

Unterrichtung

durch die Bundesregierung

Klimaschutz-Projektionsbericht 2021 für Deutschland

Zugeleitet mit Schreiben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit gemäß § 10 Absatz 2 des Bundes-Klimaschutzgesetzes sowie Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates.

Kurzbeschreibung: Projektionsbericht 2021 für Deutschland

Der deutsche Projektionsbericht 2021 beschreibt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland in einem Mit-Maßnahmen-Szenario im Zeitraum 2021 bis 2040. Der Bericht folgt den Vorgaben der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz.

Für die gesamten Treibhausgasemissionen (ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) ergibt sich im Zeitraum 1990 bis 2030 eine Minderung um 49 %, und bis 2040 wird eine Minderung von 67 % erreicht. Wichtige Treiber für diese Reduktion sind unter anderem der Rückgang der Kohleverstromung im Rahmen des Kohleverstromungsbeendigungsgesetzes, die CO₂-Bepreisung durch den EU-Emissionshandel und die Zunahme der erneuerbaren Energien durch die Förderung im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes. Daneben trägt auch der abnehmende Wärmebedarf im Gebäudesektor durch Sanierungsmaßnahmen und der Ausbau der Elektromobilität zur Reduktion der Emissionen bei.

Darüber hinaus wurden Sensitivitätsanalysen bezüglich der Annahmen zur demographischen und gesamtwirtschaftlichen Entwicklung sowie zu den THG-Zertifikatpreisen durchgeführt. Insbesondere bei höheren EUA-Preisen sind deutliche Auswirkungen auf die Emissionen zu erwarten. Im Jahr 2030 führt ein angenommener EUA-Preis von ca. 60 €₂₀₁₆/EUA zu 24 Mio. t geringeren Treibhausgasemissionen in der Energiewirtschaft gegenüber einem angenommenen EUA-Preis von 30 €₂₀₁₆/EUA.

Abstract: Projection report 2021 for Germany

The projection report 2021 for Germany presents the development of greenhouse gas emissions in Germany in a 'with measures' scenario for the period from 2021 to 2040. The report is in accordance with Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and the Council of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action.

Total greenhouse gas emissions (excluding land use, land use change and forestry) decrease by 49 % between 1990 and 2030, and by 67 % between 1990 and 2040. Main drivers for this reduction include the decrease in coal-based power generation under the German coal-based power generation termination act, carbon pricing under the EU Emissions Trading System and an increase in renewable energy sources funded under the German renewable sources act. This development is supported by decreasing heat demand in the buildings sector due to renovations and by the increase of electric mobility.

In addition, sensitivity analyses were carried out regarding the assumptions on demographic and macroeconomic development as well as GHG certificate prices. Especially with higher EUA prices a significant impact on emissions is to be expected. In 2030, an assumed EUA price of about 60 €₂₀₁₆/EUA leads to 24 million t lower GHG emissions in the energy sector compared to an assumed EUA price of 30 €₂₀₁₆/EUA.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis.....	13
Abkürzungsverzeichnis.....	20
Zusammenfassung	25
1 Einleitung.....	30
2 Methodischer Ansatz.....	32
2.1 Definition und Abgrenzung der Sektoren.....	32
2.2 Methodischer Ansatz für die Emissionsprojektionen.....	35
2.3 Ergebnisintegration	38
2.4 Berücksichtigung der Corona-Pandemie in den Projektionen	39
2.5 Berücksichtigte Maßnahmen	40
3 Rahmendaten und -annahmen	42
3.1 Demografische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten	42
3.1.1 Demografische Entwicklung	42
3.1.2 Gesamtwirtschaftliche Entwicklung	44
3.2 Entwicklung der Primärenergiepreise	46
3.2.1 Preisprojektionen für Rohöl, Steinkohle und Erdgas.....	46
3.2.2 Preisprojektion Braunkohle	51
3.3 Entwicklung der Preise für Treibhausgasemissionszertifikate	51
3.4 Entwicklung der CO ₂ -Preise für Wärme und Verkehr (BEHG-Preise).....	54
3.5 EEG-Umlagesenkung	55
3.6 Entwicklung der Endverbraucherpreise für Strom	57
4 Übergreifende Maßnahmen.....	59
4.1 Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung.....	59
4.2 Ordnungsrecht.....	62
4.3 Sonstige quantifizierte Instrumente.....	66
4.4 Flankierende Instrumente	67
4.4.1 Flankierende Instrumente aus dem Aktionsprogramm Klimaschutz 2020	67
4.4.2 Flankierende Instrumente aus dem Klimaschutzprogramm 2030	69
4.4.3 Flankierende Instrumente aus der Effizienzstrategie 2050.....	70

5	Energiewirtschaft.....	71
5.1	Stromerzeugung und gekoppelte Wärmeerzeugung	71
5.1.1	Methodik	71
5.1.1.1	PowerFlex	71
5.1.1.2	Industriekraftwerke, KWK und Fernwärme.....	72
5.1.2	Maßnahmen	73
5.1.2.1	Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung.....	73
5.1.2.2	Ordnungsrecht.....	76
5.1.2.3	Flankierende Instrumente	76
5.1.3	Annahmen und Parameter	76
5.1.3.1	Bestandskraftwerke und grundlegende technische Parameter.....	76
5.1.3.2	Entwicklung der Erzeugungskapazitäten und Beschreibung Maßnahmenumsetzung	77
5.1.4	Ergebnisse.....	85
5.1.4.1	Stromnachfrage	85
5.1.4.2	Entwicklung von installierter Leistung und Stromerzeugung.....	87
5.1.4.3	Entwicklung der Treibhausgasemissionen	92
5.1.4.4	Bewertung der Einzelmaßnahmen	94
5.2	Übrige Energiewirtschaft.....	99
5.2.1	Methodik	99
5.2.2	Annahmen und Parameter	100
5.2.3	Ergebnisse.....	101
5.2.3.1	Entwicklung des Energieeinsatzes.....	101
5.2.3.2	Entwicklung der Treibhausgasemissionen	104
5.3	Diffuse Emissionen aus Brennstoffen.....	106
5.3.1	Methodik	106
5.3.2	Annahmen und Parameter	107
5.3.3	Ergebnisse.....	107
5.4	Gesamtergebnisse Energiewirtschaft.....	110
6	Industrie.....	113
6.1	Energieverbrauch (ohne Industriekraftwerke).....	113
6.1.1	Methodik	113
6.1.2	Rahmendaten	119
6.1.3	Maßnahmen	121

6.1.3.1	Quantifizierte Instrumente.....	121
6.1.3.2	Flankierende Instrumente.....	128
6.1.4	Annahmen und Parameter.....	132
6.1.5	Ergebnisse.....	149
6.1.5.1	Bewertung der Einzelmaßnahmen.....	149
6.1.5.2	Entwicklung des Energieverbrauchs.....	156
6.1.5.3	Entwicklung der Treibhausgasemissionen.....	157
6.2	Industriekraftwerke.....	159
6.2.1	Methodik.....	159
6.2.2	Maßnahmen.....	159
6.2.3	Annahmen und Parameter.....	159
6.2.4	Ergebnisse.....	160
6.3	Industrieprozesse und Produktverwendung (CO ₂ -, CH ₄ - und N ₂ O-Emissionen).....	162
6.3.1	Methodik.....	162
6.3.2	Maßnahmen.....	162
6.3.3	Annahmen und Parameter.....	163
6.3.4	Ergebnisse.....	163
6.3.4.1	Emissionsentwicklung nach Quellgruppen.....	163
6.3.4.2	Bewertung der Einzelmaßnahmen.....	168
6.4	Industrieprozesse und Produktverwendung (Fluorierte Treibhausgase).....	168
6.4.1	Maßnahmen.....	168
6.4.2	Methodik sowie Annahmen und Parameter.....	169
6.4.3	Ergebnisse.....	171
6.4.3.1	Bewertung der Einzelmaßnahmen.....	171
6.4.3.2	Entwicklung der Treibhausgasemissionen.....	173
6.5	Industrieprozesse und Produktverwendung (Gesamt).....	176
6.6	Gesamtergebnisse Industrie.....	178
7	Gebäude.....	183
7.1	Übergreifende Rahmendaten.....	183
7.1.1	Anzahl privater Haushalte.....	183
7.1.2	Wohnfläche und Entwicklung der Nutzfläche in Nichtwohngebäuden.....	183
7.2	Wärmebedarf im Gebäudebereich.....	184
7.2.1	Methodik.....	184
7.2.2	Maßnahmen.....	185

7.2.2.1	Finanzielle Anreize für Investitionen in Energieeffizienz und Erneuerbare Energien.....	185
7.2.2.2	Ordnungsrecht.....	191
7.2.2.3	Flankierende und informatorische Instrumente	193
7.2.3	Annahmen und Parameter	197
7.2.4	Ergebnisse.....	202
7.2.4.1	Entwicklung des Endenergieverbrauchs.....	202
7.2.4.2	Bewertung der Einzelmaßnahmen	203
7.3	Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung	209
7.3.1	Methodik	209
7.3.2	Maßnahmen	214
7.3.2.1	Quantifizierte Instrumente.....	214
7.3.2.2	Flankierende Instrumente	215
7.3.3	Annahmen und Parameter	216
7.3.4	Ergebnisse.....	219
7.4	Geräte und Prozesse im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen	221
7.4.1	Methodik	221
7.4.2	Maßnahmen	221
7.4.3	Annahmen und Parameter	221
7.4.4	Ergebnisse.....	222
7.4.4.1	Bewertung der Einzelmaßnahmen	222
7.5	Gesamtergebnisse Gebäude	224
8	Verkehr	227
8.1	Methodik	227
8.2	Maßnahmen	228
8.2.1	Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung.....	228
8.2.2	Ordnungsrecht.....	243
8.2.3	Flankierende Instrumente	248
8.3	Annahmen und Parameter	250
8.4	Ergebnisse.....	254
8.4.1	Verkehrsnachfrage	254
8.4.2	Antriebstechnologien	259
8.4.3	Entwicklung des Endenergieverbrauchs.....	263
8.4.4	Bewertung der Einzelmaßnahmen	265

8.4.5	Entwicklung der Treibhausgasemissionen	270
9	Landwirtschaft	274
9.1	Landwirtschaft (insbes. Verdauung, Düngewirtschaft und Böden).....	274
9.1.1	Methodik	274
9.1.2	Maßnahmen	275
9.1.2.1	Quantifizierte Maßnahmen	275
9.1.2.2	Weitere flankierende, nicht quantifizierte Maßnahmen	277
9.1.3	Annahmen und Parameter	277
9.1.4	Ergebnisse.....	279
9.1.4.1	Bewertung der Einzelmaßnahmen	279
9.1.4.2	Entwicklung der Treibhausgasemissionen	281
9.2	Energieverbräuche der Landwirtschaft	284
9.2.1	Methodik	284
9.2.2	Annahmen und Parameter	284
9.2.3	Ergebnisse.....	285
9.2.3.1	Entwicklung des Energieverbrauchs.....	285
9.2.3.2	Bewertung der Einzelmaßnahmen	288
9.2.3.3	Entwicklung der Treibhausgasemissionen	288
9.3	Gesamtergebnisse Landwirtschaft	289
10	Abfallwirtschaft und Sonstiges	292
10.1	Methodik	292
10.2	Maßnahmen	293
10.2.1	Ordnungsrecht.....	293
10.2.2	Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung.....	294
10.2.3	Flankierende und informatorische Instrumente	295
10.3	Annahmen und Parameter	296
10.4	Ergebnisse.....	297
10.4.1	Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen und Gasen	297
10.4.2	Bewertung der Einzelmaßnahmen	300
11	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF).....	301
11.1	Methodik und Annahmen und Parameter	301
11.2	Maßnahmen	302
11.2.1	Quantifizierte Maßnahmen	303
11.2.2	Weitere, nicht quantifizierbare Maßnahmen	304

