<i>-15,2 %</i>	<i>-19,7 %</i>	<i>-22,2 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>8,3 %</i>	<i>10,1 %</i>	<i>12,6 %</i>	<i>15,6 %</i>	<i>17,8 %</i>	<i>19,9 %</i>	<i>21,9 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

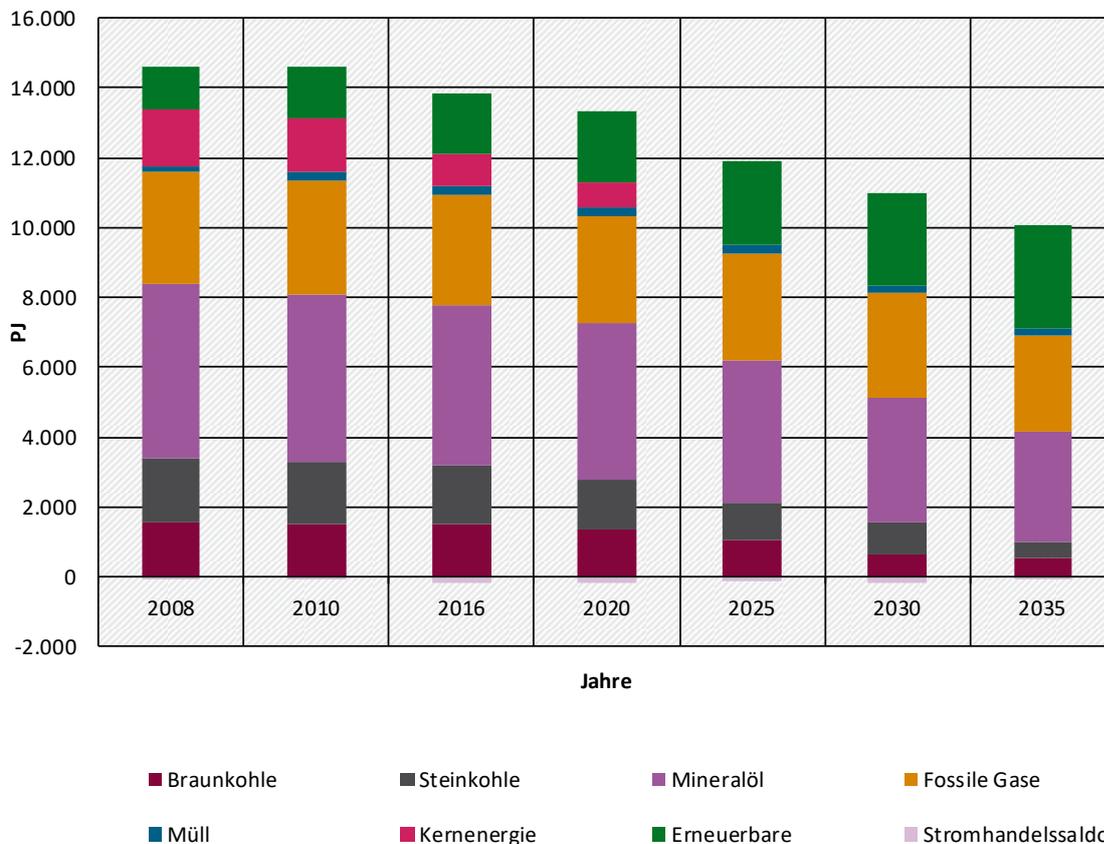
¹²⁰ Das Jahr 2008 wurde als Vergleichsjahr gewählt, da das Energiekonzept der Bundesregierung Primärenergieverbrauchsminierungsziele gegenüber diesem Jahr formuliert hat (20 % bis 2020 und 50 % bis 2050).

Anmerkungen: ^a einschließlich organischer Anteile des Mülls. ^b ohne Brennstoffeinsatz des internationalen Seeverkehrs (Hochseebunkerungen).

11.3 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Einen Überblick über die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 bietet Abbildung 55. Detaillierte Ergebnisse können Tabelle 126 entnommen werden.

Abbildung 55: Primärenergieverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2008-2035



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

Der gesamte Primärenergieverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 sinkt von 14.521 PJ im Jahr 2008 auf 10.827 PJ im Jahr 2030 (-25 %). Mit dieser Entwicklung geht eine Verschiebung der Struktur des Primärenergieverbrauchs einher. Der Primärenergieverbrauch von Mineralöl sinkt bis 2030 um -28 %. Der Verbrauch von Braun- und Steinkohle geht, vor allem aufgrund des Kohleausstiegs, um -54 % bis 2030 zurück. Der Einsatz der Kernenergie zur Stromerzeugung geht aufgrund des Atomausstiegs nach 2022 auf null zurück. Der Verbrauch an fossilen Gasen sinkt bis 2030 um 224 PJ (-7 %). Ein starker Zuwachs ist vor allem bei den erneuerbaren Energieträgern festzustellen, wo sich bis 2030 ein Zuwachs um 1.428 PJ (+119 %) einstellt. In erster Linie ist dies auf ein deutliches Ansteigen der Erzeugung von Wind- und Solarstrom zurückzuführen.

Der Anteil der erneuerbaren Energieträger im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 steigt von 8 % (2008) bzw. 13 % (2016) auf 24 % im Jahr 2030.

Tabelle 126: Primärenergieverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPPr (Jan 2020)), 2008-2035

Energieträger	2008	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ						
Braunkohle	1.566	1.516	1.525	1.346	1.346	630	539
Steinkohle	1.823	1.779	1.650	1.424	1.072	929	452
Mineralöl	4.974	4.765	4.594	4.504	4.076	3.586	3.152
Fossile Gase	3.219	3.301	3.169	3.036	3.084	2.995	2.761
Müll	192	234	257	247	227	218	217
Kernenergie	1.623	1.534	923	728	0	0	0
Biomasse ^a	934	1.164	1.150	1.265	1.300	1.306	1.357
Windenergie	149	140	288	479	658	766	909
Wasserkraft	73	76	74	77	77	77	78
Solarenergie	31	61	165	190	292	396	472
Geothermie und Umweltwärme	17	20	46	57	70	87	112
Stromhandelssaldo	-81	-64	-193	-191	-121	-163	-69
Synthetische Kraftstoffe	0	0	0	0	0	0	53
PEV gesamt^b	14.521	14.526	13.648	13.160	11.780	10.827	10.034
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-6,0 %</i>	<i>-9,4 %</i>	<i>-18,9 %</i>	<i>-25,4 %</i>	<i>-30,9 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>8,3 %</i>	<i>10,1 %</i>	<i>12,6 %</i>	<i>15,7 %</i>	<i>20,3 %</i>	<i>24,3 %</i>	<i>29,3 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

Anmerkungen: ^a einschließlich organischer Anteile des Mülls. ^b ohne Brennstoffeinsatz des internationalen Seeverkehrs (Hochseebunkerungen).

11.4 Energetischer Einsatz von Biomasse

Im Jahr 2016, dem Basisjahr der Modellrechnungen, wurden in Deutschland in Summe 1.150 PJ an Biomasse energetisch genutzt (siehe Tabelle 127). Über 60 % entfielen davon auf feste Biomasse (einschließlich des biogenen Anteils des Mülls), knapp 30 % auf gasförmige Bioenergie und lediglich 10 % auf flüssige Biokraftstoffe. Sektoral war die Energiewirtschaft der bedeutendste Nutzer von energetischer Biomasse mit einem Anteil von knapp 60 %, gefolgt von den Gebäuden mit einem Anteil von knapp 24 % und der Industrie mit gut 15 %. Der Verkehr hatte einen Anteil von knapp 9 % und die Landwirtschaft von lediglich 5 %.

Tabelle 127: Energetischer Einsatz von Biomasse im Basisjahr 2016

KSG-Sektor	Feste Biomasse inkl. Biomüll	Bio- und Klärgas	Flüssige Biokraftstoffe	Summe
Energiewirtschaft	244	280	3	526
Industrie	172	2	3	177
Gebäude	274	7	0	280
Verkehr	0	0	107	107
Landwirtschaft	10	47	3	59
Summe	699	335	116	1.150

Quelle: (UBA 2018b, 2018c)

Im Referenzszenario ergibt sich mit einem Anstieg von 8 % bis zum Jahr 2030 gegenüber 2016 eine Ausweitung des energetischen Biomasseeinsatzes (siehe Tabelle 128). Dieser Anstieg ist auf die verschiedenen Brennstoffe unterschiedlich verteilt. Den stärksten relativen Anstieg zwischen 2016 und 2030 gibt es bei den Gebäuden mit +14 %. Der Anstieg entfällt dabei vor allem auf feste Biomasse. In der Energiewirtschaft wächst der Einsatz fester Biomasse (einschließlich Biomüll), während der Einsatz von gasförmigen und flüssigen Bioenergieträgern rückläufig ist. Insgesamt steigt der Biomasseeinsatz der Energiewirtschaft um 10 %. Im Verkehr steigt der Biomasseeinsatz um 5 %, wobei sich der absolute Anstieg gleichmäßig auf flüssige Biokraftstoffe und Biogas verteilt. Der energetische Biomasseeinsatz der Industrie ist in Summe leicht rückläufig. Auch der energetische Biomasseeinsatz der Landwirtschaft sinkt um 7 %. Im Saldo über alle Sektoren steigt die energetische Nutzung fester Biomasse zwischen 2016 und 2030 um 12 %, von flüssigen Biokraftstoffen um 5 %, während der Einsatz von Bio- und Klärgas um 1 % zurück geht.

Tabelle 128: Energetischer Einsatz von Biomasse im Referenzszenario (REF), Jahr 2030

KSG-Sektor	Feste Biomasse inkl. Biomüll	Bio- und Klärgas	Flüssige Biokraftstoffe	Summe
Energiewirtschaft	302	275	0	577
Industrie	168	1	5	175
Gebäude	306	9	3	319
Verkehr	0	3	110	112
Landwirtschaft	9	43	3	55
Summe	785	331	122	1.237

Quelle: Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 wächst der Einsatz von Biomasse als Energieträger deutlich stärker als im Referenzszenario und liegt 2030 um 14 % höher als im Basisjahr 2016. Vor allem durch eine deutlich stärkere Nutzung von flüssigen Biokraftstoffen verbraucht der Verkehr in diesem Szenario im Jahr 2030 etwa 32 % mehr energetische Biomasse als im Basisjahr und somit etwa ein Viertel mehr als im Referenzszenario. Auch bei den Gebäuden steigt der Bioenergieeinsatz zwischen 2016 und 2030 um 19 % und somit stärker als in der Referenz. Während die energetische Biomassenutzung der Industrie im Referenzszenario leicht rückläufig ist, steigt sie im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 zwischen 2016 und 2030 um 10 %. Der Anstieg wird dabei hauptsächlich durch feste Biomasse gedeckt. In der Energiewirtschaft hingegen gibt es nur geringfügige Änderungen gegenüber dem Referenzszenario. In der Landwirtschaft sinkt die Biomassenutzung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 etwas schneller als im Referenzszenario. In Summe ergibt sich zwischen dem Basisjahr 2016 und dem Jahr 2030 ein Anstieg der Nutzung von fester Biomasse (inkl. Biomüll) um 16 % und von flüssigen Biokraftstoffen sogar um 32 %, während die biogenen Gase nur einen geringen Anstieg aufweisen.

Tabelle 129: Energetischer Einsatz von Biomasse im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPR (Jan 2020)), Jahr 2030

KSG-Sektor	Feste Biomasse inkl. Biomüll	Bio- und Klärgas	Flüssige Biokraftstoffe	Summe
Energiewirtschaft	304	278	0	581
Industrie	189	1	5	196
Gebäude	313	9	11	333
Verkehr	0	8	133	141
Landwirtschaft	8	43	3	54
Summe	813	340	153	1.306

Quelle: Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

Nimmt man die im Klimaschutzprogramm 2030 geplante Biomassenutzung aller Sektoren zusammen, erhöht sich die Biomassenachfrage um ca. 14 % (156 PJ) gegenüber 2016. Der Verbrauch fester Biomasse steigt dadurch um 16 %, der von flüssiger Biomasse sogar um 32 %. Das geht v.a. auf die Maßnahmen aus den Sektoren Gebäude und Verkehr zurück. Diesem Wert steht ein nachhaltig nutzbares inländisches Biomassepotenzial gegenüber, das von Annahmen zur Biomasseverwendung (Konversionstechnologie, Flächennutzung) abhängig ist. Nach (Fehrenbach et al. 2008; Fehrenbach et al. 2019) besteht derzeit ein ungenutztes Potenzial an Rest- und Abfallstoffen in Höhe von ca. 140 PJ Primärenergie (v.a. Stroh und Gülle). Unter Berücksichtigung der hohen Umwandlungsverluste vor allem im Bereich der Biokraftstoffherstellung, reduziert sich diese Menge weiter.

- **Feste Biomasse:** Es besteht kaum weiteres inländisches Potenzial an fester Biomasse. Die Reststoffe werden bereits genutzt und eine Ausweitung der (Energie-)Nutzung von Waldholz gefährdet die Waldsenke. Es bestehen allerdings große Unsicherheiten inwieweit sich die Auswirkungen der letzten trockenen Jahre mit großen Schadholzmengen auch zukünftig fortsetzen werden.

- ▶ Flüssige Biokraftstoffe: Für die flüssigen Biokraftstoffe steht v.a. das Strohreststoffpotenzial für Ethanol zur Verfügung. Die zusätzliche Produktion von inländischem Strohethanol hängt aber v.a. am Ausbau der Anlagenkapazitäten. Für fortgeschrittenen Biodiesel (z.B. BtL aus Kurzumtriebsplantagen oder Waldrestholz) steht dagegen derzeit quasi kein freies Potenzial zur Verfügung.
- ▶ Biogas: Die geringe Steigerung der Biogasnachfrage kann über die Erhöhung der Güllevergärung und die Erschließung weiterer Biogasmengen aus dem Abfallbereich gut gedeckt werden. Hier besteht das größte noch ungenutzte Potenzial. Allerdings laufen bei vielen Biogasanlagen in den nächsten Jahren die EEG-Vergütungen aus und die zukünftige Entwicklung von Biogas auf Energiepflanzenbasis ist ungewiss. Ggf. muss mit einer Reduktion der Biogaserzeugung trotz steigender Rest- und Abfallmengen gerechnet werden.

Eine Deckung des zusätzlichen Biomassebedarfs von 156 PJ über inländische Rest- und Abfallstoffe ist daher nicht komplett möglich. Eine Ausdehnung des Energiepflanzenanbaus ist nicht vorgesehen und auch aus Nachhaltigkeitsaspekten nicht gewünscht. Die Deckung der zusätzlichen Biomassenachfrage aus dem Klimaschutzprogramm 2030 wird daher ggf. auch über Importe zu schließen sein. Das Gewährleisten der Nachhaltigkeit importierter Biomasse ist allerdings komplex und selbst bei Rest- und Abfallstoffen werden bestehende Nutzungen in Konkurrenz gebracht und es besteht das Risiko nicht steuerbarer indirekter Umwelteffekte.

11.5 Vergleich der Szenarien

Die Maßnahmen im Klimaschutzprogramm 2030 führen dazu, dass bis 2030 der Primärenergieverbrauch um 836 PJ stärker zurückgeht als in der Referenz. Dieser Rückgang ist nahezu identisch zum Rückgang der Kohlen (-838 PJ). Dabei trägt die Steinkohle mit einem zusätzlichen Rückgang um 534 PJ stärker bei als die Braunkohle, bei der im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 der Rückgang bis 2030 gegenüber der Referenz 303 PJ beträgt. Ein deutlicher Verbrauchsrückgang ist ebenfalls bei den Mineralölprodukten zu verzeichnen.

Im Gegensatz dazu ist für das Jahr 2030 der zusätzliche Rückgang im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 gegenüber dem Referenzszenario beim energetischen Einsatz von fossilem Müll (-4 PJ) nur gering. Bei den fossilen Gasen (darunter vor allem Erdgas) liegt der Verbrauch des Jahres 2030 durch das Klimaschutzprogramm 2030 sogar etwas (+16 PJ) höher.

Dem Rückgang fossiler Energieträger insgesamt steht ein deutlich stärkeres Wachstum bei den erneuerbaren Energieträgern gegenüber. Im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 werden 2030 insgesamt 305 PJ mehr eingesetzt als in der Referenz. Der größte Zuwachs entfällt dabei auf Windenergie (+135 PJ), gefolgt von Solarenergie (+90 PJ), Biomasse (+68 PJ) und Geothermie (+12 PJ). Beim Primärenergieverbrauch synthetischer Kraftstoffe gibt es 2030 bedingt durch die dann noch sehr geringe Verwendung bzw. Verfügbarkeit kaum einen Unterschied zwischen den beiden Szenarien.

Ein deutlicher Rückgang des Stromexportüberschusses bis 2035 um 56 PJ (16 TWh) gegenüber dem Referenzszenario trägt ebenfalls zum Rückgang des Primärenergieverbrauchs bei. Denn exportierter Strom wird zwar vom Primärenergieverbrauch abgezogen, aber die inländischen Wirkungsgradverluste insbesondere von thermischen Kraftwerken sind im Primärenergieverbrauch enthalten.

Die Kombination aus geringerem Primärenergieverbrauch und höherem Einsatz an erneuerbaren Energieträgern führt dazu, dass der erneuerbare Anteil am Primärenergieverbrauch im Jahr

2030 mit gut 25 % im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 um knapp sechs Prozentpunkte höher liegt als im Referenzszenario.

12 Entwicklung Endenergieverbrauch

12.1 Methodik

Die generelle Methodik zur Berechnung des Primär- und Endenergieverbrauchs wurde bereits in Kapitel 11.1 beschrieben. Darüber hinaus ergeben sich beim Endenergieverbrauch die folgenden Besonderheiten.

Energiebilanz und Nationales Treibhausgasinventar verwenden unterschiedliche Abgrenzungen der einzelnen Sektoren. Die folgende Tabelle 130 gibt einen Überblick, welche Inventarsektoren welchen Endenergiesektoren zugeordnet werden. Durch diese Zuordnung wird eine näherungsweise Übereinstimmung zwischen den Konventionen des Treibhausgasinventars einerseits und der Energiebilanz andererseits erzielt.¹²¹

Tabelle 130: Vergleich der Zuordnung der CRF-Sektoren 1.A.2 bis 1.A.5 und der Endenergie-Sektoren in der Energiebilanzstruktur

Beschreibung	CRF-Sektor	Endenergiesektor	Kommentar
Brennstoffeinsatz Stromerzeugung in industriellen Kraftwerken	1.A.2		In der Energiebilanz dem Umwandlungssektor zugeordnet
Brennstoffeinsatz Wärmeerzeugung in industriellen Kraftwerken	1.A.2	Industrie	
Bauwirtschaftlicher Sonderverkehr	1.A.2	GHD	
Inländischer Flugverkehr	1.A.3.a	Verkehr	
Straßenverkehr	1.A.3.b	Verkehr	
Schienenverkehr	1.A.3.c	Verkehr	
Küsten- und Binnenschifffahrt	1.A.3.d	Verkehr	
Erdgasverdichterstationen	1.A.3.e		In der Energiebilanz dem Umwandlungssektor zugeordnet
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	1.A.4.a	GHD	
Private Haushalte	1.A.4.b	Haushalte	
Landwirtschaft	1.A.4.c	GHD	
Militär	1.A.5.a	GHD	
Internationaler Luftverkehr	1.D.1.a	Verkehr	
Internationale Schifffahrt	1.D.1.b		In der Energiebilanz weder im Primär- noch im Endenergieverbrauch enthalten

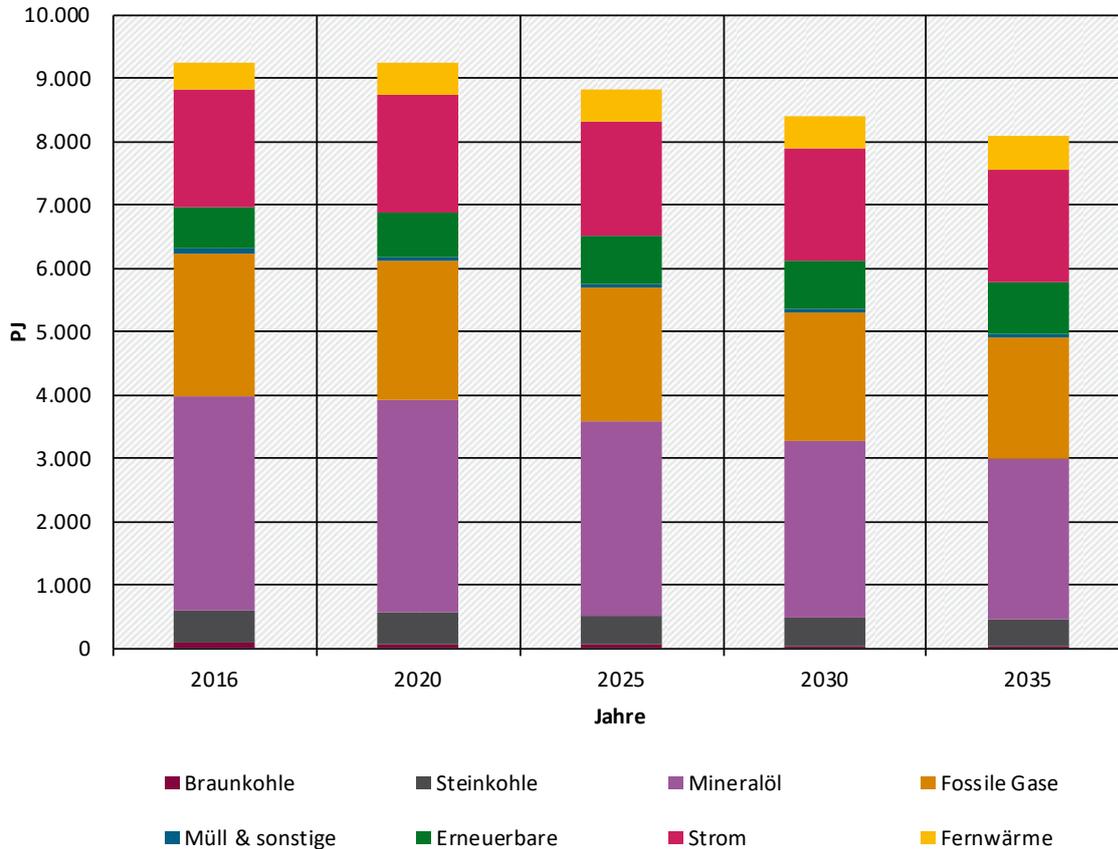
Quelle: Darstellung Öko-Institut

¹²¹ Der so im Modell ermittelte gesamte Endenergieverbrauch liegt für die historischen Jahre 1990 bis 2016 im Mittel etwa 1% höher, wobei die Abweichung mit 2,2% im Jahr 1990 am höchsten und mit 0,6% im Jahr 2010 am geringsten ist.

12.2 Ergebnisse Referenzszenario

Einen Überblick über die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Referenzszenario bietet Abbildung 56.

Abbildung 56: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Referenzszenario (REF), 2008-2035



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

Der gesamte Endenergieverbrauch im Referenzszenario ist rückläufig. Er sinkt von 9.236 PJ im Jahr 2016 auf 8.412 PJ im Jahr 2030, was einem Rückgang von 9 % entspricht.

Der stärkste absolute Rückgang des Endenergieverbrauchs bis 2030 ist bei der Industrie zu verzeichnen (-260 PJ bzw. -10 %). Fast ebenso stark ist der Rückgang bis 2030 bei den Haushalten (-259 PJ bzw. -11 %). Die stärkste relative Energieeinsparung ist bei Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), dem kleinsten Endverbrauchssektor der Energiebilanz, zu verzeichnen. Hier beträgt der Rückgang 11 % bis 2030 (-188 PJ). Im Verkehr, dem aktuell bedeutendsten Endenergieverbrauchssektor, steigt der Energieverbrauch zunächst bis 2020 noch an. Bis zum Jahr 2030 wird gegenüber 2016 ein Rückgang von lediglich 116 PJ (-4 %) erzielt.

Tabelle 131: Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im Referenzszenario (REF), 2016-2035

Sektor	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
Industrie	2.671	2.573	2.495	2.411	2.375
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	1.442	1.471	1.362	1.253	1.166
Haushalte	2.412	2.420	2.276	2.153	2.064
Verkehr	2.711	2.769	2.694	2.595	2.474
Endenergieverbrauch gesamt	9.236	9.233	8.826	8.412	8.079
<i>Änderung ggü. 2016</i>	<i>0,0 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-4,4 %</i>	<i>-8,9 %</i>	<i>-12,5 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

Wie beim Primärenergieverbrauch entwickeln sich die einzelnen Energieträgergruppen unterschiedlich. Der Verbrauch von Braunkohlen nimmt von 2016 bis 2030 um etwa 46 % ab. Der Einsatz von Steinkohlen geht bis 2030 lediglich um 13 % gegenüber 2016 zurück, da die Steinkohle in der Stahlindustrie nur begrenzt substituiert werden kann. Bei den Mineralölprodukten ist ein Rückgang um 17 % bis 2030 zu beobachten. Bei fossilen Gasen, von denen Erdgas mit Abstand das wichtigste ist, geht der Verbrauch bis 2030 um 10 % gegenüber 2016 zurück.

Der Beitrag der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch nimmt im Referenzszenario deutlich zu (+18 % im Jahr 2030), wobei dieser Anstieg sowohl auf Biomasse als auch auf Solarenergie sowie Geothermie und Umweltwärme entfällt. Der gesamte Endenergieverbrauch an Strom sinkt bis 2030 um gut 5 %, steigt dann aber aufgrund neuer Verbraucher wie z.B. Elektrofahrzeugen bis 2035 wieder leicht an.