11.3	Ergebnisse.....	305
11.3.1	Entwicklung von Aktivitätsdaten	305
11.3.2	Bewertung der Einzelmaßnahmen	306
11.3.3	Entwicklung der Treibhausgasemissionen	307
12	Entwicklung Primärenergieverbrauch	310
12.1	Methodik	310
12.2	Ergebnisse.....	311
13	Entwicklung Endenergieverbrauch.....	314
13.1	Methodik	314
13.2	Ergebnisse.....	315
13.3	Exkurs zu strombasierten Energieträgern und der Nationalen Wasserstoffstrategie	317
14	Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen.....	320
14.1	Emissionen aus Verbrennungsprozessen	320
14.2	Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Treibhausgasen	322
14.3	Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren.....	324
14.4	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in EU-ETS, ESR und BEHG	328
14.4.1	Methodik	329
14.4.2	Ergebnisse.....	330
14.5	Sensitivitätsanalysen	335
14.5.1	Wirtschaftswachstum und demographische Entwicklung	336
14.5.2	EUA-Preise im Stromsektor	337
14.5.3	BEHG-Preise.....	339
14.5.3.1	Industrie.....	340
14.5.3.2	Gebäude	341
14.5.3.3	Verkehr	341
14.5.4	Zusammenfassung Ergebnisse.....	342
15	Nationale Systeme für Politiken und Maßnahmen sowie Projektionen	345
15.1	Namen und Kontaktdaten der Stellen, die die Gesamtverantwortung für die nationalen Systeme für Politiken und Maßnahmen sowie für Projektionen tragen	345
15.2	Vorhandene institutionelle Regelungen für die Erstellung der Berichte über Politiken und Maßnahmen sowie für Projektionen und deren Meldung	345
15.3	Vorhandene rechtliche Regelungen für die Erstellung von Berichten über Politiken und Maßnahmen sowie über Projektionen	346

15.4	Vorhandene verfahrenstechnische und administrative Regelungen und Zeitpläne für die Erstellung der Berichte über Politiken und Maßnahmen sowie über Projektionen.....	347
15.4.1	Phase 1	347
15.4.2	Phase 2	347
15.4.3	Phase 3	347
15.4.4	Phase 4	348
15.4.5	Phase 5	348
15.5	Beschreibung des Verfahrens zur Erhebung von Informationen	348
15.6	Beschreibung der Angleichung mit dem nationalen Inventarsystem	348
15.7	Beschreibung der Tätigkeiten zur Qualitätssicherung und -kontrolle für die Berichte über Politiken und Maßnahmen sowie über Projektionen.....	350
15.8	Beschreibung des Verfahrens zur Auswahl von Annahmen, methodischen Ansätzen und Modellen für die Erstellung von Projektionen der anthropogenen Treibhausgasemissionen	350
15.9	Beschreibung der Verfahren für die amtliche Prüfung und Billigung des nationalen Systems jedes Mitgliedstaats für Politiken und Maßnahmen sowie für Projektionen.....	351
15.10	Informationen zu relevanten institutionellen, administrativen und verfahrenstechnischen Regelungen für die Umsetzung des national festgelegten Beitrags der EU im Inland oder Änderungen an diesen Regelungen	352
15.11	Beschreibung der Einbeziehung von Interessenträgern hinsichtlich der Erstellung von Politiken und Maßnahmen sowie von Projektionen	352
A	Anhang.....	353
A.1	Instrumententypen.....	353
A.2	Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen	354
A.3	Bruttostromerzeugung	355
16	Quellenverzeichnis	356

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Modellübersicht zur Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen.....	36
Abbildung 2:	Integrationsmodell ENUSEM und Interaktion mit den Sektormodellen.....	39
Abbildung 3:	Aktuelle Bevölkerungsprojektionen im Vergleich.....	42
Abbildung 4:	Vergleich verschiedener Projektionen des Bruttoinlandsprodukts.....	46
Abbildung 5:	Preise für Rohöl (Brent) im historischen Trend sowie für ausgewählte Projektionen.....	47
Abbildung 6:	Preise für Erdgas im historischen Trend sowie für ausgewählte Projektionen.....	48
Abbildung 7:	Preise für Steinkohle im historischen Trend sowie für ausgewählte Projektionen.....	50
Abbildung 8:	Preise für Emissionsberechtigungen des EU ETS im historischen Trend sowie für ausgewählte Projektionen.....	52
Abbildung 9:	Begriffserklärung KWK-Wärme und Fernwärme.....	73
Abbildung 10:	Kapazitäten der deutschen Kohlekraftwerke im MMS.....	78
Abbildung 11:	Entwicklung der installierten Leistung erneuerbarer Energien im MMS.....	81
Abbildung 12:	Entwicklung der Kohlekapazitäten im europäischen Ausland im MMS.....	85
Abbildung 13:	Entwicklung der installierten Leistung im MMS.....	88
Abbildung 14:	Nettostromerzeugung im MMS, 2018-2040.....	90
Abbildung 15:	CO ₂ -Minderungswirkung der einzelnen Maßnahmen im MMS.....	96
Abbildung 16:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im MMS 1990-2040.....	102
Abbildung 17:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MMS, 1990-2040.....	109
Abbildung 18:	Entwicklung der Grenzkosten effizienter Kraftwerke im MMS.....	111
Abbildung 19:	Überblick des Modells FORECAST-Industry.....	115
Abbildung 20:	Resultierende Diffusion CO ₂ -armer Verfahren bis zum Jahr 2040.....	148
Abbildung 21:	Einsatz von Energieträgern im Industriesektor (exkl. Industriekraftwerke), kalibriert auf die nationale Emissionsberichterstattung.....	156
Abbildung 22:	Entwicklung der Industrieprozessemissionen (CO ₂ , CH ₄ und N ₂ O) im MMS nach Quellgruppen.....	168

Abbildung 23:	Entwicklung der Emissionen von F-Gasen im MMS nach Quellgruppen	173
Abbildung 24:	Entwicklung der Emissionen von F-Gasen im MMS nach Gasgruppen.....	175
Abbildung 25:	Struktur des Simulationsmodells Invert/ee-Lab	185
Abbildung 26:	Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab.....	198
Abbildung 27:	Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten.....	199
Abbildung 28:	Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumente in Invert-Agents.....	199
Abbildung 29:	Mittelwerte der Außentemperatur und Heizgradtage in Deutschland nach Monaten im Jahr 2018	201
Abbildung 30:	Entwicklung der Heizgradtage im Zeitraum 2018 bis 2040	201
Abbildung 31:	Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im MMS.....	202
Abbildung 32:	Einfluss von Klimaeffekt, Gebäudesanierung und Heizungsaustausch auf den Endenergiebedarf im MMS	203
Abbildung 33:	Modellüberblick FORECAST-Residential (Geräte-Modul)	211
Abbildung 34:	Personenverkehrsnachfrage im MMS, 2018-2040	256
Abbildung 35:	Güterverkehrsnachfrage im MMS, 2018-2040	257
Abbildung 36:	CO ₂ -Emissionen neu zugelassener Pkw, 2010-2030	259
Abbildung 37:	Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen nach Antrieben, 2018-2030	260
Abbildung 38:	Pkw-Bestand nach Antrieben, 2018-2040	260
Abbildung 39:	Anteil alternativer Antriebe an den Lkw-Neuzulassungen (>3,5t zGG), 2018-2030.....	261
Abbildung 40:	Reduktion der spezifischen CO ₂ -Emissionen neu zugelassener Lkw	262
Abbildung 41:	Entwicklung des elektrischen Fahranteils von Lkw und Pkw	263
Abbildung 42:	Endenergieverbrauch im nationalen Verkehr, 2018-2040	264
Abbildung 43:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor im MMS, 2018-2040.....	272
Abbildung 44:	Entwicklung des Energieverbrauchs im KSP-Sektor Landwirtschaft im MMS.....	286
Abbildung 45:	Primärenergieverbrauch im MMS, 2008-2040	311
Abbildung 46:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS, 2008-2040	315
Abbildung 47:	Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren (1990–2040).....	325

Abbildung 48:	Abweichung der Treibhausgasemissionen pro Sektor von den Jahreemissionsmengen gemäß Klimaschutzgesetz 2021	328
Abbildung 49:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030)	332
Abbildung 50:	Alternative Preispfade für EU-Emissionszertifikate in der Sensitivitätsanalyse	336
Abbildung 51:	Komponentenanalyse für die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen (MMS)	337
Abbildung 52:	Differenz der CO ₂ -Emissionen zwischen der Sensitivität und dem MMS	339

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Indikatoren im MMS.....	26
Tabelle 2:	Zuordnung von CRF-Kategorien zu KSG-Sektoren und zur Inventarstruktur laut UNFCCC und Governance-Verordnung	34
Tabelle 3:	Zusammensetzung der Treibhausgasemissionen der im Klimaschutzplan aufgeführten Sektoren (Mio. t CO ₂ -Äq) im Basisjahr 2018.....	35
Tabelle 4:	Bevölkerungsentwicklung	43
Tabelle 5:	Jährliche Wachstumsraten des Bruttoinlandsproduktes für Deutschland in verschiedenen Projektionen für die Jahre 2020002020-2040	45
Tabelle 6:	Energiepreis-Projektionen für Rohöl, Erdgas und Steinkohle zu Preisen von 2016 (€/GJ), 2019–2040	50
Tabelle 7:	Kostenannahmen für das Braunkohleaufkommens, 2019-2040	51
Tabelle 8:	Preise für ETS-Zertifikate zu Preisen von 2016 (€/EUA), 2019-2040	53
Tabelle 9:	CO ₂ -Preise für Verkehr und Wärme sowie für die nicht vom EU ETS erfassten Emissionen der Industrie.....	55
Tabelle 10:	Annahmen zur Entwicklung der mittleren Endverbraucher- Strompreise je Sektor [Eurocent ₂₀₁₆ /kWh].....	58
Tabelle 11:	Übersicht Ökodesign-Richtlinie: Umsetzungsstand und Modellierung.....	63
Tabelle 12:	Ausbauziele für erneuerbare Energien nach § 4 EEG 2021 und nach dem Windenergie-auf-See-Gesetz (in Gigawatt, GW)	74
Tabelle 13:	Neubau von Erdgas-KWK-Kraftwerken im MMS (in MW elektrisch).....	79
Tabelle 14:	Installierte Leistung erneuerbarer Energien im MMS in ausgewählten Jahren in GW	82
Tabelle 15:	Volllaststunden der variablen erneuerbaren Energien im MMS für ausgewählte Jahre.....	82
Tabelle 16:	Nettostromerzeugung aus Abfall	83
Tabelle 17:	Kapazitäten von Stromspeichern im MMS.....	84
Tabelle 18:	Bruttostromverbrauch im MMS, 2008-2040	86
Tabelle 19:	Aufschlüsselung der installierten Nettonennleistung im MMS für ausgewählte Jahre.....	88
Tabelle 20:	Aufschlüsselung der Nettostromerzeugung im MMS für ausgewählte Jahre.....	91
Tabelle 21:	CO ₂ -Emissionen der Kraftwerke nach Subsektoren im MMS, 1990–2040	92