Tabelle 132: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Referenzszenario (REF), 2016-2035

Energieträger	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
Braunkohle	91	76	61	49	41
Steinkohle	509	486	465	444	423
Mineralöl	3.382	3.362	3.068	2.793	2.523
Fossile Gase	2.250	2.185	2.114	2.025	1.930
Müll	61	54	48	44	42
Sonstige	13	0	0	0	0
Biomasse ^a	584	626	640	633	660
Solarenergie	28	41	55	66	77

Energieträger	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
Geothermie und Umweltwärme	44	54	65	72	76
Strom	1.863	1.866	1.809	1.771	1.782
Fernwärme	410	483	503	514	524
Synthetische Kraftstoffe	0	0	0	0	0
Endenergieverbrauch gesamt	9.236	9.233	8.826	8.412	8.079
Änderung ggü. 2016	0,0 %	0,0 %	-4,4 %	-8,9 %	-12,5 %

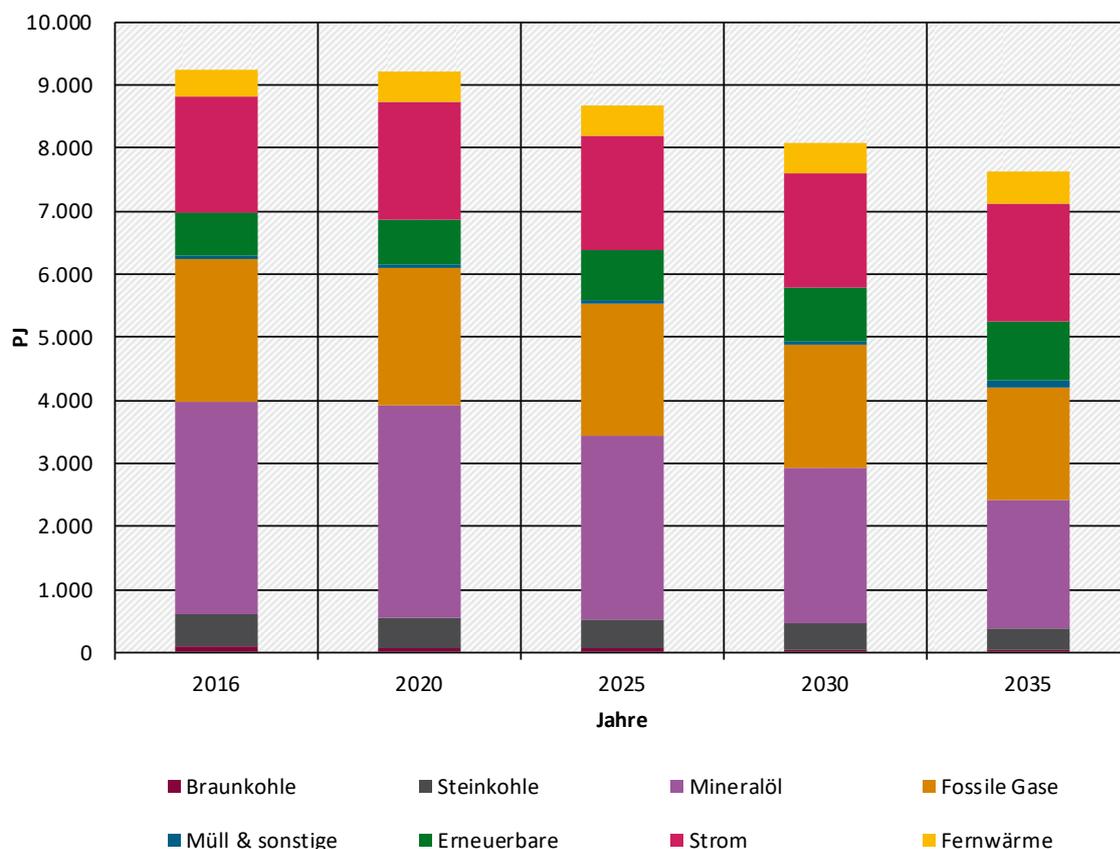
Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

Anmerkungen: ^a Einschließlich organischer Anteile des Mülls.

12.3 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Einen Überblick über die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 bietet Abbildung 57.

Abbildung 57: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 2008-2035



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

Der gesamte Endenergieverbrauch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 ist rückläufig. Er sinkt von 9.236 PJ im Jahr 2016 auf 8.090 PJ im Jahr 2030, was einem Rückgang von 12 % entspricht.

Anders als im Referenzszenario ist der stärkste absolute Rückgang des Endenergieverbrauchs im Verkehr zu verzeichnen. Bis 2030 beträgt der Rückgang 352 PJ (-13 %) gegenüber 2016. Industrie und Haushalte haben bis 2030 mit Rückgängen von 296 PJ (-11 %) bzw. -286 PJ (-12 %) ähnliche Entwicklungen. Wie auch schon in der Referenz werden auch im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 im GHD-Sektor die kleinsten absoluten aber die größten relativen Energieeinsparungen erzielt. Bis 2030 sinkt der Endenergieverbrauch um 212 PJ (-15 %).

Tabelle 133: Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPR (Jan 2020)), 2016-2035

Sektor	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
Industrie	2.671	2.571	2.477	2.375	2.323
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	1.442	1.467	1.350	1.229	1.132
Haushalte	2.412	2.417	2.262	2.126	2.028
Verkehr	2.711	2.757	2.585	2.359	2.143
Endenergieverbrauch gesamt	9.236	9.212	8.674	8.090	7.625
<i>Änderung ggü. 2016</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-0,3 %</i>	<i>-6,1 %</i>	<i>-12,4 %</i>	<i>-17,4 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

Der Verbrauch von Braunkohlen nimmt von 2016 bis 2030 um etwa 49 % ab. Der Einsatz von Steinkohlen geht bis 2030 um 20 % gegenüber 2016 zurück. Bei den Mineralölprodukten ist ein Rückgang um 27 % bis 2030 und bei fossilen Gasen um 13 % bis 2030 gegenüber 2016 zu beobachten.

Der Beitrag der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch nimmt im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 im Szenariozeitraum deutlich zu (+29 % bis 2030). Der Endenergieverbrauch an Strom sinkt bis 2030 um gut 3 %, steigt dann aber aufgrund neuer Verbraucher wie z.B. Elektrofahrzeugen wieder leicht an.

Tabelle 134: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPR (Jan 2020)), 2016-2035

Energieträger	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
Braunkohle	91	72	56	46	39
Steinkohle	509	484	455	409	351
Mineralöl	3.382	3.359	2.929	2.473	2.027

Energieträger	2016	2020	2025	2030	2035
	PJ				
Fossile Gase	2.250	2.183	2.096	1.957	1.786
Müll	61	51	43	40	39
Sonstige	13	0	0	0	0
Biomasse ^a	584	632	669	697	748
Solarenergie	28	42	57	69	78
Geothermie und Umweltwärme	44	55	67	83	108
Strom ^b	1.863	1.859	1.816	1.813	1.881
Fernwärme	410	476	486	495	508
Synthetische Kraftstoffe ^b	0	0	0	8	61
Endenergieverbrauch gesamt	9.236	9.212	8.674	8.090	7.625
<i>Änderung ggü. 2016</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-0,3 %</i>	<i>-6,1 %</i>	<i>-12,4 %</i>	<i>-17,4 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2018b, 2018c), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2018a, 2008-2018b), Modellierung Fraunhofer-ISI und Öko- Institut

Anmerkungen: ^a Einschließlich organischer Anteile des Mülls. ^b Wasserstoffherstellung in der Industrie wird unter Stromverbrauch bilanziert und ist somit nicht in synthetischen Kraftstoffen enthalten.

12.4 Vergleich der Szenarien

Im Vergleich der Szenarien zeigt sich, dass im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 die deutlichste zusätzliche Endenergieeinsparung im Verkehr (-235 PJ im Jahr 2030) auftritt. Die Unterschiede für das Jahr 2030 bei den übrigen Sektoren sind eine Größenordnung kleiner (-24 PJ bei GHD, -27 PJ bei den Haushalten und -36 PJ in der Industrie). Dem entsprechend ist auch der stärkste zusätzliche Endenergieverbrauchsrückgang für das Jahr 2030 im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 bei den Mineralölprodukten mit -320 PJ zu verzeichnen. Die zweitstärkste zusätzliche Einsparung ist bei den fossilen Gasen mit -69 PJ im Jahr 2030 zu verzeichnen. Auch bei den übrigen fossilen Endenergieträgern (Kohlen und Müll) sowie Fernwärme werden durch das Klimaschutzprogramm 2030 zusätzliche Einsparungen bewirkt.

Dem gegenüber steht ein Anstieg emissionsarmer Energieträger. Bis 2030 ist im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 der größte Zuwachs bei der Biomasse zu verzeichnen (+64 PJ). Bis 2035 steigt durch Elektromobilität, Wärmepumpen und Elektrolysewasserstoff die zusätzliche Nachfrage nach Strom (+99 PJ im Jahr 2035, bereits 2030 +42 PJ). Die erstmal im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 angestoßene Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen ist im Jahr 2030 mit 8 PJ noch eher gering, weist dann aber im Jahr 2035 mit 61 PJ einen bedeutenden Unterschied gegenüber der Referenz auf. Kleine zusätzliche Beiträge liefert auch die Solarenergie.

12.5 Exkurs zu synthetischen Energieträgern und der Nationalen Wasserstoffstrategie

Im Juni 2020 verabschiedete die Bundesregierung die *Nationale Wasserstoffstrategie* (NWS) (Bundesregierung 2020). Dieser Beschluss folgte nach der Erstellung der hier vorliegenden Szenarien, konnte daher nicht mehr berücksichtigt werden. Dennoch soll hier eine Einordnung der Ergebnisse des Szenarios KSPR 2030 (Jan 2020) im Vergleich zur NWS erfolgen.

Die NWS sieht für das Jahr 2030 eine Wasserstoffnachfrage in Höhe von 90 bis 110 TWh (entspricht etwa 320 bis 400 PJ). Um diese Nachfrage teilweise durch grünen Wasserstoff zu decken, sieht die NWS für das Jahr 2030 Elektrolyseure mit einer Leistung von 5 GW vor. Diese sollen im Jahr 2030 in 4000 Volllaststunden (VLh) 14 TWh (etwa 50 PJ) Wasserstoff bereitstellen. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 70 % werden hierfür 20 TWh an Strom benötigt. Eine weitere Elektrolyseleistung von 5 GW sieht die NWS bis zum Jahr 2035, spätestens bis zum Jahr 2040, vor.

Tabelle 135: Nachfrage nach und Bereitstellung von synthetischen Brennstoffen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPR 2030 (Jan 2020))

Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035
Industrie					
Nachfrage nach Elektrolysewasserstoff	PJ	0,0	7,7	33,4	54,3
Anteil inländische Produktion	%	NA	100 %	100 %	100 %
Inländische Elektrolyseleistung	MW	0	760	3311	5389
Inländischer Stromverbrauch Elektrolyse	TWh	0,0	3,0	13,2	21,6
Volllaststunden Elektrolyseure	h	NA	4000	4000	4000
Verkehr					
Nachfrage nach synthetischen Flüssigkraftstoffen	PJ	0,0	0,0	8,1	60,9
Anteil inländische Produktion	%	NA	NA	98 %	13 %
Inländische Elektrolyseleistung	MW	0	0	550	550
Inländischer Stromverbrauch Elektrolyse	TWh	0,0	0,0	4,4	4,4
Volllaststunden Elektrolyseure	h	NA	NA	8081	8081
Gesamt					
Nachfrage nach synthetischen Brennstoffen	PJ	0,0	7,7	41,5	115,2
Anteil inländische Produktion	%	NA	100 %	100 %	54 %
Elektrolyseleistung	MW	0	760	3861	5939
Inländischer Stromverbrauch Elektrolyse	TWh	0,0	2,1	13,7	19,5
Volllaststunden Elektrolyseure	h	NA	4000	4783	4519

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer ISI

Im Szenario KSPr (Jan 2020) wurde für 2030 eine Nachfrage der Industrie nach Elektrolysewasserstoff von 33,4 PJ ermittelt (siehe Tabelle 135). Dabei wurde die gleiche Effizienz der Elektrolyseure (70 %) wie in der NWS unterstellt. Unter Annahme der gleichen Auslastung (4000 VLh) ergibt sich für das Jahr 2030 eine Elektrolyseleistung von etwa 3,3 GW. Im Verkehr gibt es in Szenario im Jahr 2030 eine Nachfrage nach synthetischen Flüssigkraftstoffen in Höhe von 8,1 PJ. Diese Nachfrage wird fast komplett durch inländische PtL-Pilotanlagen mit einer Elektrolyseleistung von 550 MW und einer Effizienz der PtL-Erzeugung von 50 % gedeckt. Bedingt durch die technische Komplexität und hohen Kosten wurde für die PtL eine sehr hohe Auslastung (über 8000 VLh) ermittelt. In Summe ergibt sich für das Jahr 2030 eine Nachfrage von 41,5 PJ an synthetischen Brennstoffen, was etwa vier Fünfteln der Wasserstoffnachfrage der NWS entspricht. Die Gesamt-Elektrolyseleistung in Höhe von 3,9 GW für das Jahr 2030 ist gut drei Viertel der Elektrolyseleistung der NWS, allerdings bei einer um etwa ein Fünftel höheren Auslastung. Insgesamt bestätigt also das Szenario KSPr 2030 (Jan 2020) die in der NWS angegebenen Größenordnungen von Wasserstoffnachfrage und Elektrolyseleistungen.

Im KSPr 2030 (Jan 2020) verdreifacht sich die Nachfrage nach synthetischen Brennstoffen zwischen 2030 und 2035 nahezu. Dabei steigt die Nachfrage nach Elektrolysewasserstoff in der Industrie um zwei Drittel, während sich die Nachfrage nach synthetischen Flüssigkraftstoffen im Verkehr mehr als versiebenfacht. Da aber kein weiterer Ausbau von PtL-Anlagen unterstellt wurde und dafür der größte Teil der Nachfrage nach synthetischen Flüssigkraftstoffen durch Importe gedeckt wird, steigt die Elektrolyseleistung bis 2035 deutlich langsamer und liegt bei 5,9 GW und somit deutlich niedriger als die in der NWS für 2035 (bzw. spätestens 2030) vorgesehenen 10 GW. Allerdings wurde im KSPr 2030 (Jan 2020) auch unterstellt, dass es über PtL-Pilotanlagen hinaus keine weiteren PtL-Anlagen in Deutschland geben wird.