Tabelle 22:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Stromsektor nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS	94
Tabelle 23:	CO ₂ -Minderungswirkung der einzelnen Maßnahmen des MMS für ausgewählte Jahre.....	95
Tabelle 24:	Installierte Leistung erneuerbarer Energie für die Bewertung des EEG für ausgewählte Jahre.....	97
Tabelle 25:	Installierte Leistung an neuen EE-Wärmeerzeugern, 2025-2040	101
Tabelle 26:	Wärmebereitstellung durch neue EE-Wärmeerzeuger, 2025-2040	101
Tabelle 27:	Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2018-2040.....	103
Tabelle 28:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im der Übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) zwischen 1990 und 2040 im MMS	105
Tabelle 29:	Relevante Quellgruppen für diffuse Emissionen aus Brennstoffen sowie in der Modellierung verwendete Aktivitätsraten	106
Tabelle 30:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MMS, 1990-2040.....	108
Tabelle 31:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS	110
Tabelle 32:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS	112
Tabelle 33:	Branchenstruktur von FORECAST-Industry (angelehnt an AGEB).....	115
Tabelle 34:	Übersicht der Maßnahmen in den Sektoren Industrie (IND) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD): Methodik und Annahmen zu Überschneidungs- und Mitnahme- bzw. Übertragungseffekten.....	117
Tabelle 35:	Entwicklung der Bruttowertschöpfung der Industrie je Wirtschaftszweig (Mrd. € ₂₀₁₅).....	119
Tabelle 36:	Produktionsmengen energieintensiver Grundstoffe	121
Tabelle 37:	Zuordnung der energieintensiven Industrieprozesse und -produkte des Energiesystemmodells FORECAST zum Emissionshandel nach Sektoren.....	132
Tabelle 38:	Von der Strom- bzw. Energiesteuer vollständig entlastete Produktionsprozesse.....	134
Tabelle 39:	Überschneidungen bei der Wirkung der BesAR sowie des Spitzenausgleichs (grün: Entlastung gekoppelt an EMS; blau: Entlastung ohne Anforderung; orange: keine Entlastung; grau: keine Belastung); Mengenangaben für 2017	138

Tabelle 40:	Annahmen zur Budget-Fortschreibung der Programme zur Förderung der Markteinführung CO ₂ -armer Herstellungsverfahren (Mio. € ₂₀₂₀).....	145
Tabelle 41:	Kennwerte für die Quantifizierung des Programmbündels für die Markteinführung CO ₂ -armer Verfahren.....	147
Tabelle 42:	Übersicht der Maßnahmen in den Sektoren Industrie (IND) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) im MMS.....	149
Tabelle 43:	Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im MMS - Stromeinsparungen.....	152
Tabelle 44:	Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im MMS – Einsparungen von Brennstoffen und CO ₂ -Emissionen.....	154
Tabelle 45:	Einsatz von Energieträgern im Industriesektor (exkl. Industriekraftwerke), kalibriert auf die nationale Emissionsberichterstattung	157
Tabelle 46:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie (ohne Industriekraftwerke) zwischen 1990 und 2040 im MMS.....	158
Tabelle 47:	Parameter der Industriekraftwerke im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2018-2040 ..	160
Tabelle 48:	Brennstoffeinsatz in Industriekraftwerken im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2018-2040.....	161
Tabelle 49:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen für Industrieprozesse und Produktverwendung zwischen 1990 und 2040 im MMS nach Quellgruppen	166
Tabelle 50:	Emissionsminderungswirkung von F-Gase-orientierten Einzelmaßnahmen im MMS	172
Tabelle 51:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen (fluorierte Treibhausgase) im MMS, 1990-2040 nach Quellgruppen.....	174
Tabelle 52:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen (fluorierte Treibhausgase) aus Industrieprozessen und Produktverwendung im MMS zwischen 1990 und 2040 nach Gasgruppen	176
Tabelle 53:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS	177
Tabelle 54:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS	179
Tabelle 55:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS.....	181
Tabelle 56:	Vergleich der Anzahl privater Haushalte verschiedener Quellen	183

Tabelle 57:	Entwicklung der Bevölkerung sowie absolute und relative Entwicklung der spezifischen Wohnfläche	184
Tabelle 58:	Fördersätze Energieeffizient Sanieren Wohngebäude nach Anpassung durch das KSPr 2030	186
Tabelle 59:	Angepasste Fördersätze Energieeffizient Bauen Wohngebäude.....	187
Tabelle 60:	Angepasste Fördersätze Energieeffizient Bauen und Sanieren Nichtwohngebäude.....	187
Tabelle 61:	Steuerliche Förderung Gebäudesanierung	189
Tabelle 62:	Angepasste Fördersätze Marktanzreizprogramm Teil BAFA	189
Tabelle 63:	Ausgestaltung des Vergleichsszenarios (OMS) zur Quantifizierung der Einzelmaßnahmenwirkung	205
Tabelle 64:	Umsetzung und Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung.....	206
Tabelle 65:	Faktoren zur Effektbereinigung und zur Berücksichtigung der Überschneidungseffekte zwischen Instrumenten	207
Tabelle 66:	Netto-Einsparungen fossiler Brennstoffe pro Jahr für ausgewählte Maßnahmen (ohne Wirkungen auf Umwandlungssektor)	209
Tabelle 67:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen pro Jahr für ausgewählte Maßnahmen (ohne Wirkungen auf Umwandlungssektor)	209
Tabelle 68:	Vorgehen zur Quantifizierung der Einzelmaßnahmenwirkung.....	213
Tabelle 69:	Übersicht der Maßnahmen in privaten Haushalten: Methodik und Annahmen zu Überschneidungen und Mitnahmeeffekten	214
Tabelle 70:	Erwartete Entwicklung des Bestands an elektrischen Geräten in privaten Haushalten.....	217
Tabelle 71:	Erwartete Entwicklung des spezifischen Verbrauchs elektrischer Geräte in privaten Haushalten im MMS	218
Tabelle 72:	Entwicklung des Stromverbrauchs privater Haushalte 2010–2035 im MMS	219
Tabelle 73:	Wirkung der strombezogenen Maßnahmen im Sektor private Haushalte - MMS.....	220
Tabelle 74:	Wirkung der Maßnahmen im Sektor GHD im MMS - Stromeinsparungen.....	222
Tabelle 75:	Wirkung der Maßnahmen im Sektor GHD im MMS – Einsparungen von Brennstoffen und CO ₂ -Emissionen.....	223
Tabelle 76:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS	225

Tabelle 77:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude zwischen 1990 und 2040 im MMS	226
Tabelle 78:	Zusätzliche Mittel für den öffentlichen Personennahverkehr (Mio. €)	232
Tabelle 79:	Zusätzliche Fördermittel für den Radverkehr (Mio. €)	233
Tabelle 80:	Kaufprämien für E-Pkw ab November 2019	236
Tabelle 81:	Haushaltsmittel für Busse mit alternativen Antrieben (Mio. €).....	239
Tabelle 82:	Haushaltsmittel für Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben (Mio. €)	240
Tabelle 83:	Energetischer Anteil von Biokraftstoffen im Verkehr	245
Tabelle 84:	Einsatz strombasierter Flüssigkraftstoffe im Verkehr.....	246
Tabelle 85:	Haushaltsmittel für alternative Antriebe in der Binnenschifffahrt (Mio. €)	247
Tabelle 86:	Überblick über die Maßnahmen im Verkehrssektor.....	251
Tabelle 87:	Verkehrsnachfrage Personenverkehr im MMS in Mrd. pkm	255
Tabelle 88:	Verkehrsnachfrage Güterverkehr im MMS in Mrd. tkm.....	258
Tabelle 89:	Fahrleistungen im MMS in Mrd. km	258
Tabelle 90:	Verkehrsnachfrage Seeverkehr im MMS in Mrd. tkm	258
Tabelle 91:	Endenergieverbrauch des Verkehrssektors (ohne Sonderverkehre) im MMS in PJ.....	264
Tabelle 92:	Parametrisierung der Einzelmaßnahmen im Verkehr im MMS	265
Tabelle 93:	Emissionsminderungswirkung von Einzelmaßnahmen im Verkehr (national) im MMS	269
Tabelle 94:	Emissionsminderungswirkung von Einzelmaßnahmen (international)	270
Tabelle 95:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS	271
Tabelle 96:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zwischen 1990 und 2040 im MMS	272
Tabelle 97:	Entwicklung der Tierbestände 1990-2040	277
Tabelle 98:	Entwicklung ausgewählter Aktivitätsdaten für landwirtschaftliche Böden 1990-2040.....	278
Tabelle 99:	Ausgestaltung des Vergleichsszenarios (OMS) zur Quantifizierung der Wirkung der Einzelmaßnahmen in der Quellgruppe Landwirtschaft.....	279
Tabelle 100:	Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen in der Quellgruppe Landwirtschaft.....	281

Tabelle 101:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft zwischen 1990 und 2040 im MMS nach Teil-Quellgruppen und Gasen	283
Tabelle 102:	Entwicklung des Energieverbrauchs im KSP-Sektor Landwirtschaft im MMS.....	287
Tabelle 103:	Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen im Bereich der energiebedingten Emissionen aus der Landwirtschaft.....	288
Tabelle 104:	Entwicklung der energetischen Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft.....	288
Tabelle 105:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS	289
Tabelle 106:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS.....	290
Tabelle 107:	Entwicklung der Methanemissionen im Abfallsektor 1990 – 2040 in kt CH ₄	297
Tabelle 108:	Entwicklung der Lachgasemissionen im Abfallsektor 1990 – 2040 in kt N ₂ O	298
Tabelle 109:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS.....	298
Tabelle 110:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS.....	299
Tabelle 111:	Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen im Abfallsektor	300
Tabelle 112:	Zusätzliche Fördermittel für Maßnahmen zum Erhalt und zur nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder und für klimafreundliche und innovative Holzverwendung	305
Tabelle 113:	Entwicklung der Aktivitätsdaten [1000 ha] des LULUCF-Sektors von 1990 bis 2040	305
Tabelle 114:	Ausgestaltung des Vergleichsszenarios (OMS) zur Quantifizierung der Wirkung der Einzelmaßnahmen in der Quellgruppe LULUCF.....	307
Tabelle 115:	Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen in der Quellgruppe LULUCF	307
Tabelle 116:	Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in der Quellgruppe LULUCF zwischen 1990 und 2040 im MMS nach Teil-Quellgruppen in Mt CO ₂ e	308
Tabelle 117:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS	308
Tabelle 118:	Primärenergieverbrauch im MMS, 2008-2040	312