In der Gesamtschau sind die Ergebnisse des Szenario KSPr 2030 (Jan 2020) bis zum Jahr 2030 durchaus vergleichbar mit der Nationalen Wasserstoffstrategie. Danach werden die Unterschiede deutlich größer, wobei diese vor allem auf der Erzeugungsseite, weniger auf der Nachfrageseite liegt.

13 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen

Dieser Abschnitt stellt die Gesamtergebnisse der Treibhausgasemissionen des Referenzszenarios sowie des Szenarios Klimaschutzprogramm 2030 dar.

13.1 Ergebnisse Referenzszenario

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Referenzszenario (REF) in der Aggregation des Klimaschutzplans ist in Tabelle 136 dargestellt. Dabei handelt es sich um die neu angepasste Referenzentwicklung, die die Wirkung der im Projektionsbericht 2019 (PB 2019) berücksichtigten Maßnahmen sowie einige Aktualisierungen (siehe Kapitel zu den einzelnen Sektoren) abbildet. Die Modellierung zeigt eine gesamte Treibhausgasminderung von rund 32,3 % auf 847 Mio. t CO₂e im Jahr 2020, womit das Ziel der Bundesregierung (Minderung von 40 %) nicht erreicht wird. Die Modellierung wurde auf Basis der Inventarzahlen des Jahres 2016 durchgeführt.¹²² Die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vorliegenden Zahlen für die Jahre 2017 und 2018 werden an dieser Stelle jedoch ebenfalls ausgewiesen. Aufgrund der Corona-Krise ist eine starke Abnahme der Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 zu erwarten. Da diese zum Zeitpunkt der Modellierung jedoch nicht absehbar war, sind deren Effekte in den hier vorliegenden Ergebnissen nicht berücksichtigt. Insofern sind insbesondere die Modellierungsergebnisse für das Jahr 2020 nicht als eine Prognose der in diesem Jahr zu erwartenden Emissionen zu werten.

Für das Jahr 2030 wird im Referenzszenario eine Senkung der Treibhausgasemissionen um 41,2 % auf 737 Mio. t CO₂e projiziert, womit das Klimaziel der Bundesregierung von mindestens 55 % Minderung gegenüber 1990 deutlich verfehlt wird. Im Jahr 2035 beträgt die Minderung 44,1 %.

Neben den Sektoren, die ein Minderungsziel im Rahmen des Bundes-Klimaschutzgesetzes haben, sind auch die Emissionen aus dem LULUCF-Sektor und aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr dargestellt. Im LULUCF-Sektor nimmt die Senkenfunktion im Lauf der Zeit deutlich ab. Somit stellt dieser Sektor ab dem Jahr 2020 eine Treibhausgasquelle dar. Die Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr nehmen im Projektionszeitraum ebenfalls zu.

Tabelle 136: Treibhausgasemissionen im Referenzszenario (REF), 1990-2035

Sektor	1990	2005	2010	2016	2017*	2018*	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e									
Energiewirtschaft	466,4	397,4	369,4	343,4	322,5	305,1	300,7	305,2	269,0	262,5
Industrie	283,8	191,6	188,5	188,2	197,7	194,9	176,2	164,5	152,4	147,9
Gebäude	209,7	153,9	148,5	130,0	123,4	116,6	125,1	106,8	91,2	77,5
Verkehr	163,3	159,9	153,0	165,6	167,9	162,3	166,4	159,5	150,3	138,6
Landwirtschaft	90,0	69,2	68,7	71,8	72,6	69,8	69,7	68,4	67,8	67,8
Abfallwirtschaft und Sonstiges	38,4	21,2	14,6	10,5	10,2	9,7	8,7	7,0	5,8	5,0
Gesamt	1251,6	993,1	942,8	909,4	894,3	858,4	846,8	811,4	736,5	699,3

¹²² Dies war der aktuelle Inventarstand zum Zeitpunkt der Abstimmung (August 2018) der Rahmendaten.

Sektor	1990	2005	2010	2016	2017*	2018*	2020	2025	2030	2035
Änderung ggü. 1990 in %	0,0	-20,7	-24,7	-27,3	-28,8	-31,4	-32,3	-35,2	-41,2	-44,1
Nachrichtlich:										
LULUCF	-31,3	-12,1	-16,4	-14,5	-26,6	-26,9	29,5	11,3	19,0	18,8
Internationaler Luft- und Seeverkehr	18,6	30,1	32,5	34,7	36,0	34,7	34,6	36,4	37,8	38,3
Gesamt inkl. nachrichtlich	1238,9	1011,2	958,9	929,7	903,6	866,1	910,8	858,8	792,9	756,4
Änderung ggü. 1990 in %	0,0	-18,4	-22,6	-25,0	-27,1	-30,1	-26,5	-30,7	-36,0	-38,9

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

Aufgrund laufender methodischer Verbesserungen und Aktualisierungen im deutschen Treibhausgasinventar können die historischen Werte von den Angaben im Klimaschutzplan 2050 abweichen.

*Werte für 2017 und 2018 aus aktuellen Inventardaten (UBA 2020a).

Tabelle 137 beschreibt die Emissionsentwicklung im Referenzszenario in den vom Emissionshandel (ETS) und in den von der Effort Sharing Regulation (ESR)¹²³ erfassten Sektoren. Bis 2030 gehen die Emissionen von stationären Anlagen im Emissionshandel um rund 31 % gegenüber dem Jahr 2005 zurück. Die Emissionen in den von der ESR erfassten Sektoren sinken bis 2030 um rund 21 % gegenüber 2005.¹²⁴ Das Minderungsziel im Rahmen der ESR ist derzeit -38 % bis 2030 gegenüber 2005. Dies entspricht einer Reduktion der Gesamtemissionen auf 296 Mio. t CO₂e. im Jahr 2030. Damit wird das ESR-Minderungsziel im Referenzszenario deutlich verfehlt.

Die Berechnung der Emissionen der stationären Anlagen, die vom Emissionshandel erfasst werden, erfolgt, indem für die einzelnen CRF-Kategorien¹²⁵ abgeschätzt wird, zu welchem Anteil sie vom Emissionshandel erfasst werden. Hier treten naturgemäß Ungenauigkeiten auf, da die Modellierung nicht emissionshandelspflichtige Anlagen abbildet, sondern Inventarkategorien.

Tabelle 137: Emissionsentwicklung im stationären Emissionshandel und im ESR-Sektor im Referenzszenario (REF), 1990-2035

	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e						
Emissionen stationärer ETS ^a	518,9	478,9	452,9	402,4	400,7	360,0	350,5
Emissionen ESR ^b	471,6	461,3	454,1	442,1	408,5	374,2	346,6
Summe ESR und stationärer ETS ^c	990,5	940,2	907,0	844,6	809,1	734,3	697,1
Stationärer ETS ggü. 2005	0,0 %	-7,7 %	-12,7 %	-22,5 %	-22,8 %	-30,6 %	-32,5 %
ESR ggü. 2005	0,0 %	-2,2 %	-3,7 %	-6,2 %	-13,4 %	-20,6 %	-26,5 %

¹²³ Bis 2020 Effort Sharing Decision (ESD).

¹²⁴ Die Minderungsverpflichtungen der Mitgliedstaaten wurden in absolute Emissionsbudgets umgerechnet, um den seit 2008 erfolgten Veränderungen in der Zuordnung der verschiedenen Quellbereiche zum Geltungsbereich der Effort Sharing-Entscheidung und methodischen Änderungen bei der Inventarberechnung gerecht zu werden.

¹²⁵ Beim sogenannten Common Reporting Format (CRF) handelt es sich um die offiziellen Inventarberichtstabellen unter der Klimarahmenkonvention. Die CRF-Kategorien weichen von den Sektorkategorien des Klimaschutzplans ab.

	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
Zielpfad ESD; ESR (vorläufig)	---	---	452,4	410,9	369,6	296,2	---
Abweichung vom Zielpfad*	---	---	1,7	31,2	38,9	78,0	---
NF ₃ (außerhalb von ESD und ETS) ^d	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Quelle: (UBA 2018b, 2018c), (European Environment Agency (EEA) 2019), (European Commission (EC) 2013), (European Commission (EC) 2017), (Öko-Institut 2019), Berechnungen des Öko-Institut

Anmerkung: ^a Vom ETS erfasste Emissionen in der seit 2013 gültigen Abgrenzung. ^b Jahre 2005-2016 aus Konsistenzgründen (Vergleich mit Daten für 2020-2035) mit CRF-Kategorien berechnet; in der ab 2013 gültigen ETS-Abgrenzung. Entspricht nicht dem Basiswert für das Minderungsziel unter der Effort Sharing-Entscheidung. ^c Diese Summe ist kleiner als die nationalen Gesamtemissionen, da CO₂-Emissionen des nationalen Flugverkehrs sowie sämtliche NF₃-Emissionen weder vom stationären ETS noch ESD erfasst sind (jedoch von der ESR). ^d NF₃-Emissionen sind von ESR, jedoch nicht von ESD und ETS erfasst.

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

13.2 Ergebnisse Klimaschutzprogramm 2030 (Jan 2020)

Tabelle 138 stellt die Entwicklung der absoluten Treibhausgasemissionen durch die Wirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (KSPr (Jan 2020)) dar. Die Berechnungen ergeben eine gesamte Treibhausgasminderung von rund 32,6 % auf 844 Mio. t CO₂e im Jahr 2020, womit das Ziel der Bundesregierung (Minderung von 40 %) nicht erreicht wird. Im Jahr 2030 ergibt sich eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 51,0 % auf 614 Mio. t CO₂e, womit das Klimaziel der Bundesregierung von einer Minderung um mindestens 55 % (543 Mio. t CO₂e (56,6 %) gemäß Anlage 2 zu § 4 des Bundes-Klimaschutzgesetzes) verfehlt wird. Im Jahr 2035 bewirkt das Klimaschutzprogramm eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 59,6 % auf 506 Mio. t CO₂e.

Im LULUCF-Sektor nimmt die Senkenfunktion im Lauf der Zeit deutlich ab; wie im Referenzszenario stellt dieser Sektor ab dem Jahr 2020 eine Treibhausgasquelle dar. Die Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr nehmen im Projektionszeitraum ebenfalls zu.

Tabelle 138: Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

Sektor	1990	2005	2010	2016	2017*	2018*	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e									
Energiewirtschaft	466,4	397,4	369,4	343,4	322,5	305,1	299,5	241,0	186,1	132,1
Industrie	283,8	191,6	188,5	188,2	197,7	194,9	174,9	160,7	143,4	133,0
Gebäude	209,7	153,9	148,5	130,0	123,4	116,6	124,8	105,4	86,8	69,3
Verkehr	163,3	159,9	153,0	165,6	167,9	162,3	166,3	150,0	128,4	103,7
Landwirtschaft	90,0	69,2	68,7	71,8	72,6	69,8	69,6	67,1	64,1	64,0
Abfallwirtschaft und Sonstiges	38,4	21,2	14,6	10,5	10,2	9,7	8,6	6,6	4,9	3,8
Gesamt	1251,6	993,1	942,8	909,4	894,3	858,4	843,9	730,9	613,7	505,9

Sektor	1990	2005	2010	2016	2017*	2018*	2020	2025	2030	2035
Änderung ggü. 1990 in %	0,0	-20,7	-24,7	-27,3	-28,8	-31,5	-32,6	-41,6	-51,0	-59,6
Nachrichtlich										
LULUCF	-31,3	-12,1	-16,4	-14,5	-26,6	-26,9	29,5	9,5	16,3	15,2
Internationaler Luft- und Seeverkehr	18,6	30,1	32,5	34,7	36,0	34,7	34,5	35,9	37,3	37,6
Änderung ggü.1990										
Gesamt inkl. nachrichtlich	1238,9	1011,2	958,9	929,7	903,6	866,1	907,9	776,4	667,3	558,7
Änderung ggü. 1990 in %	0,0 %	-18,4	-22,6	-25,0	-27,1	-30,1	-26,7	-37,3	-46,1	-54,9

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

Aufgrund laufender methodischer Verbesserungen und Aktualisierungen im deutschen Treibhausgasinventar können die historischen Werte von den Angaben im *Klimaschutzplan 2050* abweichen.

*Werte für 2017 und 2018 aus aktuellen Inventardaten (UBA 2020a).

Tabelle 139 beschreibt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 in den vom Emissionshandel (ETS) und in den von der Effort Sharing Regulation (ESR) erfassten Sektoren. Bis 2030 gehen die Emissionen von stationären Anlagen im Emissionshandel um 48 % gegenüber dem Jahr 2005 zurück. Die Emissionen in den von der ESR erfassten Sektoren sinken bis 2030 um 27 % gegenüber 2005 auf 343 Mio. t CO₂e, womit das Minderungsziel (-38 % bzw. 296 Mio. t CO₂e) wie im Referenzszenario deutlich verfehlt wird.¹²⁶

Tabelle 139: Emissionsentwicklung im stationären Emissionshandel und im ESR-Sektor im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr (Jan 2020)), 1990-2035

	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
	Mio. t CO ₂ e						
Emissionen stationärer ETS ^a	518,9	478,9	452,9	400,8	332,9	269,1	208,5
Emissionen ESR ^b	471,6	461,3	454,1	440,9	396,0	342,5	295,4
Summe ESR und stationärer ETS^c	990,5	940,2	907,0	841,7	728,9	611,6	503,8
<i>Zielpfad ESD; ESR (vorläufig)</i>	---	---	452,4	410,9	370,8	296,2	---
Abweichung vom ESD/ESR-Zielpfad*	---	---	1,7	30,0	25,2	46,3	---
<i>Stationärer ETS ggü. 2005</i>	0,0 %	-7,7 %	-12,7 %	-222,8 %	-35,9 %	-48,1 %	-59,8 %
<i>ESR ggü. 2005</i>	0,0 %	-2,2 %	-3,7 %	-6,5 %	-16,0 %	-27,4 %	-37,4 %
NF ₃ (außerhalb von ESD und ETS) ^d	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Quelle: (UBA 2018b, 2018c), (European Environment Agency (EEA) 2019), (European Commission (EC) 2013), (European Commission (EC) 2017), (Öko-Institut 2019), Berechnungen des Öko-Institut

¹²⁶ Im Jahr 2019 lagen die Gesamtemissionen in Deutschland nach vorläufigen Zahlen des UBA bei rund 806 Mio. t CO₂e. Die stationären Emissionen im EU ETS beliefen sich nach Angaben der DEHSt auf rund 363 Mio. t CO₂e. Damit wurden die für 2020 modellierten Emissionen im Jahr 2019 bereits unterschritten.