Tabelle 119:	Vergleich der Zuordnung der CRF-Sektoren 1.A.2 bis 1.A.5 und 1.D.1, der Endenergie-Sektoren in der Energiebilanzstruktur und der KSG-Sektoren	314
Tabelle 120:	Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im MMS, 2018-2040	316
Tabelle 121:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS, 2018-2040	316
Tabelle 122:	Nachfrage nach und Bereitstellung von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen im MMS.....	318
Tabelle 123:	Entwicklung der gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen nach Gasen, 1990-2040	320
Tabelle 124:	Entwicklung der gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen (inklusive internationalem Verkehr) nach Brennstoffen, 1990–2040	321
Tabelle 125:	Entwicklung der gesamten Emissionen nach Treibhausgasen, 1990-2040	322
Tabelle 126:	Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren, 2020-2040.....	325
Tabelle 127:	Emissionsentwicklung im stationären EU-ETS und im ESR-Sektor im MMS, 2005-2040.....	331
Tabelle 128:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030).....	333
Tabelle 129:	Emissionsentwicklung der KSG-Sektoren nach Regime im MMS, 2005-2040	333
Tabelle 130:	Sensitivität: Änderung der Nettostromerzeugung gegenüber dem MMS.....	338
Tabelle 131:	BEHG-Preise MMS und NECP	339
Tabelle 132:	Differenz der Treibhausgasemissionen in MMS und Sensitivität im Industriesektor in Mio. t CO ₂ -Äq.....	341
Tabelle 133:	Differenz der Treibhausgasemissionen in MMS und Sensitivität im Gebäudesektor in Mio. t CO ₂ -Äq.....	341
Tabelle 134:	Differenz der Treibhausgasemissionen in MMS und Sensitivität im Verkehrssektor in Mio. t CO ₂ -Äq.....	342
Tabelle 135:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnungen (MMS).....	343
Tabelle A 1:	Klassifikation der Instrumententypen.....	353
Tabelle A 2:	Entwicklung der gesamten Emissionen nach CRF-Quellgruppen im MMS, 1990-2040.....	354
Tabelle A 3:	Bruttostromerzeugung im MMS, 2008-2040.....	355

Abkürzungsverzeichnis

AGE	Arbeitsgruppe „Emissionshandel zur Bekämpfung des Treibhauseffekts“
AfA	Absetzung für Abnutzung
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
APK 2020	Aktionsprogramm Klimaschutz 2020
AtG	Atomgesetz
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BesAR	Besondere Ausgleichsregelung
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (engl.: Battery Electric Vehicle)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BLAC	Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Chemikaliensicherheit
BLAG KliNa	Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Klima, Energie, Mobilität – Nachhaltigkeit
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BMU	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BNetzA	Bundesnetzagentur
BWS	Bruttowertschöpfung
CCfD	Carbon Contracts for Difference
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CCS	Carbon Capture and Storage
CH₄	Methan
CNG	Verdichtetes Erdgas (engl.: Compressed Natural Gas)
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO₂-Äq	CO ₂ -Äquivalente
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
CRF	Common Reporting Format

CVD	EU-Richtlinie über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge (engl.: Clean Vehicles Directive)
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DOC	Degradable Organic Carbon
E-Bus/ -Pkw/ -Lkw	Elektrobus/ -Pkw/ -Lkw
EDL-G	Energiedienstleistungs-Gesetz
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
EKF	Energie- und Klimafonds
EffSTRA	Energieeffizienzstrategie 2050
ELIAS	Electricity Investment Analysis
EMS	Energiemanagementsystem
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ESR	Effort Sharing Regulation (EU-Klimaschutzverordnung)
ETS	Emissions Trading Scheme (Emissionshandel)
EU	Europäische Union
EUA	European Union Allowance
EUTL	European Union Transaction Log
EV	Elektrofahrzeug (engl.: Electric Vehicle)
F&E	Forschung und Entwicklung
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (engl.: Fuel Cell Electric Vehicle)
FKW	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
Gt	Gigatonne
GVFG	Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde
GWP	Global Warming Potential
GuD	Gas und Dampf
H₂	Wasserstoff (engl. Hydrogen)
HFKW	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
ICAO	International Civil Aviation Organization
i.H.v.	in Höhe von

IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IMO	International Maritime Organization
IPCEI	Important Project of Common European Interest
JIKO	Joint-Implementation-Koordinierungsstelle
KfW	Förderbank Kreditanstalt für Wiederaufbau
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
KM	Koordinierungsstelle Marktmechanismen
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KSPr 2030	Klimaschutzprogramm 2030
KVVG	Kohleverstromungsbeendigungsgesetz
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LAGA	Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LAI	Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Autogas (engl.: Liquefied Petroleum Gas)
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
LuftVSt	Luftverkehrssteuer
MAC	Mobile Air Condition (Systems)
MAP	Marktanreizprogramm
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
MiD	Mobilität in Deutschland
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
MwSt	Mehrwertsteuer
N₂O	Lachgas (Distickstoffmonoxid)
NAPE	Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz
NDC	Nationally Determined Contribution
NE	Not estimated
NECP	Nationaler Energie- und Klimaplan
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus

nEHS	Nationales Emissionshandelssystem
NFz	Nutzfahrzeug
NKI	Nationale Klimaschutzinitiative
NPM	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität
NTC	Net Transfer Capacity
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
OMS	Ohne-Maßnahmen-Szenario
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
p.a.	Pro Jahr (per annum)
PEV	Primärenergieverbrauch
PHEV	Plug-in-Hybrid Fahrzeug (engl.: plug-in hybrid electric vehicle)
PJ	Petajoule
pkm	Personenkilometer
ProMechG	Projektmechanismengesetz
PtG	Power to Gas
PtJ	Projekträger Jülich
PtL	Power to Liquid
PV	Photovoltaik
QA	Quality assurance (Qualitätssicherung)
QC	Quality control (Qualitätskontrolle)
RED II	Erneuerbare-Energien-Richtlinie II (engl.: Renewable Energies Directive II)
RL	Richtlinie
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
StA AFK	Ständiger Ausschuss Anpassung an die Folgen des Klimawandels
StBA	Statistisches Bundesamt
s.u.	siehe unten
TCO	Gesamtbetriebskosten (engl.: Total Cost of Ownership)
TEHG	Treibhausgasemissionshandelsgesetz
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
TWh	Terawattstunde
TYNDP	Ten Year Network Development Plan

UBA	Umweltbundesamt
UMK	Umweltministerkonferenz
UNFCCC	United Nations Framework Conference on Climate Change
ÜvP	Übereinkommen von Paris
VN	Vereinte Nationen
VO	Verordnung
VSK	Vertragsstaatenkonferenz
WindSeeG	Windenergie-auf-See-Gesetz
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht
ZLEV	niedrig emittierenden Pkw (engl.: zero and low emitting vehicles)
ZSE	Zentrales System Emissionen
ZuV	Zuteilungsverordnung

Zusammenfassung

Die Mitgliedstaaten der Europäischen Union sind verpflichtet, alle zwei Jahre eine Projektion vorzunehmen, wie sich ihre jeweiligen Treibhausgasemissionen in den nächsten etwa 20 Jahren nach derzeitigem Stand entwickeln. Der deutsche Projektionsbericht 2021 folgt den Vorgaben der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz. Er gibt einen Überblick über die nationalen Politiken und Maßnahmen sowie die Projektionen gemäß Artikel 18 und enthält Angaben zum nationalen System gemäß Artikel 39 dieser Verordnung. Der Bericht beruht auf Ergebnissen des Projektes „THG-Projektion: Politiksznarien für den Klimaschutz X“, in dessen Rahmen ein Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland für den Zeitraum 2021 bis 2040 erarbeitet wurde.

Im MMS werden alle Maßnahmen berücksichtigt, die bis Ende August 2020 verabschiedet worden sind. Es umfasst unter anderem die Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 und relevante Maßnahmen aus dem Konjunkturprogramm der Bundesregierung vom 3. Juni 2020. Für die Bewertung der Maßnahmenwirkung wird die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in diesem Szenario mit einer (hypothetischen) Entwicklung verglichen, die ohne diese Maßnahmen bzw. ohne die entsprechende Novellierung bereits bestehender Politiken und Maßnahmen eingetreten wäre. Dabei werden diejenigen Maßnahmen berücksichtigt, die vor dem jeweils beschriebenen Wirkungsbeginn der vom MMS erfassten Maßnahmen wirksam waren.

Die Projektionen umfassen die Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW), Schwefelhexafluorid (SF₆) und Stickstofftrifluorid (NF₃) für die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, und Abfallwirtschaft und Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF). Die für Deutschland relevanten Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs werden nachrichtlich ausgewiesen.

Für die Projektionen wurden ein Energiesystem- und ein Emissionsberechnungsmodell eingesetzt, das aus den zum Großteil modellgestützten Projektionen für die einzelnen Sektoren den gesamten Energieeinsatz und die gesamten Treibhausgasemissionen bestimmt.

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Gesamtemissionen ergeben sich einerseits aus den energiebedingten Treibhausgasemissionen und andererseits aus den Treibhausgasemissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung, der Landwirtschaft und der Abfallwirtschaft sowie Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF). Solche Schätzungen der Emissionsentwicklung sind selbst bezüglich relativ kurzer Zeiträume mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Wirtschaftsentwicklung, Energiepreise und andere Rahmenbedingungen können die tatsächliche Entwicklung stark beeinflussen. Die Ergebnisse sind daher vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen zu den Rahmendaten zu bewerten. Die wichtigsten Rahmendaten sowie Indikatoren sind ebenfalls in Tabelle 1 dargestellt. Die Rahmendaten wurden mit den Bundesressorts im Jahr 2020 abgestimmt und bilden die Grundlage für die Modellierung. Vor allem der THG-Zertifikatepreis ist nach dem Veröffentlichen des Vorschlags der EU-Kommission, die Treibhausgasemissionen der EU bis 2030 gegenüber 1990 um mindestens 55 Prozent zu senken, deutlich schneller angestiegen als zum Zeitpunkt der Abstimmung der Rahmendaten erwartet wurde. Es wird als sehr wahrscheinlich angesehen, dass der Preis weiterhin auf einem relativ hohen Niveau bleibt. In Tabelle 1 werden daher auch die Ergebnisse einer Sensitivitätsrechnung mit deutlich höheren Zertifikatepreisen für den Stromsektor ausgewiesen.

Tabelle 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Indikatoren im MMS

Indikator	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
Treibhausgasemissionen						
Energiewirtschaft	Mio. t CO ₂ -Äq	305,1	242,8	193,2	135,4	74,9
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-34,6 %	-47,9 %	-58,5 %	-71,0 %	-83,9 %
Industrie	Mio. t CO ₂ -Äq	194,9	174,8	154,6	143,2	139,4
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-30,8 %	-37,9 %	-45,1 %	-49,1 %	-50,5 %
Gebäude	Mio. t CO ₂ -Äq	116,6	107,9	90,9	69,0	50,2
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-44,4 %	-48,6 %	-56,7 %	-67,1 %	-76,0 %
Verkehr	Mio. t CO ₂ -Äq	162,3	151,4	126,4	100,1	78,7
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-1,0 %	-7,6 %	-22,9 %	-38,9 %	-52,0 %
Landwirtschaft	Mio. t CO ₂ -Äq	69,8	67,3	62,8	62,4	62,0
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-22,3 %	-25,1 %	-30,2 %	-30,6 %	-31,0 %
Abfallwirtschaft & Sonstige	Mio. t CO ₂ -Äq	9,7	6,7	5,0	4,0	3,4
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-74,6 %	-82,4 %	-86,8 %	-89,7 %	-91,2 %
Gesamt (ohne LULUCF)	Mio. t CO₂-Äq	858,3	750,9	632,9	514,0	408,7
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-31,3 %	-39,9 %	-49,3 %	-58,9 %	-67,3 %
Gesamt Sensitivität (deutlich höherer EUA-Preis Stromsektor ohne LULUCF)	Mio. t CO₂-Äq	858,3	723,4	608,9	494,5	408,2
<i>Minderung ggü. 1990</i>		-31,3 %	-42,1 %	-51,3 %	-60,4 %	-67,3 %
Jahresemissionsmenge Bundes- Klimaschutzgesetz 2021	Mio. t CO ₂ -Äq	---	---	438,0	---	---
Minderungsziel Bundes-Klima- schutzgesetz 2021		---	---	---	-77 %	-88 %
LULUCF	Mio. t CO ₂ -Äq	-26,9	16,9	22,3	23,0	21,9
Internationaler Luft- und See- verkehr	Mio. t CO ₂ -Äq	34,7	35,1	36,0	37,1	38,0
Energetische Indikatoren						
Primärenergieverbrauch	PJ	12.989	11.627	10.791	9.802	9.021
Bruttostromverbrauch	TWh	595	579	598	632	673
Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch		37,8 %	51,2 %	62,9 %	77,6 %	83,9 %
Installierte Leistung Wind an Land	GW	52,3	62,8	71,0	92,0	107,2