Anmerkung: ^a Vom ETS erfasste Emissionen in der seit 2013 gültigen Abgrenzung. ^b Jahre 2005-2016 aus Konsistenzgründen (Vergleich mit Daten für 2020-2035) mit CRF-Kategorien berechnet; in der ab 2013 gültigen ETS-Abgrenzung. Entspricht nicht dem Basiswert für das Minderungsziel unter der Effort Sharing-Entscheidung. ^c Diese Summe ist kleiner als die nationalen Gesamtemissionen, da CO₂-Emissionen des nationalen Flugverkehrs sowie sämtliche NF₃-Emissionen weder vom stationären ETS noch ESD erfasst sind (jedoch von der ESR). ^d NF₃-Emissionen sind von ESR, jedoch nicht von ESD und ETS erfasst.

*Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt, Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

13.3 Vergleich der Szenarien

In diesem Kapitel werden die Treibhausgasemissionen der betrachteten Szenarien einander gegenübergestellt – zunächst pro Sektor, anschließend pro Gas. Außerdem wird die Entwicklung der Emissionen mit den Zielen des Bundes-Klimaschutzgesetzes und der EU-Klimaschutzverordnung verglichen.

Die Treibhausgasemissionen pro Sektor in Referenzszenario und im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 werden in Tabelle 140 einander gegenübergestellt. Die Resultate sind für das Jahr 2030 pro Sektor aufgelistet. Neben den Werten für die beiden Szenarien ist in der Tabelle auch die Differenz dargestellt, d.h. die zusätzliche Einsparung im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 gegenüber der Referenz.

Diese zusätzliche Einsparung ist im Sektor Energiewirtschaft mit 82,9 Mio. t CO₂e (rund 31 %) am größten, gefolgt vom Sektor Verkehr mit 21,9 Mio. t CO₂e (rund 15 %). Insgesamt ergeben sich im Szenario Klimaschutzprogramm 2030 um 122,8 Mio. t CO₂e (rund 17 %) geringere Emissionen im Jahr 2030 als im Referenzszenario.

Allerdings reichen diese zusätzlichen Einsparungen in den meisten Sektoren nicht aus, um die Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes einzuhalten. In Tabelle 140 sind auch die jeweiligen Zielwerte des Bundes-Klimaschutzgesetzes dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die emissionsintensiven Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude und Verkehr die Sektorziele für 2030 deutlich verfehlen.

In der Energiewirtschaft beträgt die Zielverfehlung trotz Reduktion der am Markt befindlichen Braun- und Steinkohlekapazitäten und der Einhaltung der angestrebten Ausbauziele erneuerbarer Energien rund 11 Mio. t CO₂e im Jahr 2030. Die Zielverfehlung im Gebäudesektor und im Verkehrssektor beträgt im Jahr 2030 rund 17 Mio. t CO₂e bzw. 33 Mio. t CO₂e. Damit wird deutlich, dass trotz der Einführung einer CO₂-Bepreisung durch das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) die beschlossenen Klimaschutzmaßnahmen in diesen beiden Sektoren nicht ausreichen, um die jeweiligen Ziele zu erfüllen.

Tabelle 140: Vergleich der Szenarienergebnisse für das Jahr 2030 mit den Klimaschutzzielen im Bundes-Klimaschutzgesetz in Mio. t CO₂e

Sektor	Sektorziele ¹²⁷	Geschätzte Treibhausgasemissionen 2030		
		REF	KSPR (Jan 2020)	Zusätzliche Einsparung ggü. REF
Mio. t CO ₂ e				
Energiewirtschaft	175,0	269,0	186,1	82,9
Industrie	140,0	152,4	143,4	9,0
Gebäude	70,0	91,2	86,8	4,4
Verkehr	95,0	150,3	128,4	21,9
Landwirtschaft	58,0	67,8	64,1	3,7
Abfallwirtschaft und Sonstiges	5,0	5,8	4,9	0,9
Gesamt	543,0	736,5	613,7	122,8
LULUCF	0,0	19,0	16,3	2,7

Quelle: Berechnungen Öko-Institut. Der LULUCF-Sektor wird nach der EU-Verordnung 2018/841 (LULUCF-Verordnung) separat betrachtet.

Mit Blick auf die Ziele im Rahmen der EU-Klimaschutzverordnung (ESR) zeigt sich, dass der Zielpfad mit dem Klimaschutzprogramm 2030 nicht erreicht wird (Tabelle 141 und Abbildung 58). Zu Beginn der Dekade (2020) ergibt sich, noch unter der bis 2020 geltenden Effort Sharing Decision (ESD), eine Zielverfehlung von insgesamt 30 Mio. t CO₂e. Im Verlauf der Dekade wächst die Zielverfehlung deutlich an und erreicht im Jahr 2030 46 Mio. t CO₂e.

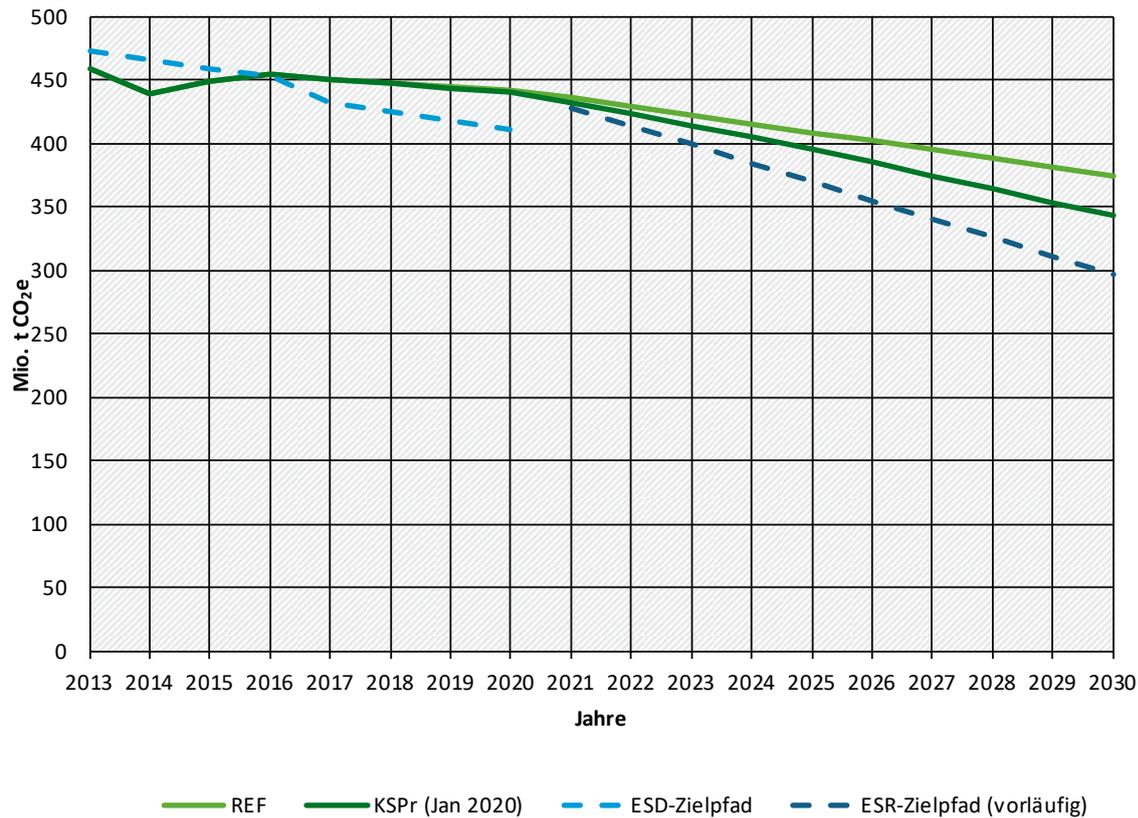
Tabelle 141: Vergleich der Szenarienergebnisse mit den Klimaschutzzielen für den ESR-Bereich

Jahr	Emissionsziel	Modellierte Emissionen		Abweichung vom Emissionsziel	
		REF	KSPR (Jan 2020)	REF	KSPR (Jan 2020)
Mio. t CO ₂ e					
2020	ESD-Ziel:	410,9	442,1	31,2	30,0
2025	ESR-Ziel (vorläufige Zahl):	369,6	408,5	37,7	25,2
2030	ESR-Ziel (vorläufige Zahl):	296,2	374,2	78,0	46,3

¹²⁷ Laut dem Entwurf des Bundes-Klimaschutzgesetzes (Bundesregierung 2019b), Anlage 2 zu § 4, entsprechen die zulässigen Jahremissionsmengen dem unteren Rand der Sektorziele für 2030. Für den LULUCF-Sektor werden im Bundes-Klimaschutzgesetz keine Sektorziele ausgewiesen. Laut Klimaschutzplan soll im LULUCF-Sektor die Senkenleistung jedoch bis 2030 erhalten bleiben. Das Bundes-Klimaschutzgesetz weist ebenfalls auf Maßnahmen zum Erhalt der Nettosenke hin (§9 (1)). Aus diesen Vorgaben ergibt sich eine Nettoemission für den Sektor von höchstens 0 Mio. t CO₂e.

Quelle: (European Commission (EC) 2013), (European Commission (EC) 2017), (Öko-Institut 2019), Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 58: Treibhausgasemissionen im ESR-Sektor



Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Berechnungen Öko-Institut basierend auf den Emissionen der Sektoren, die im Rahmen der Effort Sharing Decision (ESD) für 2016, 2017 und 2018 erfasst werden, siehe auch (Öko-Institut 2019).

In Tabelle 142 ist die Entwicklung der Emissionen in den beiden Szenarien pro Gas dargestellt. Der größte Unterschied zwischen den beiden Szenarien ergibt sich bei den CO₂-Emissionen, sowohl relativ als auch absolut, da die Maßnahmen mit den größten Effekten auf die Reduktion der CO₂-Emissionen abzielen, insbesondere in der Energiewirtschaft und im Verkehr.

Bei den CH₄-Emissionen ergeben sich Unterschiede aufgrund von zusätzlichen Maßnahmen im Energie- und im Landwirtschaftssektor sowie in der Abfallwirtschaft. In den restlichen Sektoren bestehen nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Szenarien. Die N₂O-Emissionen reduzieren sich im Szenario KSPr (Jan 2020) hauptsächlich durch weitere Maßnahmen in der Energiewirtschaft und in der Landwirtschaft.

Die Emissionen fluorierter Gase bleiben zwischen den beiden Szenarien unverändert, da im Klimaschutzprogramm 2030 keine zusätzlichen F-Gas-spezifischen Maßnahmen vorgegeben sind. Die Summe aller Treibhausgasemissionen (ohne LULUCF-Sektor und internationalen Verkehr) ist in Tabelle 142 ebenfalls dargestellt. Der Unterschied zwischen den beiden Szenarien nimmt von 3,0 Mio. t CO₂e im Jahr 2020 auf 122,8 Mio. t CO₂e im Jahr 2030 zu.

Tabelle 142: Entwicklung der gesamten Treibhausgas-Emissionen (ohne LULUCF und internationalen Verkehr) zwischen 1990 und 2035 im Vergleich der Szenarien

		1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
		Mio. t CO ₂ e							
CO₂-Emissionen									
	Entwicklung 1990 – 2016	1.053,0	867,2	833,7	801,8				
	REF					746,5	717,8	650,5	614,8
	KSPr (Jan 2020)					744,3	640,5	534,3	429,5
CH₄-Emissionen									
	Entwicklung 1990 – 2016	120,2	68,4	58,1	54,4				
	REF					50,5	48,0	46,6	45,7
	KSPr (Jan 2020)					49,8	45,9	42,4	40,2
N₂O-Emissionen									
	Entwicklung 1990 – 2016	65,0	43,3	36,6	37,9				
	REF					35,6	35,0	34,2	34,1
	KSPr (Jan 2020)					35,6	34,0	31,8	31,3
Emissionen fluoriertes Gase									
	Entwicklung 1990 – 2016	13,4	14,2	14,4	15,3				
	REF					14,2	10,6	5,2	4,8
	KSPr (Jan 2020)					14,2	10,6	5,2	4,8
Summe THG-Emissionen									
	Entwicklung 1990 – 2016	1.251,6	993,1	942,8	909,4				
	REF					846,8	811,4	736,5	699,3
	KSPr (Jan 2020)					843,8	730,9	613,7	505,9
Summe THG-Emissionen		Veränderung ab 1990 in %							
	Entwicklung 1990 – 2016		-20,7	-24,7	-27,3				
	REF					-32,3	-35,2	-41,2	-44,1

	1990	2005	2010	2016	2020	2025	2030	2035
KSPr (Jan 2020)					-32,6	-41,6	-51,0	-59,6
Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 2005 in %							
Entwicklung 2005 – 2016			-5,1	-8,4				
REF					-14,7	-18,3	-25,8	-29,6
KSPr (Jan 2020)					-15,0	-26,4	-38,2	-49,1

Quelle: (UBA 2018b, 2018c), Modellrechnungen Öko-Institut

Literaturverzeichnis

- Achtnicht, Martin (2010): Do environmental benefits matter? A choice experiment among house owners in Germany ZEW. ECONSTAR-ZEW (Discussion Papers 10–094).
- AGEB (2008-2018a): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Jahre 1990–2016. Stand 2008 für die Jahre 1990-2002, Stand 2012 für die Jahre 2003-2010, Stand 2013 für das Jahr 2011, Stand 2014 für das Jahr 2012, Stand 2015 für das Jahr 2013, Stand 2016 für das Jahr 2014, Stand 2017 für das Jahr 2015, Stand 2018 für das Jahr 2016. AG Energiebilanzen (AGEB). Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2016.html>.
- AGEB (2008-2018b): Satellitenbilanz Erneuerbare Energien, Jahre 2000–2016. Stand 2008 für die Jahre 2000-2002, Stand 2010 für die Jahre 2003-2008, Stand 2012 für die Jahre 2009-2010, Stand 2013 für das Jahr 2011, Stand 2014 für das Jahr 2012, Stand 2015 für das Jahr 2013, Stand 2016 für das Jahr 2014, Stand 2017 für das Jahr 2015, Stand 2018 für das Jahr 2016. AG Energiebilanzen (AGEB). Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2016.html>.
- AGEB (2018): Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern.
- Agora Energiewende; Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Agora Energiewende; Wuppertal Institut. Online verfügbar unter https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 28.11.2019.
- Allianz pro Schiene (28.10.2019): Mehr Schiene unter Strom für mehr Klimaschutz, zuletzt geprüft am 11.04.2020.
- Bach, M.; Klement, L.; Häußermann, U. (2016): Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von Nitratreinträgen in die Gewässer auf Basis regionalisierter Stickstoff-Überschüsse. Teil I: Beitrag zur Entwicklung einer Ressortübergreifenden Stickstoffstrategie. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA).
- Banfi, Silvia, Mehdi Farsi, Massimo Filippini, and Martin Jakob (Retrieved 2010): Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings. Hg. v. Energy Economics 30(2):503–516. Online verfügbar unter <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140988306000764>.
- Barthel, C.; Franke, M.; Müller, P.; Dittmar, C. (2010): Analyse der Vorstudien für Wohnungslüftung und Klimageräte. Veröffentlichung im Rahmen des Projektes "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes) Arbeitspaket 14. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA).
- BBSR (2015): Wohnungsmarktprognose 2030. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bonn.
- BDEW (2016): Strompreisanalyse Mai 2016 - Haushalte und Industrie. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
- BDEW (2018): Kraftwerkspark in Deutschland. Aktueller Kraftwerkspark, Stromerzeugungsanlagen im Bau und in Planung, absehbare Stilllegungen konventioneller Kraftwerke. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Berlin (info). Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/20180427_Fakten-Argumente-Kraftwerkspark-Deutschland.pdf.
- Biere, David (2015): Modellgestützte Szenario-Analyse der langfristigen Erdgasnachfrageentwicklung der deutschen Industrie. Dissertation. Hg. v. Fakultät für Wirtschaftswissenschaften des Karlsruher Institut of Technology (KIT). Karlsruhe.
- BMEL (2016): Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre - Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052. Online verfügbar unter http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Wald-Rohholzpotential-40Jahre.pdf?__blob=publicationFile.
- BMF (2019): Solide Finanzierung für wirksamen und sozial ausgewogenen Klimaschutz. Überblick Wirtschaftsplan Energie- und Klimafonds. Stand: 1. Oktober 2019. Online verfügbar unter <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Pressemitteilungen/Finanzpolitik/2019/10/2019-10-02-PM-Klimaschutz.html>, zuletzt geprüft am 10.07.2020.
- BMU (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf, zuletzt geprüft am 01.10.2019.
- BMVI (22.05.2018): Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO₂-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs. FörderRL energieeffiziente Nfz. Fundstelle: BAnz AT 08.06.2018 B2, zuletzt geprüft am 03.03.2020.
- BMVI (2019): BMVI erhält zusätzlich rund 6 Milliarden Euro für Klimaschutz-Maßnahmen. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/klimaschutzmassnahmen.html>, zuletzt geprüft am 20.06.2020.
- BMWi (2016): Zahlen und Fakten Energiedaten. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin.
- BMWi (2018): Frühjahrsprojektion der Bundesregierung: Altmaier: Der Aufschwung geht weiter! Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2018/20180425-fruehjahrsprojektion-der-bundesregierung-altmaier-der-aufschwung-geht-weiter.html>, zuletzt geprüft am 22.06.2018.
- BMWi (2019): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). (Stand August 2019).
- Braun, Frauke G. (2010): Determinants of households' space heating type: A discrete choice analysis for German households. Energy Policy 38(10):5493–5503. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.002>.

- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2019): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2018. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung, Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung, zuletzt geprüft am 10.04.2020.
- Bundesbank (2018): Perspektiven der deutschen Wirtschaft - Gesamtwirtschaftliche Vorausschätzungen für die Jahre 2018 und 2019 mit einem Ausblick auf das Jahr 2020. Online verfügbar unter https://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Downloads/Veroeffentlichungen/Monatsberichtsauftaetze/2018/2018_06_prognose.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 22.06.2018.
- Bundeskartellamt (2017): Sektoruntersuchung Zement und Transportbeton.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Umweltbundesamt (UBA) (02.04.2019): Klimabilanz 2018: 4,5 Prozent weniger Treibhausgasemissionen. Pressemitteilung Nr. 065/18. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/pressemitteilung/8465/>, zuletzt geprüft am 09.05.2019.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (13.02.2020): Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus), zuletzt geprüft am 16.03.2020.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018): Energiedaten: Gesamtausgabe. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>, zuletzt aktualisiert am 23.01.2018, zuletzt geprüft am 24.08.2018.
- Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt (2015): Monitoringbericht 2015. Bundesnetzagentur.
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (2018): Kraftwerksliste Bundesnetzagentur - Stand 19.11.2018. Bundesnetzagentur (BNetzA).
- Bundesrechnungshof (2018): Abschließende Mitteilung an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über die Prüfung der Gewährung von Zuschüssen zum Kauf von elektrisch betriebenen Fahrzeugen. Bonn, zuletzt geprüft am 10.10.2019.
- Bundesregierung (2013): Projektionsbericht 2013 gemäß Entscheidung 280/2004/EG. Hg. v. BMUB.
- Bundesregierung (2015): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV). Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1789) geändert worden ist. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/EnEV.pdf.
- Bundesregierung (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Neuaufgabe 2016.
- Bundesregierung (2017): Projektionsbericht 2017 für Deutschland. gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/klima-klimaschutz-download/artikel/projektionsbericht-der-bundesregierung-2017/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=217, zuletzt geprüft am 08.09.2017.
- Bundesregierung (2019a): Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG). Vom 12. Dezember 2019. In: *Bundesgesetzblatt* 2019 (Teil I Nr. 50).
- Bundesregierung (2019b): Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften. Vom 12. Dezember 2019. In: *Bundesgesetzblatt (BGBl)* 2019 (Teil I Nr. 48).
- Bundesregierung (2019c): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 16.12.2019.
- Bundesregierung (2019d): Projektionsbericht 2019 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Online verfügbar unter https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envxw7wq/.
- Bundesregierung (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Schlüsselement der Energiewende. Online verfügbar unter <https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>, zuletzt geprüft am 26.06.2020.
- Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2017): Projektionsbericht 2017 für Deutschland. gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013.
- Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (Hg.) (2019): Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung. Ziele und Maßnahmen für den Ladeinfrastrukturaufbau bis 2030. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/masterplan-ladeinfrastruktur.html>.
- Bundestag (2020): Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz). Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/kohleausg/index.html>, zuletzt geprüft am 01.10.2020.
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (2008): Die Zukunft der digitalen Consumer Electronics. Berlin.
- BWE (17.01.2018): Energiewende beschleunigen - Ausbau der Offshore-Windenergie läuft bis 2020 nach Plan. Online verfügbar unter <https://www.wind-energie.de/presse/pressemitteilungen/detail/energiewende-beschleunigen-ausbau-der-offshore-windenergie-laeuft-bis-2020-nach-plan/>.
- CEMCAP (2018): CEMCAP study. Online verfügbar unter <https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/>.
- Claudy, Marius C., Claus Michelsen, and Aidan O'Driscoll (2011): The diffusion of microgeneration technologies—assessing the influence of perceived product characteristics on home owners' willingness to pay. *Energy Policy* 1–11. Retrieved June 28, 2013. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.018>.
- Cuhls, C.; Mähl, B.; Clemens, J. (2015a): Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen, UBA Texte 39/2015, FKZ 206 33 326 & 3709 44 320. Umweltbundesamt.

- Cuhls, Carsten; Mähl, Birte; Clemens, Joachim (2015b): Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau (Texte 39/2015).
- de Jong, Gerard; Schroten, Arno; van Essen, Huib; Otten, Matthijs; Bucci, Pietro (2010): Price sensitivity of European road freight transport – towards a better understanding of existing results. significance; CE Delft, zuletzt geprüft am 04.10.2016.
- Dechema (2019): Roadmap Chemie 2050.
- Deutscher Bundestag (2015): Gesetz zur Finanzierung der Beendigung des subventionierten Steinkohlenbergbaus zum Jahr 2018. SteinkohleFinG, vom 31.08.2015. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/steinkohlefin/index.html>, zuletzt geprüft am 23.02.2017.
- Deutscher Bundestag (2016): Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Kostendeckung im öffentlichen Personennahverkehr. Drucksache 18/8180, zuletzt geprüft am 12.07.2016.
- Deutscher Bundestag (12.12.2019): Gesetz zur weiteren steuerlichen Förderung der Elektromobilität und zur Änderung weiterer steuerlicher Vorschriften. In: Bundesgesetzblatt, zuletzt geprüft am 18.06.2020.
- Deutscher Bundestag (21.12.2019): Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 im Steuerrecht. In: Bundesgesetzblatt, zuletzt geprüft am 18.06.2020.
- Deutscher Bundestag (06.03.2020a): Drittes Gesetz zur Änderung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes, GVFG. In: Bundesgesetzblatt, zuletzt geprüft am 18.06.2020.
- Deutscher Bundestag (06.03.2020b): Fünftes Gesetz zur Änderung des Regionalisierungsgesetzes, RegG. In: Bundesgesetzblatt, zuletzt geprüft am 18.06.2020.
- Diefenbach, Nikolaus; Cischinsky, Holger; Rodenfels, Markus; Clausnitzer, Klaus-Dieter (2010): Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Darmstadt.
- DIW (2014): Data Documentation 72. Electricity Sector Data for Policy-Relevant Modeling: Data Documentation and Applications to the German and European Electricity Markets. Unter Mitarbeit von Jonas Egerer, Clemens Gerbaulet, Richard Ihlenburg, Friedrich Kunz, Benjamin Reinhard, Christian von Hirschhausen, Alexander Weber, Jens Weibezahn. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10419/95950>.
- DIW (2019): Strikte Mindestabstände bremsen den Ausbau der Windenergie. In: *DIW Wochenbericht* (48).
- Drösler et al. (2012): Beitrag ausgewählter Schutzgebiete zum Klimaschutz und dessen monetäre Bewertung (BfN-Skript 328).
- EC (2016): Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2017 Final, 14/06/2016.
- EC (2018): Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2019 Final, 15/06/2016. European Commission (EC).
- EIA (2017): Annual Energy Outlook 2017 with projections to 2050. Online verfügbar unter [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2017).pdf), zuletzt geprüft am 22.06.2018.
- Eisland, R. (2016): Long-term energy demand in the German residential sector. Baden-Baden.
- EU Commission (2018): Review of Regulation 206/2012 and 626/2011. Air conditioners and comfort fans. Task 3 Report. Final Version. Online verfügbar unter <https://www.eco-airconditioners.eu/download>.
- EuP Preparatory Studies Lot 10 (2008): Residential room conditioning appliances (airco and ventilation). Final Report. Online verfügbar unter <http://www.ecoaircon.eu/>.
- European Commission (2018): Impacts of Technological Innovations for the Innovation Fund.
- European Commission Economic and Financial Affairs European Economy Institutional Papers (2017): The 2018 ageing report. Underlying assumptions & projection methodologies. Luxembourg: Publication Office of the European Union (European economy Institutional paper, 065 (November 2017)), zuletzt geprüft am 17.12.2018.
- European Commission (EC) (2013): Commission decision of 26 March 2013 on determining Member States' annual emission allocations for the period from 2013 to 2020 pursuant to Decision No 406/2009/EC of the European Parliament and of the Council (2013/162/EZ).
- European Commission (EC) (2016): EU Reference Scenario 2016 Main Results. Brussels.
- European Commission (EC) (2017): Commission Decision (EU) 2017/1471 of 10 August 2017 amending Decision 2013/162/EU to revise Member States' annual emission allocations for the period from 2017 to 2020.
- European Environment Agency (EEA) (2019): EU Emissions Trading System (ETS) data viewer. Hg. v. European Environment Agency (EEA). Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1>, zuletzt geprüft am 28.10.2019.
- European Parliament (EP); European Council (2019): Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. (EU) 2019/631, zuletzt geprüft am 23.12.2019.
- EWI; Prognos; gws (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Projekt Nr. 57/12.
- Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Wern, B.; Pertagnol, J.; Baur, F. et al. (2019): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau (115/2019).