Indikator	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
Installierte Leistung Wind auf See	GW	6,4	10,5	20,0	32,2	39,8
Installierte Leistung PV	GW	45,2	75,5	100,0	118,2	122,4
Weitere Indikatoren						
Anzahl E-Pkw	Mio.	0,2	3,9	8,4	13,4	17,8
Elektrische Fahrleistung Lkw		0 %	5 %	12 %	19 %	29 %
Verkehrsnachfrage Pkw	Mrd. Pkm	895	906	893	899	914
Güterverkehrsleistung Straße	Mrd. tkm	499	526	544	557	574
Zubau Wärmepumpen	Mio.		0,36	0,88	1,73	2,93
Änderung Endenergieverbrauch Gebäudesektor im Vergleich zu 2018 durch:						
Gebäudesanierung	TWh		-16,7	-27,1	-35,6	-42,0
Austausch des Wärmeversorgungssystems	TWh		-19,3	-46,0	-81,7	-124,7
Steigende Außentemperatur	TWh		-5,8	-20,0	-38,7	-52,8
Rahmendaten						
Bevölkerung (Annahme)	Mio.		83,6	83,8	83,8	83,5
CO ₂ -Zertifikatspreis	€ ₂₀₁₆ /EUA		25,0	30,0	40,0	53,0
CO ₂ -Zertifikatspreis (Sensitivität Energiewirtschaft)	€ ₂₀₁₆ /EUA		49,9	60,6	71,3	82,0
BEHG-Preis	€/t (nominal)		55,0	125,0	200,0	275,0
Bruttoinlandsprodukt	Mrd. € ₂₀₁₆		3.411	3.555	3.725	3.949
Neue Treib- und Brennstoffe						
Wasserstoffnachfrage	PJ		8	29	48	67
Inländische Wasserstoffproduktion	PJ		8	29	49	67
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW		2,9	5,0	7,5	10,0
Inländischer Stromverbrauch der Elektrolyseure	PJ		11	41	69	96
Nachfrage strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe	PJ			39	70	71
Inländische Produktion strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe	PJ			8	8	9

Indikator	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
Import strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe	PJ			31	62	63

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), (AGEB 2008-2020a, 2008-2020b), BMWi (2021b), (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2019), (European Commission 2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut.

Wie in Tabelle 1 zu sehen, fallen die Emissionsreduktionen in den verschiedenen Sektoren unterschiedlich aus. Die Energiewirtschaft hat den größten Anteil an den von 2018 bis zum Jahr 2040 erzielten Emissionsminderungen. Die Emissionen sinken hier bis 2030 um 59 % gegenüber 1990 und bis 2040 um 84 % gegenüber 1990. Diese Abnahme ist in erster Linie auf den Rückgang der Kohleverstromung im Rahmen des Kohleverstromungsbeendigungsgesetzes zurückzuführen. Weitere Treiber sind die CO₂-Bepreisung durch den EU-Emissionshandel und die Zunahme der erneuerbaren Energien durch die Förderung im Rahmen des EEG.

Die Emissionen aus dem Sektor Industrie werden gegenüber dem Jahr 1990 bis 2030 um 45 % und bis 2040 um 50 % reduziert. Diese Abnahme kann auf Maßnahmen wie den Emissionshandel, Programme zur Markteinführung von CO₂-armen Verfahren sowie Effizienzmaßnahmen zurückgeführt werden. Eine Reduktion der Prozessemissionen findet vor allem bei der Stahlerzeugung und bei den F-Gasen statt, bei Letzteren aufgrund der F-Gas-Regulierungen auf EU-Ebene.

Die Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors sinken bis 2030 um 57 % und bis 2040 um 76 % gegenüber 1990. Diese Emissionsreduktion kommt durch den abnehmenden Wärmebedarf durch Sanierungsmaßnahmen und durch den geringer werdenden Marktanteil von Heizölkesseln zustande.

Im Verkehrssektor ist bis 2030 eine Emissionsreduktion um 23 % gegenüber 1990 zu verzeichnen; bis 2040 beträgt die Reduktion 52 %. Aufgrund des Ausbaus der Elektromobilität sinken zwar die Emissionen aus dem Kraftstoffverbrauch, ein Teil der Emissionen des Sektors wird aber in die Energiewirtschaft verlagert, da die öffentliche Stromerzeugung dort bilanziert wird.

Die Emissionen aus der Landwirtschaft sinken bis 2030 um 30 % gegenüber 1990, um bis 2040 auf annähernd gleichem Niveau zu bleiben. Die relativ geringe Reduktion der Emissionen aus der Landwirtschaft erklärt auch den beobachteten unterdurchschnittlichen Rückgang der Methan- und Lachgasemissionen.

Die Abfallwirtschaft weist mit 87 % im Jahr 2030 und 91 % im Jahr 2040 die größten relativen Emissionsminderungen gegenüber 1990 auf. Haupttreiber für diese Entwicklung ist die verminderte Ablagerung von organischen Abfällen, wodurch die Methanemissionen aus Deponien auch in den kommenden Jahrzehnten weiter abnehmen.

Zur Einordnung der Ergebnisse wurden Sensitivitätsanalysen hinsichtlich Wirtschaftswachstum, Bevölkerungsentwicklung, EU-Emissionszertifikatspreise (EUA-Preise) und BEHG-Preis durchgeführt. Ein höheres angenommenes Bevölkerungswachstum resultiert im Jahr 2030 in rund 3,5 Mio. t höheren Treibhausgasemissionen im Vergleich zum MMS, im Jahr 2040 sind es noch 3 Mio. t. Ein geringeres Wirtschaftswachstum führt zu sinkenden Emissionen (-4,4 Mio. t CO₂-Äq in 2030 ggü. MMS). Änderungen in den EUA-Preisen wirken sich deutlich auf die Emissionen aus. Im Jahr 2030 führt ein angenommener EUA-Preis von ca. 60 €/2016/EUA zu 24 Mio. t geringeren Treibhausgasemissionen in der Energiewirtschaft gegenüber einem angenommenen EUA-Preis von 30 €/2016/EUA. Durch höhere Preise unter dem Bundes-Emissionshandelsgesetz werden die Emissionen bis 2040 um rund 4 Mio. t CO₂-Äq reduziert.

Die Bundesregierung macht sich die Modellierungsergebnisse der vorgelegten Szenarien für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland nicht zu eigen. Szenarien, die in das Jahr 2040

reichen, sind grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet. Je nach Annahmen und verwendeter Methodik können andere Verläufe über die Reduktionswirkung von einzelnen Maßnahmen abgeschätzt werden. Andere Studien, die im Auftrag der Bundesregierung beauftragt wurden, können im Einzelnen zu abweichenden Ergebnissen kommen. Die Bundesregierung wird daher neben den vorliegenden Forschungsergebnissen des Projektionsberichts auch andere Szenarien in ihre künftigen Überlegungen einbeziehen. Die im Bericht dargestellten Maßnahmen sowie die Ergebnisse des Berichts präjudizieren die Bundesregierung nicht; dies gilt vor allem bezüglich ihrer hier angenommenen Ausgestaltung. Alle Maßnahmen sind finanziell und (plan-)stellenmäßig im Rahmen der in den jeweiligen Einzelplänen zur Verfügung stehenden Mittel umzusetzen, ohne Präjudiz für laufende oder künftige Haushaltsverhandlungen.

1 Einleitung

Im Energiekonzept aus dem Jahr 2010 wurden erstmals langfristige Energie- und Klimaschutzziele für Deutschland verabschiedet. Danach sollten die Treibhausgasemissionen in Deutschland im Vergleich zum Niveau von 1990 bis 2020 um mindestens 40 % und bis 2050 um 80 bis 95 % gesenkt werden. Der Klimaschutzplan 2050, der 2016 beschlossen wurde, enthält neben einer Bekräftigung des genannten Langfristziels, der weitgehenden Treibhausgasneutralität bis 2050 beziehungsweise einer Treibhausgasminderung um 80 bis 95 % gegenüber dem Jahr 1990, auch sektorale Zwischenziele, Leitbilder, Meilensteine, strategisch ausgerichtete und teilweise auch konkrete Maßnahmen für den Zielhorizont 2030. Für 2030 war zum Zeitpunkt der Modellierung eine Treibhausgasminderung von mindestens 55 % gegenüber 1990 vorgesehen. Im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) sind darauf aufbauend maximal zulässige Jahresemissionsmengen der einzelnen Sektoren bis zum Jahr 2030 festgelegt. Im April 2021 hat das EU-Parlament beschlossen, dass die Treibhausgasemissionen aller Mitgliedsstaaten in der Summe netto¹ statt wie bislang vorgesehen um 40 % um mindestens 55 % gegenüber 1990 reduziert werden müssen (EC 2020). In der Novelle² des KSG ist eine Treibhausgas-minderung von 65 % im Jahr 2030 und von 88 % im Jahr 2040 vorgesehen³; bis zum Jahr 2045 verfolgt Deutschland das Ziel der Treibhausgasneutralität.

Der vorliegende Projektionsbericht 2021 stellt dar, wie sich die deutschen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2040 auf Basis beschlossener Klimaschutzmaßnahmen entwickeln könnten. Das sogenannte Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS), welches die Basis des Projektionsberichts 2021 für Deutschland ist, umfasst alle Klimaschutzmaßnahmen, die bis Ende August 2020 beschlossen wurden. Wesentliche hier abgebildete Instrumente entstammen insbesondere dem Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (APK 2020), das auch die Maßnahmen des Nationalen Aktionsplans Energieeffizienz (NAPE) beinhaltet, dem Klimaschutzprogramms 2030 (KSPr 2030) und der Energieeffizienzstrategie 2050 (EffSTRA). Des Weiteren werden die THG-relevanten Maßnahmen aus dem Konjunkturprogramm der Bundesregierung vom 3. Juni 2020 abgebildet. Dagegen nicht abgebildet sind nach August 2020 beschlossene Klimaschutzmaßnahmen, wie z. B. die Maßnahmen des im Juni 2021 vom Kabinett mit dem Entwurf des Bundeshaushalts 2022 beschlossenen Klimaschutz-Sofortprogramms 2022, das zusätzliche Investitionen im Umfang von 8 Mrd. € vorsieht, um die Erreichung der verschärften KSG-Ziele zu unterstützen.