- Fehrenbach et al. (2008): Kriterien einer nachhaltigen Bioenergienutzung im globalen Maßstab. Unter Mitarbeit von Fehrenbach H., Giegrich J, Reinhardt G., Sayer U., Gretz M., Lanje K., Schmitz J. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). IFEU; FSC; Germanwatch. Heidelberg, Freiburg, Bonn. Online verfügbar unter http://www.ifeu.org/nachhaltigkeit/pdf/summary_%20criteria_%20sustainable_%20biomass_DE.pdf, zuletzt geprüft am 07.07.2018.
- FhG IFAM (2015): Wirkungen von Förderprogrammen der KfW im Bereich Nichtwohngebäude der Förderjahre 2011 bis 2014.
- Fichtner et al. (2011): Evaluierung des Marktanreizprogramms für erneuerbare Energien: Ergebnisse der Förderung für das Jahr 2010.
- Fichtner et al. (2012): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2009 bis 2011.
- Fichtner et al. (2014a): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2012 bis 2014 - Evaluierung des Förderjahres 2012.
- Fichtner et al. (2014b): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2012 bis 2014 - Evaluierung des Förderjahres 2013.
- Fichtner et al. (2016): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2012 bis 2014 - Evaluierung des Förderjahres 2014.
- Fleiter, Tobias; Fehrenbach, Daniel; Worrell, Ernst; Eichhammer, Wolfgang (2012): Energy efficiency in the German pulp and paper industry - A model-based assessment of saving potentials. In: *Energy* 40 (1), S. 84–99. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421200120X>.
- Fleiter, Tobias; Hirzel, Simon; Jakob, Martin; Barth, Jan; Quandt, Laura; Reitze, Felix.; Toro, Felipe (Hg.) (2010): Electricity demand in the European service sector: a detailed bottom-up estimate by sector and by end-use. Frankfurt (Konferenzband der IEECB, 13-14.04.2010).
- Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Herbst, Andrea; Elsland, Rainer; Klingler, Anna-Lena; Manz, Pia; Eidelloth, Stefan (2018): A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector. The FORECAST model. In: *Energy Strategy Reviews* (22), S. 237–254. DOI: 10.1016/j.esr.2018.09.005.
- Fleiter, Tobias; Schломann, Barbara; Eichhammer, Wolfgang (Hg.) (2013): Energieverbrauch und CO2 Emissionen industrieller Prozesstechniken - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Fraunhofer IZM (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland: Abschlussbericht.
- Fraunhofer IZM (Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration), Fraunhofer ISI (Institut für System- und Innovationsforschung) (2009): Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Studie im Auftrag des BMWi. Berlin, Karlsruhe.
- Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) (2002-2010): GfK Retail Panel Haushaltsgeräte Deutschland 1998-2008 – Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschine, Kühlschrank, Gefrierschrank, Kochen und Klimaanlage. Nürnberg.
- Goldie-Scot, Logan (2019): A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. BloombergNEF (BNEF). Online verfügbar unter <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>, zuletzt geprüft am 01.04.2020.
- Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Dämmgen, U.; Döring, U.; Wulf, S.; Eurich-Menden, B. et al. (2018): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2016 : report on methods and data (RMD) submission 2018. Braunschweig (Thünen Report, 57).
- Harthan, Ralph Oliver (2015): Integration of Renewable Energies into the German Power System and Their Influence on Investments in New Power Plants. Integrated Consideration of Effects on Power Plant Investment and Operation. Dissertation. Online verfügbar unter [http://www.qucosa.de/recherche/frontdoor/?tx_slubopus4frontend\[id\]=16011](http://www.qucosa.de/recherche/frontdoor/?tx_slubopus4frontend[id]=16011), zuletzt geprüft am 14.07.2016.
- Hautzinger, H.; Mayer, K.; Helms, M.; Kern, C.; Wiesenhütter, M.; Haag, G.; Binder, J. (2004): Analyse von Änderungen des Mobilitätsverhaltens - insbesondere der Pkw-Fahrleistung - als Reaktion auf geänderte Kraftstoffpreise. des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn.
- Hibscher, C. W.; Davis DH; Davies PRW; Davies MP (2005): TECO: a designer's insight into all-electric melting.
- International Energy Agency (IEA) (2017): World Energy Outlook 2017. Paris.
- IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan. Online verfügbar unter <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, zuletzt geprüft am 14.07.2015.
- IPCC (2013): 2013 Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol (KP Supplement). Geneva. Online verfügbar unter http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/home/2013KPSupplementaryGuidance_inv.html, zuletzt geprüft am 05.11.2014.
- IWU; Fraunhofer IFAM (2013): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2012.
- IWU; Fraunhofer IFAM (2014): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2013.
- IWU; Fraunhofer IFAM (2015): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2014.
- IWU; Fraunhofer IFAM (2017): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2015.
- IWU; Fraunhofer IFAM (2018): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2016.

- KBA (2018): Verkehr in Kilometern. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html, zuletzt geprüft am 2018.
- KBA (2020): Fahrzeugzulassungen (FZ), Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern, Monatsergebnisse, Dezember 2019, FZ 8, zuletzt geprüft am 18.06.2020.
- Knörr, Wolfram; Heidt, Christoph; Schacht, Alexander; Mottschall, Moritz; Schmied, Martin; Leppler, Stephan (2011): Aktualisierung der Emissionsfaktoren und Verkehrsleistungen von Binnenschiffen und Übertragung ins TREMOD-Programm. FKZ 363 01 403. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA), zuletzt geprüft am 14.04.2020.
- Kranzl, Lukas; Hummel, Marcus; Müller, Andreas; Steinbach, Jan (2013): Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments. In: *Energy Policy* 59, S. 44–58.
- Kuramochi, Takeshi; Ramírez, Andrea; Turkenburg, Wim; Faaij, André (2012): Comparative assessment of CO2 capture technologies for carbon-intensive industrial processes. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 38 (1), S. 87–112. DOI: 10.1016/j.pecs.2011.05.001.
- Lutsey, Nic; Nicholas, Michael (2019): Update on electric vehicle costs in the United States through 2030. International Council on Clean Transportation (ICCT) (Working Paper, 2019-06).
- Michelsen, Carl Christian, and Reinhard Madlener (2012): Homeowners' preferences for adopting innovative residential heating systems: A discrete choice analysis for Germany. Hg. v. *Energy Economics* 34(5):1271–1283. Retrieved March 4, 2013. Online verfügbar unter <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140988312001156>.
- Mills, Bradford, and Joachim Schleich (2012): Residential energy-efficient technology adoption, energy conservation, knowledge, and attitudes: An analysis of European countries. Hg. v. *Energy Policy* 49:616–628. Retrieved May 27, 2013. Online verfügbar unter <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421512005897>.
- Müller, Andreas (2015): Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water : A Case Study for the Austrian Building Stock. Technische Universität Wien.
- Müller, Andreas; Biermayr, Peter (2011): Die Zukunft des Wärmebedarfs für Heizung und Brauchwassererwärmung in österreichischen Gebäuden bis 2050. In: *7. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien IEWT. Wien: Energy Economics Group, Vienna University of Technology*, S. 1–17.
- Nordenholz, Falko; Winkler, Christian; Knörr, Wolfram (2016): Verkehrsverlagerungspotential auf den Schienenpersonenverkehr in Deutschland, zuletzt geprüft am 11.04.2020.
- NPM: Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor. Arbeitsgruppe 1 Klimaschutz im Verkehr. Zwischenbericht 03/2019. Online verfügbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2019/03/Zwischenbericht-03_2019-der-AG1-Klimaschutz-der-NPM-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf.
- Öko-Institut (2015): Die Entwicklung der EEG-Kosten bis 2035. Wie der Erneuerbaren-Ausbau entlang der langfristigen Ziele der Energiewende wirkt. Hg. v. Agora. Berlin.
- Öko-Institut (2019): Aktueller Stand der Emissionen – Mai 2019. Unter Mitarbeit von Sabine Gores, Lukas Emele und Jakob Graichen. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/aktueller-stand-der-emissionen-in-deutschland-mai-2019>, zuletzt geprüft am 10.02.2020.
- Öko-Institut; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); Prognos AG; M-Five; Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES); FiBL (2019): Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Folgenabschaetzung-Klimaschutzplan-2050-Endbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 17.01.2019.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2019): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 - Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms. 3. Quantifizierungsbericht. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/download/wissenschaftliche-grundlagen-zum-klimaschutzbericht-2018/>.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES; Thünen-Institut (2020): Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (Kurzbericht). Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerarien IX“)“. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) sowie des Umweltbundesamtes (UBA). Unter Mitarbeit von Ralph O. Harthan, Julia Repenning, Ruth Blanck, Hannes Böttcher, Veit Bürger, Lukas Emele et al. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); IREES. Dessau-Roßlau (UBA Climate Change, 12/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-05_climate-change_12-2020_treibhausgasminderungswirkungen-klimaschutzprogramm-2030.docx_.pdf, zuletzt geprüft am 26.06.2020.
- Öko-Institut et al. (2014): Luftqualität 2020/2030: Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien; Texte 35/2014. Unter Mitarbeit von W. Jörß, L. Emele, M. Scheffler, V. Cook, V. Handke, J. Theloke et al. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT); Johann Heinrich von Thünen-Institut; Stern, Rainer Dr.; Department of Climate, Air and Sustainability (TNO); Universität Stuttgart; Bundesforschungsanstalt für Ländliche Räume, Wald und Fischerei; Institut für Ländliche Räume; Institut für agrarrelevante Klimaforschung. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_35_2014_komplett.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2017.
- Öko-Institut et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Modellierungsrunde. Hg. v. Öko-Institut. Öko-Institut et al. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>, zuletzt geprüft am 28.06.2016.

- Osterburg, Bernhard et. al (2019): Folgenabschätzung für Maßnahmenoptionen im Bereich Landwirtschaft und landwirtschaftliche Landnutzung, Forstwirtschaft und Holznutzung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Hg. v. Thünen-Institut. Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Working Paper 137).
- Parliament and Council of the European Union (2019): Regulation (EU) 2019/1242 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 setting CO₂ emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending Regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2018/956 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC. In: *Official Journal of the European Union* L 198, S. 1–39. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=EN>, zuletzt geprüft am 23.10.2019.
- Perez-Fortes; Tzimas (2016): Techno-economic and environmental evaluation of CO₂ utilisation for fuel production.
- Perez-Fortes et al. (2016): Methanol synthesis using captured CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental assessment.
- Peter, Martin; Bertschmann-Aeppli, Damaris; Zandonella, Remo; Maibach, Markus (2012): Auswirkungen der Einführung der Luftverkehrssteuer auf die Unternehmen des Luftverkehrssektors in Deutschland. Ex-post Analyse nach einem Jahr, im Auftrag für das Bundesministerium der Finanzen. Zusammenfassung Schlussbericht. Infrac. Zürich. Online verfügbar unter http://www.infrac.ch/media/filer_public/d3/de/d3de69df-a4d9-4d4c-9367-60237b62b815/wirkunglvs_sb_infrac_270612_zusammenfassung.pdf.
- Prognos AG; EWI; gws (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Projekt Nr. 12/10. Unter Mitarbeit von M. Schlesinger, P. Hofer, A. Kemmler, A. Kirchner, S. Strassburg, D. Lindenberger et al. Basel/Köln/Osnabrück.
- Prognos AG, EWI, GWS (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Enderbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-enderbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt geprüft am 24.07.2015.
- Rehfeldt, Matthias; Fleiter, Tobias; Worrell, Ernst (2018): Inter-fuel substitution in European industry. A random utility approach on industrial heat demand. In: *Journal of Cleaner Production* (187), S. 98–110. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.179.
- Reichelt (2015): Reichelt Evaluierung des GEST-Modells zur Abschätzung der Treibhausgasemissionen aus Mooren. Masterarbeit, Universität Greifswald.
- Rodriguez, Felipe (2019): CO₂ standards for heavy-duty vehicles in the European Union, zuletzt geprüft am 03.04.2020.
- Rubin, Edward S.; Davidson, John E.; Herzog, Howard (2015): The cost of CO₂ capture and storage. In: *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40, S. 378–400. DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.05.018.
- Scarpa, Riccardo, and Ken Willis (2010): Willingness-to-pay for renewable energy: Primary and discretionary choice of British households' for micro-generation technologies. Hg. v. *Energy Economics* 32(1):129–136. Retrieved. Online verfügbar unter <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140988309001030>.
- Schlomann, B.; Steinbach, J.; Kleeberger, H.; Geiger, B.; Pich, A.; Gruber, E. et al. (2014): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) für die Jahre 2004 bis 2006. Fraunhofer Verlag. Stuttgart.
- Schmidt, T.; Schneider, F.; Leverenz, D.; Hafner, G. (2019): Lebensmittel- abfälle in Deutschland – Baseline 2015. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Report 71). Online verfügbar unter https://www.bmel.de/Shared-Docs/Downloads/Ernaehrung/WvL/TI-Studie2019_Lebensmittelabfaelle_Deutschland-Langfassung.pdf?__blob=publication-File, zuletzt geprüft am 06.04.2020.
- Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. (2018): Entwicklung ausgewählter Energiepreise. Hg. v. Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. Essen, Bergheim. Online verfügbar unter <https://kohlenstatistik.de/17-0-Deutschland.html>, zuletzt geprüft am 18.01.2019.
- Statistisches Bundesamt (2015): Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes. Fachserie 4, Reihe 4.3.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2016a): Brennstoffeinsatz für Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung nach Energieträgern.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2016b): Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung nach Energieträgern.
- Statistisches Bundesamt (StBA) (2010): Produktionsdatenbank (Prodcom). Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://www.eds-destatis.de/de/theme4/prodcom.php>.
- StBA (2014). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsgue-tern/Tabellen/Haushaltsgeraete_D.html;jsessionid=C31652E6733135B52042C3DE401DC823.cae4#tab221342No1.
- StBA (2015): Bevölkerung Deutschlands bis 2060, Ergebnisse der 13. Koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung.
- StBA (2016): Bevölkerung und Erwerbstätigkeit. Bevölkerungsfortschreibung auf Grundlage des Zensus 2011. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden (Fachserie 1 Reihe 1.3).
- StBA (2017a): Aktualisierung der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung - Basis 2015. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/AktualisierungBevoelkerungsvorausberechnung.html>.
- StBA (2017b): Entwicklung der Privathaushalte bis 2035. Ergebnisse der Haushaltsvorausberechnung. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/HaushalteMikrozensus/EntwicklungPrivathaushalte.html>.
- StBA (2018): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Bruttoinlandsprodukt. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/VGR/Inlandsprodukt/Tabellen/Gesamtwirtschaft.html>, zuletzt geprüft am 22.06.2018.