Für die Einhaltung der zulässigen Emissionsmengen sieht das Bundes-Klimaschutzgesetz einen Prüfungs- und Nachsteuerungsmechanismus vor. Jeweils bis zum 15. März eines Jahres veröffentlicht das Umweltbundesamt die vorläufigen Daten der Treibhausgasemissionen des Vorjahres. Diese werde vom Expertenrat für Klimafragen überprüft. Überschreitet ein Sektor die zulässige jährliche Emissionsmenge, hat das überwiegend zuständige Ressort ein Sofortprogramm vorzulegen, mit dem die überschrittene Emissionsmenge ausgeglichen und die Einhaltung der Emissionsmengen in den Folgejahren sichergestellt werden soll.

Ziel des vorliegenden Projektionsberichts 2021 ist, die Treibhausgasminderungswirkung aller bis Ende August 2020 beschlossenen Einzelmaßnahmen sowie der übergreifenden Maßnahmen abzuschätzen. Insbesondere aufgrund des 2019 verabschiedeten Klimaschutzprogramms 2030 unterscheidet sich dieser Projektionsbericht wesentlich vom Projektionsbericht 2019. Darüber hinaus werden aktuelle Rahmendaten bei der Abschätzung verwendet, die insbesondere die Auswirkungen

¹ Dies bedeutet unter Berücksichtigung von Kohlenstoffeinbindungen im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF). Der LULUCF-Sektor wurde im vormaligen Minderungsziel von 40 % nicht berücksichtigt.

² Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes (12. Mai 2021): <https://www.bmu.de/gesetz/entwurf-eines-ersten-gesetzes-zur-aenderung-des-bundes-klimaschutzgesetzes/>.

³ Dementsprechend wird im Bericht auf den Vergleich mit diesen Zielen abgestellt.

der Corona-Pandemie berücksichtigen. Schließlich sollen die Projektionsergebnisse in Relation zu den Klimaschutzzielen der Bundesregierung, vor allem für das Jahr 2030, sowie den Vorgaben der Europäischen Klimaschutzverordnung (Effort Sharing Regulation (ESR)) gesetzt werden.

Der vorliegende Bericht basiert auf Modellrechnungen, die durch ein Konsortium deutscher Forschungsinstitute aus Öko-Institut, dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und dem Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) im Auftrag des Umweltbundesamtes erarbeitet wurden. In diese Modellrechnungen sind teilweise Emissionsprojektionen aus anderen Forschungsvorhaben eingeflossen. Die modellgestützte Analyse in den Bereichen Landwirtschaft⁴ und Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) wurden durch das Johann Heinrich von Thünen-Institut durchgeführt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt gemäß dem Zuschnitt der Sektoren des KSG: Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, Landnutzung, LULUCF sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges. Die Ergebnisse der sektoralen Modelle werden hierbei in einem übergeordneten Modell integriert. Hierdurch können Wechselwirkungen zwischen den Sektoren berücksichtigt werden, die in einer rein sektoralen Analyse nicht systematisch erfasst werden können.

Rahmendaten und wesentliche Annahmen für die Parametrisierung der Maßnahmen wurden mit den jeweiligen Fachressorts im Herbst 2020 abgestimmt.

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

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.

Kapitel 4 umfasst die Beschreibung der in der Modellierung berücksichtigten übergreifenden Maßnahmen.

Die Kapitel 5 bis 11 enthalten die Analysen zu den sektoralen Projektionen. In den Kapiteln 12 und 13 wird die Entwicklung des Primär- und Endenergieverbrauchs dargestellt. Kapitel 14 enthält die Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen.

Kapitel 15 beschreibt das Nationale System für Politiken und Maßnahmen sowie Projektionen.

⁴ Mit Ausnahme energiebedingter Emissionen der Landwirtschaft.

2 Methodischer Ansatz

2.1 Definition und Abgrenzung der Sektoren

Die Definition der einzelnen Sektoren dieses Berichts erfolgt gemäß dem nationalen Sektorzuschnitt des KSG (in Klammern die jeweiligen Quellgruppen im *Common Reporting Format*):

- ▶ **Energiewirtschaft:** Der Sektor 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 KSG 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 ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- ▶ **Gebäude:** Der Sektor Gebäude umfasst neben der Gebäudewärme auch den Brennstoffeinsatz für die Warmwasserbereitung⁵ 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 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 Energiewirtschaft enthalten. Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

⁵ Emissionen in Bezug auf den Stromverbrauch für Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung werden im Sektor Energiewirtschaft bilanziert (siehe Kapitel 5).

- ▶ **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 ist das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
- ▶ **Abfallwirtschaft und Sonstiges:** 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 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).⁶ Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).

Die Emissionen aus der Stromerzeugung werden teilweise in der Energiewirtschaft und teilweise in der Industrie bilanziert (Eigenstromerzeugung in Kraftwerken des Verarbeitenden Gewerbes). Eine Substitution von fossilen Brennstoffen durch Strom (z. B. durch Wärmepumpen bei den Gebäuden oder Elektrofahrzeuge im Verkehr) führt daher dazu, dass die direkten Emissionen im jeweiligen Sektor sinken, aber dafür die Emissionen der Kraftwerke und damit vor allem die Emissionen in der Energiewirtschaft steigen, sofern diese zusätzliche Stromnachfrage nicht durch eine erhöhte erneuerbare Stromerzeugung kompensiert werden. Sinngemäß entsprechendes gilt für eine Substitution fossiler Brennstoffe durch Fernwärme.

Tabelle 2 zeigt, welche Quellgruppen des Treibhausgasinventars (CRF-Kategorien) welchen KSG-Sektoren zugeordnet werden. Darüber hinaus stellt die Tabelle die Zuordnung zur Inventarstruktur gemäß UNFCCC und Governance-Verordnung dar.

⁶ Gegenüber den anderen KSG-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. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Entnahme von Biomasse zur energetischen Nutzung sich in der Kohlenstoffbilanz im Bereich Landnutzung und Forstwirtschaft widerspiegelt. Die Treibhausgasemissionen der energetischen Biomassenutzung werden in dem Sektor berichtet, in dem die Nutzung stattfindet (wobei CO₂-Emissionen aufgrund des nachwachsenden Rohstoffs lediglich nachrichtlich ausgewiesen werden).

Tabelle 2: Zuordnung von CRF-Kategorien zu KSG-Sektoren und zur Inventarstruktur laut UNFCCC und Governance-Verordnung

CRF-Kategorie	KSG-Sektor	UNFCCC / Governance-VO	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, Dienstleistungen	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	Abfallwirtschaft und Sonstiges	Abfallwirtschaft	Abfallverbrennung ist in Energiewirtschaft und Industrie enthalten

Quelle: Öko-Institut

Tabelle 3 zeigt zur Erläuterung, wie sich die deutschen Treibhausgasemissionen im Basisjahr 2018 auf die im KSG definierten Sektoren verteilen und aus welchen Inventarkategorien sich die Sektoren zusammensetzen. Insgesamt betragen die Treibhausgasemissionen im Basisjahr 858,3 Mio. t CO₂-Äq⁷. Davon entfielen 146,6 Mio. t CO₂-Äq auf nicht-verbrennungsbedingte Emissionen und 711,8 Mio. t CO₂-Äq auf verbrennungsbedingte Emissionen.

Tabelle 3: Zusammensetzung der Treibhausgasemissionen der im Klimaschutzplan aufgeführten Sektoren (Mio. t CO₂-Äq) im Basisjahr 2018

	Verbrennungsbedingte Emissionen				Nicht-verbrennungsbedingte Emissionen		Summe
	Mio. t	CRF	Mio. t	CRF	Mio. t	CRF	
Energiewirtschaft	295,2	1.A.1	1,4	1.A.3.e	8,5	1.B	305,1
Industrie	130,1	1.A.2			64,8	2	194,9
Gebäude	83,7	1.A.4.b	32,9	1.A.4.a + 1.A.5			116,6
Verkehr	162,3	1.A.3.a-d					162,3
Landwirtschaft	6,2	1.A.4.c			63,6	3	69,8
Sonstige					9,7	5	9,7
Summe	711,8				146,6		858,3

Quelle: Deutsches Treibhausgas-Inventar, CRF-Tabellen, Stand 18. März 2020

2.2 Methodischer Ansatz für die Emissionsprojektionen

Die Erstellung der Projektionen des MMS des Projektionsberichts 2021 für die (deutschen) Treibhausgasemissionen bis 2040 erfolgt auf der Basis von zwischen den Ressorts abgestimmten Annahmen zur

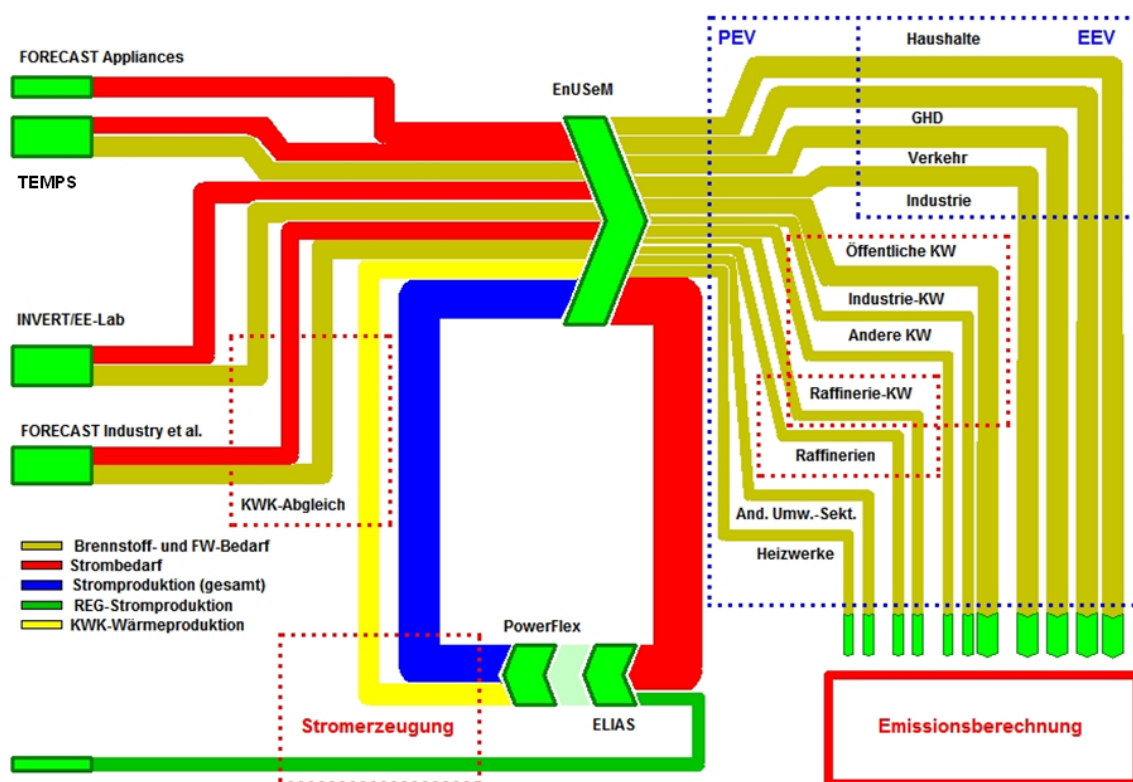
- ▶ Bevölkerungsentwicklung,
- ▶ Wirtschafts- und Wirtschaftsstrukturentwicklung,
- ▶ Energiepreisentwicklungen,
- ▶ Politiken und Maßnahmen sowie
- ▶ technische und sektorspezifische Faktoren.