- Steinbach, Jan (2013): Akteurspezifische Untersuchung von Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz und zum Ausbau erneuerbarer Energien im Wohngebäudebereich. In: *Proceedings of the IEWT (8. Internationale Energiewirtschaftstagung) Wien*.
- Steinbach, Jan (2015): Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich. Hg. v. Fraunhofer Verlag. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://www.verlag.fraunhofer.de/bookshop/buch/Modellbasierte-Untersuchung-von-Politikinstrumenten-zur-Foerderung-erneuerbarer-Energien-und-Energieeffizienz-im-Gebaeudebereich/245046>.
- Steinbach, Jan (2016): Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich. Stuttgart, Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Thünen (2012): Bundeswaldinventur: Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung (2012). Online verfügbar unter <https://bwi.info/?inv=WEHAM2012>.
- Thünen (2018): Thünen-Baseline 2017 - 2027. Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. Unter Mitarbeit von Offermann F, Banse M, Freund F, Haß M, Kreins P, Laquai V, Osterburg B, Pelikan J, Rösemann C, Salamon P. Thünen Institut. Braunschweig (Thünen Report, 56). Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen-Report_56.pdf, zuletzt geprüft am 05.07.2018.
- Tietge, Uwe; Díaz, Sonsoles; Mock, Peter; Bandivadekar, Anup; Dornoff, Jan; Ligterink, Norbert (2019): From Laboratory To Road. A 2018 update of official and "real-world" fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe. International Council on Clean Transportation. Berlin (White Paper).
- Timmerberg, Sebastian; Kaltschmitt, Martin (2019): Untersuchung zum PtX-Hochlauf. Wie schnell kann PtX produziert werden? VDI Expertenforum Schiffftechnik - Antriebe der Zukunft. Technische Universität Hamburg (TUHH). Hamburg, 29.03.2019.
- TNO (2018): Support for preparation of the impact assessment for CO2 emissions standards for Heavy Duty Vehicles, zuletzt geprüft am 16.04.2020.
- UBA (2017): Klimaschutz im Stromsektor 2030 - Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung. Endbericht. Öko-Institut, Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Prof. Dr. Stefan Klinski. Dessau-Roßlau (Climate Change, 02/2017). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11_cc_02-2017_strommarkt_endbericht.pdf, zuletzt geprüft am 27.01.2017.
- UBA (2018a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2018. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016. Umweltbundesamt – UNFCCC-Submission. In: *Climate change* (12).
- UBA (2018b): Zentrales System Emissionen (ZSE). Datenauspielung, Stand Januar-Submission 2018. Umweltbundesamt (UBA).
- UBA (2018c): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016. Gekürzte Version für die EU. UBA. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envwldoww/2018_01_15_EU-NIR_2018.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2018.
- UBA (2019a): Analyse der kurz- und mittelfristigen Verfügbarkeit von Flächen für die Windenergienutzung an Land. Kurztitel: Flächenanalyse Windenergie an Land. Abschlussbericht. In: *Climatic Change* (38). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-kurz-mittelfristigen-verfuegbarkeit-von>, zuletzt geprüft am 11.12.2019.
- UBA (2019b): Auswirkungen von Mindestabständen zwischen Windenergieanlagen und Siedlungen. Auswertung im Rahmen der UBA-Studie „Flächenanalyse Windenergie an Land“. In: *Position*. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-20_pp_mindestabstaende-windenergieanlagen.pdf, zuletzt geprüft am 11.12.2019.
- UBA (2019c): Projektionsbericht 2019 für Deutschland – Zusammenfassung in der Struktur des Klimaschutzplans. Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerien IX“)“. In: *Climate change* (33). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2019-fuer-deutschland>, zuletzt geprüft am 03.12.2019.
- UBA (2020a): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen. 1990-2018. Stand EU-Submission 15.01.2020. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>.
- UBA (2020b): Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück. Große Minderungen im Energiesektor, Anstieg im Gebäudesektor und Verkehr. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent>, zuletzt geprüft am 06.04.2020.
- Umweltbundesamt (UBA) (2016a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. Dessau-Roßlau (Climate Change, 23/2016).
- Umweltbundesamt (UBA) (2016b): Zentrales System Emissionen (ZSE). Datenauspielung, Stand 11.10.2016.
- UNFCCC (2000): UNFCCC guidelines on reporting and review. Review of the implementation of commitments and of other provisions of the convention. FCCC/CP/1999/7. Online verfügbar unter <http://unfccc.int/resource/docs/cop5/07.pdf>, zuletzt geprüft am 13.12.2018.
- UNFCCC (2013): Revision of the UNFCCC reporting guidelines on annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention. Decision 24/CP.19. Online verfügbar unter http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/reporting_requirements/items/2759.php, zuletzt geprüft am 21.09.2017.

Van Holsteijn en Kemna B.V. et al. (2014): "Omnibus" Review Study on Cold Appliances, Washing Machines, Dishwashers, Washer-Driers, Lighting, Set-top Boxes and Pumps.

Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas (Hg.) (2018): NEP-Gas-Datenbank. Ausbaumaßnahmen, 2018 NEP Entwurf. Online verfügbar unter <https://www.nep-gas-datenbank.de:8080/app/#!/ausbaumassnahmen>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2018.

Vermittlungsausschuss (2019): Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 im Steuerrecht. Abgeschlossene Vermittlungsverfahren. Ergebnis.

Vogl; Ahman; Nilsson (2018): Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking.

Zimmer, Wiebke; Blanck, Ruth; Bergmann, Thomas; Mottschall, Moritz; Waldenfels, Rut von; Förster, Hannah et al. (2016): Endbericht Renewability III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Studie im Auftrag des BMUB 2016. Öko-Institut; DLR; ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Infrac.

ZVEI (2006-2009): Zahlenspiegel des deutschen Elektro-Hausgerätemarktes 2005-2008. Frankfurt.

A Anhang

A.1 Abschätzung der Treibhausgas-Minderung durch Windenergieanlagen an Land

Zur Erreichung des Zieles eines Anteils von 65 % erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2030, weist das Klimaschutzprogramm 2030 unter anderem auch einen Ausbauziel-Korridor für Windenergie an Land aus. Die vorliegenden Rechnungen basieren auf der Annahme, dass der im Klimaschutzprogramm 2030 für die installierte Leistung von Windenergieanlagen an Land vorgesehene Zielkorridor von 67 bis 71 GW (mit Zielwert 69 GW) im Jahr 2030 erreicht werden kann.

Dem Erreichen dieser installierten Leistung für 2030 steht jedoch die ebenfalls im Klimaschutzprogramm 2030 vorgesehene pauschale Abstandsregelung von 1.000 m entgegen.

Sollte sich der Vorschlag zu einer pauschalen Abstandsregelung durchsetzen oder Bundesländer in großem Umfang von der Möglichkeit so gearteter pauschaler Regelungen Gebrauch machen, so müsste man mit den folgenden Auswirkungen rechnen¹²⁸. Durch eine pauschale Abstandsregelung von 1000 m würde sich die für Windenergieanlagen an Land verfügbaren Flächen je nach Ausgestaltung der Maßnahme zum Teil erheblich verringern (UBA 2019a, UBA 2019b, DIW 2019). In UBA (2019b) wird eine Bandbreite von 43,3 bis 63,2 GW als maximales Potenzial unter Berücksichtigung der Abstandsregelungen von 1.000 m genannt. Dieses Potenzial überschätzt jedoch tendenziell die real im Jahr 2030 installierbare Leistung, da hier von der Errichtung „auf der grünen Wiese“ (also einer optimalen Nutzung des Flächenpotentials, ohne Berücksichtigung von Bestandanlagen) ausgegangen wird; diese Flächen sind jedoch aufgrund von Bestandsanlagen zum Teil nicht verfügbar. Ungeachtet der Abstandsregelung sind weitere Flächeneinbußen aufgrund genehmigungsrechtlicher, wirtschaftlicher und privatrechtlicher Hemmnisse (UBA 2019a) zu erwarten. Insgesamt ist somit davon auszugehen, dass die daraus resultierende Fläche, die für den Ausbau der Windenergie an Land zur Verfügung steht, nicht für das Erreichen des im Klimaschutzprogramm 2030 formulierten Zielkorridors ausreichen wird. Werden die in dieser Modellierung verwendeten Vollbenutzungstunden für Windenergieanlagen an Land (1.936 h/a für 2030) zu Grunde gelegt, ergibt sich mit der oben genannten Bandbreite eine Mindererzeugung von Windenergieanlagen an Land im Bereich von 11 bis 50 TWh (bezogen auf 43,3 bis 63,2 GW im Vergleich zum Zielwert von 69 GW).

Der konkrete Umfang an Mehremissionen in Deutschland, zu denen diese Mindererzeugung führt, hängt unter anderem von der konkreten Ausgestaltung von Maßnahmen zur Integration erneuerbarer Erzeugung sowie der Entwicklung des Netzausbaus und sonstiger Flexibilitätsoptionen ab. Ebenso hat die Entwicklung der Kraftwerksparks im europäischen Ausland über die Exportbilanz einen erheblichen Einfluss auf den Netto-Emissionseffekt innerhalb Deutschlands. Legt man den in den Modellrechnungen ermittelten durchschnittlichen Emissionsfaktor des Verdrängungsmixes in Deutschland von rund 630 g CO₂ pro kWh und einen in früheren Vorhaben ermittelten europäischen Rebound von rund 33 % zugrunde (siehe z.B. UBA (2017), Tabelle 6-3), ergeben sich Mehremissionen von 5 bis 21 Mio. t. CO₂. Vor diesem Hintergrund hat der Ausbau von Windenergieanlagen an Land auch einen erheblichen Einfluss auf die Erreichung des Sektorziels der Energiewirtschaft und des Ziels eines 65 % EE-Anteils am Bruttostromverbrauch im Jahr 2030.

¹²⁸ Eine Berücksichtigung des zwischen den Regierungsfractionen im Mai 2020 gefundenen Kompromisses zur Umsetzung der Abstandsregelung nach Klimaschutzprogramm 2030 konnte im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen.

Rechnung: $2/3 * 0,633 \text{ Mio. t CO}_2 \text{ pro TWh} * (5,8 \text{ GW} * 1.936 \text{ h} = 11,2 \text{ TWh bis } 25,7 \text{ GW} * 1.936 \text{ h} = 49,8 \text{ TWh}) = 4,7 \text{ Mio. t CO}_2 \text{ bis } 21,0 \text{ Mio. t CO}_2$

A.2 Instrumententypen

Tabelle 143: Klassifikation der Instrumententypen

Instrumententyp		Erläuterung, Beispiele
Ökonomische Instrumente	E	Preis- und mengenpolitische Steuerungsmechanismen: Umweltabgaben-/Steuern, Handelbare Zertifikate, Handelbare Quoten, Tarifpolitik, Marktreform/-öffnung
Fiskalische Instrumente	F	Subventionen und öffentliche Infrastrukturausgaben: Zuschüsse, verbilligte Kredite, Steuererleichterungen, Staatliche Investitionen
Verpflichtungserklärungen	V	Freiwillige und verhandelte Selbstverpflichtungen: Vereinbarungen von Wirtschaftsbereichen, Branchen oder Unternehmen
Regulierung	R	Ordnungsrechtliche Vorschriften: Ver- und Gebote, technische Standards, Produktkennzeichnung
Information	I	Allgemeine Information und Beratung: Broschüren, Informationszentralen, Agenturen, Beratungsstellen
Bildung	ET	Regelung und Förderung der Bildung: Aus-, Fort- und Weiterbildung
Forschung und Entwicklung	D	Förderung der Forschung, Entwicklung und Demonstration: Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung, Projektförderung
Andere	O	Andere Instrumente: Appelle, indikative Zielvorgaben/Planung, Hemmnisabbau

Quelle: (UNFCCC 2000)