Die Analyse und Bewertung der verschiedenen Maßnahmen, die Ermittlung der entsprechenden sektoralen Treibhausgasemissionen sowie der notwendigen Hintergrundinformationen und -indika-

⁷ Die Emissionen im Basisjahr 2018 wurden dem deutschen Treibhausgasinventar mit Datenstand 18. März 2020 entnommen. Diese Emissionen wurden als Basis für die Projektionen verwendet. Das Treibhausgasinventar wird jährlich aktualisiert; durch Rückrechnungen kann es zu Unterschieden zwischen den Inventaren kommen, die 2020 bzw. in den Folgejahren veröffentlicht werden.

toren 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.

Abbildung 1: 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 1):

- Die Stromerzeugung auf Basis fossiler Energieträger sowie die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird mit dem PowerFlex-Modell⁸ des Öko-Instituts analysiert (Abschnitt 5.1.1). Die Wärmeerzeugung von KWK-Anlagen wird in diesem Modell ebenfalls modelliert.
- Die Integration des Mengengerüsts für den Endenergieverbrauch (EEV), die Ermittlung des Primärenergieverbrauchs (PEV) sowie des Energieeinsatzes in den anderen Umwandlungssektoren wird mit dem Integrationsmodell ENUSEM des Öko-Instituts durchgeführt (Kapitel 12 und 13).
- Für den Verkehrsbereich erfolgt die Modellierung mit dem Modell TEMPS des Öko-Instituts (Abschnitt 8.1).
- Für den Gebäudesektor (im Bereich der Wohn- und Nichtwohngebäude) wird das Modell INVERT/EE-Lab von IREES eingesetzt. Die Abschätzung der Wirkung einzelner Politikinstrumente erfolgt durch das Öko-Institut anhand bestehender Evaluationen oder Auswertungen der entsprechenden Instrumente (Abschnitt 7.2.1).

⁸ Die Kraftwerksstilllegung wird auf Basis des Stilllegungsmoduls des Modells ELIAS durchgeführt.

e) Analysen für den verbleibenden Brennstoff- und Strombedarf im Sektor Gebäude werden unter der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI durchgeführt (Abschnitt 7.3.1).

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 (Abschnitte 6.1.1 und 7.4.1).

g) 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 (Abschnitt 2.3).

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 (Abschnitt 5.3.1).

Für die Emissionen aus Industrieprozessen werden die folgenden Ansätze verfolgt:

h) Prozessbedingte Emissionen der mineralischen Industrie und der chemischen Industrie (mit Ausnahme der petrochemischen Industrie) werden mit Hilfe des Modells FORECAST modelliert.

i) Für die restlichen 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 (Abschnitt 6.3.1).

j) Für die verbleibenden 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 (Abschnitt 6.3.1).

k) Für die HFKW-, FKW-, SF₆- und NF₃-Emissionen werden vorliegende Projektionen aktualisiert und angepasst (Abschnitt 6.4.1).

Die Projektionen der Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft in Bezug auf landwirtschaftliche Böden, Nutztierhaltung und Sonstiges werden vom Thünen-Institut berechnet (Abschnitt 9.1). Die Energieverbräuche der Landwirtschaft werden vom Öko-Institut mit dem Modell LaWiEnMod ermittelt (Abschnitt 9.2.1). Die Emissionen des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) werden vom Thünen-Institut berechnet (Kapitel 11).

Für die Treibhausgasemissionen aus der Abfallwirtschaft wird das für die Erstellung nationaler Treibhausgasinventare verwendete IPCC Waste Model des Öko-Instituts für die Projektion verwendet (Abschnitt 10.1).

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 2020 (Umweltbundesamt (UBA) 2020) und wurde unter Anwendung der *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC 2006b) unter Verwendung von Treibhausgaspotentialen gemäß den aktuellen Inventar-Berichterstattungsrichtlinien (UNFCCC 2013) erstellt. Es enthält Daten für die Jahre 1990 bis 2018. Die primären Datenquellen zur Erstellung dieses Berichts sind die historischen Daten im Treibhausgasinventar (Umweltbundesamt (UBA) 2020) sowie eine zu diesem Inventar konsistente Datenauspielung aus dem Zentralen System Emissionen (ZSE) im Umweltbundesamt (UBA 2020b). 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.⁹

2.3 Ergebnisintegration

Wie in Abschnitt 2.2 ausgeführt, wird der Energiebedarf einzelner Sektoren mit Hilfe von sektorspezifischen Modellen bestimmt. Für einzelne Sektoren werden auch die Treibhausgasemissionen separat modelliert. Im Folgenden wird die Ergebnisintegration beschrieben, d.h. die Modellierung des gesamten Energiebedarfs und der gesamten Treibhausgasemissionen anhand der Resultate der einzelnen Modelle.

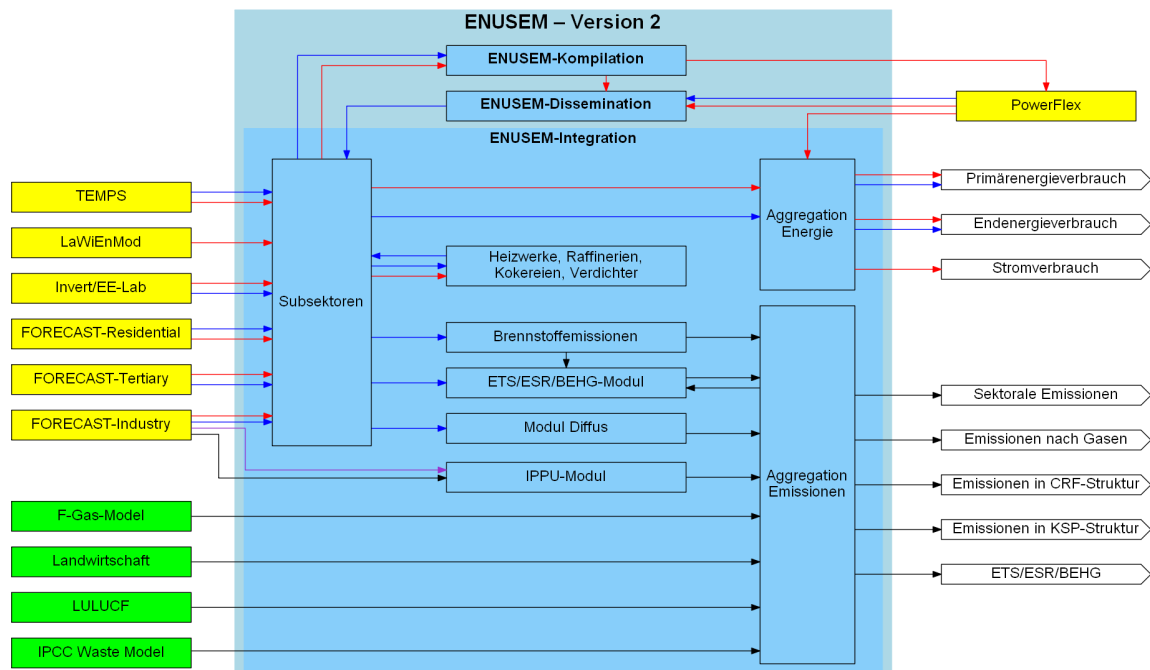
In Abbildung 2 sind die sektorspezifischen Modelle sowie die Elemente des Modells ENUSEM dargestellt, das zur Integration der Ergebnisse verwendet wird. Die gelb dargestellten Energiemodelle liefern den Energiebedarf verschiedener Subsektoren (Verkehr, Energiebedarf der Landwirtschaft, Gebäude und Industrie). Dieser Energiebedarf wird u. a. durch Stromerzeugung und Wärmeerzeugung von KWK-Anlagen gedeckt; dies wird mit Hilfe des Modells PowerFlex modelliert.

Das Modell Powerflex liefert als Resultat den Bedarf an Brennstoffen für die Strom- bzw. Wärmeerzeugung. Aus diesem Bedarf und aus dem Bedarf nach Energieträgern in andere Sektoren werden im Modell ENUSEM die bei der Nutzung dieser Energieträger entstehenden Emissionen berechnet. Je nach Brennstoff und Technologie werden spezifische Emissionsfaktoren verwendet; daneben werden diffuse Emissionen sowie Prozessemissionen berücksichtigt.

ENUSEM füllt zusätzlich die Teile des Energiesystems, die nicht bereits durch Sektormodelle abgedeckt sind. Dies sind die Teile der Energiewirtschaft, die nicht durch PowerFlex abgedeckt sind (Heizwerke, Raffinerieunterfeuerungen, Kokereien, Erdgasverdichterstationen). Auch die diffusen Emissionen aus der Brennstoffnutzung werden durch ENUSEM modelliert.

Die in Abbildung 2 grün dargestellten Modelle liefern anstelle des Energiebedarfs direkt die im entsprechenden Sektor entstehenden Emissionen. In ENUSEM werden die Emission aggregiert und können in unterschiedlichen Darstellungen abgerufen werden, nach Sektoren oder Gasen. ENUSEM liefert auch den gesamten Primärenergie-, Endenergie- und Stromverbrauch.

⁹ In den Abschnitten 12.1 und 13.1 werden die wesentlichen Unterschiede zwischen dem Treibhausgasinventar und den Energiebilanzen detailliert erläutert.

Abbildung 2: Integrationsmodell ENUSEM und Interaktion mit den Sektormodellen

Blaue Kästen stellen das Integrationsmodell ENUSEM dar, gelbe Kästen sind Energiemodelle und grüne Kästen stellen Nicht-Energiemodelle dar. Brennstoffflüsse sind als blaue Pfeile, sonstige Energieflüsse als rote Pfeile und sonstige Aktivitätsdaten als schwarze Pfeile dargestellt. Die großen Pfeile stellen die Ergebnisdaten dar.

Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

Teil der Emissionsberechnung- und -aggregation in ENUSEM ist auch die Bestimmung der Emissionsanteile, die unter den europäischen Emissionshandel (ETS), unter die Effort Sharing Regulation (ESR, EU-Klimaschutzverordnung) sowie unter das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) fallen.

Für den Projektionsbericht wurde die Ergebnisintegration für alle Jahre von 2021 bis 2040 durchgeführt. Auch in den sektorspezifischen Modellen wurden die Treibhausgasemissionen bzw. der Energiebedarf jahresscharf von 2021 bis 2040 bestimmt, mit Ausnahme der Modelle für die nichtenergetischen Emissionen der Landwirtschaft und für einen Teil der F-Gas-Emissionen. Die Emissionen in diesen beide (Sub-)Sektoren wurden in 5-Jahres-Schritten von 2020 bis 2040 bestimmt; die Werte für die dazwischenliegenden Jahre wurden linear interpoliert.

2.4 Berücksichtigung der Corona-Pandemie in den Projektionen

Laut Europäischer Governance-Verordnung müssen für den Projektionsbericht 2021 die Jahre 2020, 2025, 2030, 2035 und 2040 berichtet werden. Die Berichterstattung für das Jahr 2020 ist jedoch in zweierlei Hinsicht mit Herausforderungen behaftet.

Die Emissionsentwicklung des Jahres 2020 kann nur eingeschränkt mit der Emissionsentwicklung in den Vorjahren verglichen werden, da es aufgrund der Corona-Pandemie zu einem starken Einbruch der Wirtschaftsleistung sowie zu einem Rückgang der Verkehrsnachfrage kam. Dadurch stellen sich die Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 deutlich anders dar als in anderen Jahren. Darüber hinaus basiert die Projektion von Treibhausgasemissionen auf aktuellen Daten. Damit wirkt sich beispielsweise der Wirtschaftseinbruch im Jahr 2020 auch auf die projizierten Treibhausgasemissionen in den Folgejahren aus, da es eine gewisse Zeit dauert, bis es zu einer wirtschaftlichen Erholung kommt.

Des Weiteren wurden die Modellierungsarbeiten für den Projektionsbericht im vierten Quartal 2020 begonnen und gegen Ende des ersten Quartals 2021 fertiggestellt. Dies bedeutet, dass die Berichterstattung für das Jahr 2020 erst nachträglich im Jahr 2021 erfolgt.

Die Effekte der Corona-Pandemie wurden bei der Modellierung im Wesentlichen auf zwei Arten berücksichtigt. Zum einen berücksichtigen wesentliche Rahmendaten die Effekte der Pandemie. So geht die angesetzte Wirtschaftsentwicklung von einem starken Einbruch im Jahr 2020 und einer schnellen Erholung im Jahr 2021 aus (Abschnitt 3.1.2). Die wirtschaftliche Entwicklung wirkt sich auf die Bruttowertschöpfung aus, die 2020 ebenfalls einen Einbruch verzeichnete (Abschnitt 6.1.2). Über die Verknüpfung der Modelle (Abschnitt 2.2) kommt es so ebenfalls zu Effekten in anderen Sektoren. So führt eine geringere Bruttowertschöpfung zu einer geringeren Stromnachfrage der Industrie, was sich wiederum auf die Emissionen von Kraftwerken in Energiewirtschaft und Industrie auswirkt. Zum anderen wurde speziell zur Abfederung der Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die Wirtschaft im Sommer 2020 ein Konjunkturprogramm auf den Weg gebracht. Die damit verbundenen Maßnahmen werden bei der Modellierung berücksichtigt und wirken sich so auf die projizierten Treibhausgasemissionen aus.

Aufgrund der genannten Herausforderungen wurden für diesen Bericht als Quelle für die Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 in den Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr und Abfallwirtschaft die Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2021) herangezogen. Es handelt sich dabei um die aktuellen verfügbaren Emissionsdaten für das Jahr 2020 zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichts. Für die Vorjahresschätzung werden sämtliche bis Ende Februar eines Jahres vorliegenden statistischen Daten verwendet. Neben den Daten zum Primärenergieverbrauch werden auch Zusatzinformationen wie Produktionszahlen und meteorologische Daten herangezogen und Fachleute befragt. Angaben zu den verwendeten Datenquellen und Methoden in den einzelnen Quellgruppen sind in Umweltbundesamt (UBA) (2020) zu finden. Wo die Vorjahresschätzung für das Jahr 2020 angesetzt wurde, wurde dies jeweils unter der Tabelle in Form einer Anmerkung kenntlich gemacht. Da die Daten der Vorjahresschätzung nicht in gleicher Detailtiefe vorliegen wie für historische Jahre bzw. wie für Modellierungsjahre, wurde in der relevanten Berichterstattungsdatei¹⁰ z. T. „NE“ (not estimated) ausgewiesen.

2.5 Berücksichtigte Maßnahmen

Das Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) für den Projektionsbericht 2021 beinhaltet alle Klimaschutzmaßnahmen, die bis zum Stichtag 31. August 2020 bereits beschlossen und soweit implementiert waren, dass alle Daten und sonstigen Informationen, die für die Parametrisierung der Maßnahme erforderlich sind, zu Modellierungsbeginn vorlagen. Die Parametrisierung der Maßnahmen wurde mit den Ressorts abgestimmt. Das MMS beinhaltet damit neben schon länger gültigen – vor allem regulatorischen und ökonomischen – Instrumenten insbesondere die Maßnahmen des am 3. Dezember 2014 von der Bundesregierung beschlossene Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (APK 2020), das auch die Maßnahmen des Nationalen Aktionsplans Energieeffizienz (NAPE) beinhaltet, als auch die Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 (KSPr 2030), das am 9. Oktober 2019 beschlossen wurde. Hinzu kommen einzelne zusätzliche Maßnahmen aus der am 18. Dezember 2019 vom Bundeskabinett verabschiedeten Energieeffizienzstrategie 2050 (EffSTRA), die über die Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 hinausgehen, sowie die THG-relevanten Maßnahmen aus dem Konjunkturprogramm der Bundesregierung vom 3. Juni 2020.

Es werden sowohl sektorübergreifende als auch sektorale Maßnahmen berücksichtigt. Die Quantifizierung der Wirkung sektorübergreifender Maßnahmen erfolgt weitgehend auf sektoraler Ebene.

¹⁰ Template 1a.

Außerdem werden auf beiden Ebenen auch eine Reihe flankierender Maßnahmen berücksichtigt, insbesondere Instrumente informatorischer Art. Diese gehen zwar in die Szenarien ein, ihre Wirkung wird jedoch nicht separat quantifiziert, sondern über die Wirkung anderer – in der Regel ökonomischer oder regulatorischer Instrumente – quantifiziert, deren Wirkung sie unterstützen.

3 Rahmendaten und -annahmen

3.1 Demografische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten

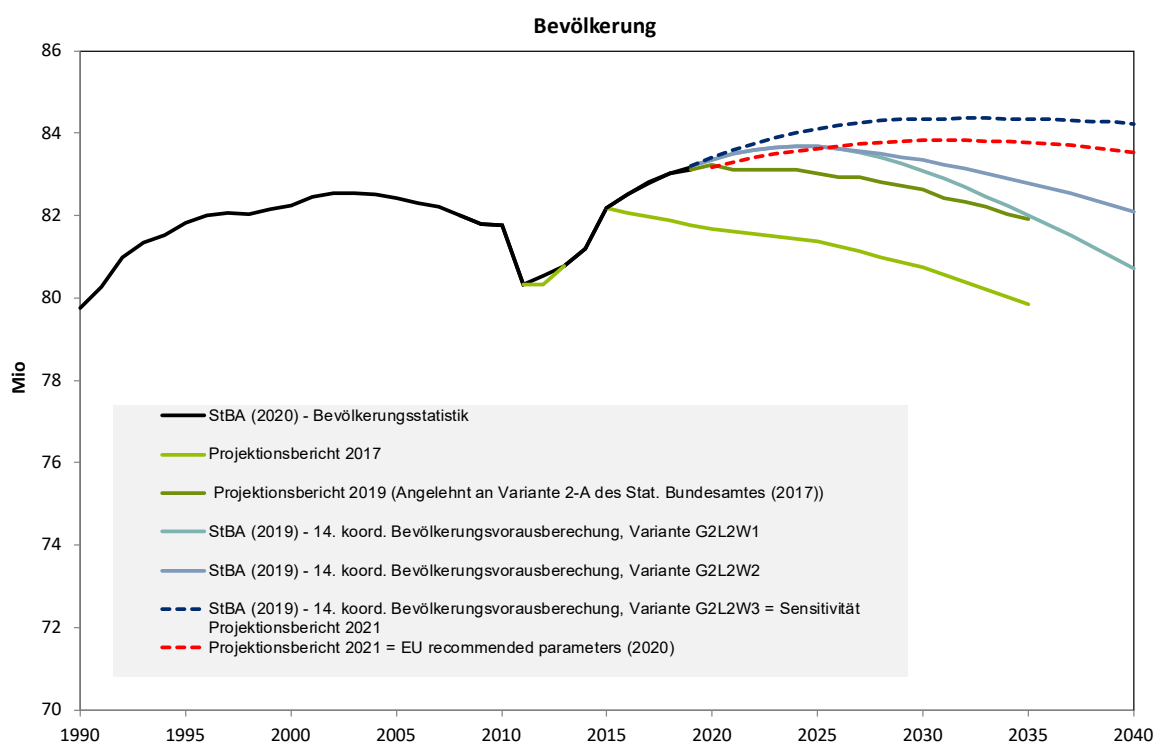
3.1.1 Demografische Entwicklung

Ein wichtiger Faktor für Treibhausgasprojektionen ist die demographische Entwicklung:

- ▶ Zum einen besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Bevölkerungsgröße und den 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 verwenden.

Dadurch spielen die Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung eine wesentliche Rolle in der Emissionsentwicklung. In Abbildung 3 sind aktuelle Bevölkerungsprojektionen vergleichend dargestellt.

Abbildung 3: Aktuelle Bevölkerungsprojektionen im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung nach (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2019), (Bundesregierung 2017, 2019b), (European Commission 2020)

Nach Veröffentlichung des Zensus 2011 wurden die Bevölkerungszahlen in der Bevölkerungsstatistik des Statistischen Bundesamts (StBA) nach unten korrigiert (um ca. 1,5 Millionen Personen). Ab 2011 bildet der Zensus 2011 die Grundlage für die Bevölkerungsstatistik des StBA.

Das Statistische Bundesamt hat im Jahr 2019 die 14. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung in mehreren Varianten veröffentlicht. In Abbildung 3 sind die Varianten 1-3 dargestellt. Sie nehmen eine moderate Entwicklung der Geburtenhäufigkeit von 1,55 Kinder je Frau und einen moderaten

Anstieg der Lebenserwartung bei Jungen auf 84,4 und bei Mädchen auf 88,1 Jahre an. Der Unterschied in diesen drei Varianten liegt im Wanderungssaldo. Variante 1 (Wanderungssaldo W1) geht von einer durchschnittlichen Nettozuwanderung von 147.000 Personen pro Jahr aus, der Wanderungssaldo in Variante 2 (W2) liegt bei 221.000 Personen pro Jahr und Variante 3 nimmt einen Wanderungssaldo (W3) von 311.000 Personen pro Jahr an.

Die Annahmen der EU-Recommendation (European Commission 2020) zu den Kerngrößen der Bevölkerungsmodellierung sind von der Europäischen Kommission im Ageing Report (European Commission (EC) 2018) für jedes EU-Land dargelegt und entsprechen in etwa den ausgewählten Varianten der 14. Bevölkerungsvorausberechnung. Für Deutschland wird im Ageing Report eine Geburtenrate angenommen, die kontinuierlich bis auf 1,6 Kinder pro Frau bis 2040 ansteigt, die Lebenserwartung steigt auf 88,3 Jahren für Mädchen bei Geburt in 2060 (84,8 für Jungen) und die Nettozuwanderung liegt bei knapp 316.130 Personen im Jahr 2020 und sinkt ab dem Jahr 2025 auf knapp 248.000 Personen. Im Jahr 2040 beträgt sie nur noch 241.000 Personen pro Jahr.

Damit liegen die Vorausberechnungen der Europäischen Kommission zwischen den Varianten G2-L2-W2 und G2-L2-W3.

Für den Projektionsbericht 2021 wird den Vorgaben der Europäischen Kommission gefolgt und als Sensitivität die Variante G2-L2-W3 des Statistischen Bundesamtes mit höherer Zuwanderung verwendet. Eine solche Sensitivität ist konsistent mit der Sensitivität des BIPs (höhere Wachstumsraten des BIP in den Jahren 2022-2024 und höhere Bevölkerungszahlen, siehe Abschnitt 3.1.2).

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung der einzelnen Quellen.

Tabelle 4: Bevölkerungsentwicklung

Quellen	Bevölkerung in Mio.					
	2019	2020	2025	2030	2035	2040
StBA (2020) - Bevölkerungsstatistik	83,2					
StBA (2019) - 14. koord. Bevölkerungsvorausberechnung, Variante G2L2W1		83,4	83,7	83,1	82,0	80,7
StBA (2019) - 14. koord. Bevölkerungsvorausberechnung, Variante G2L2W2		83,4	83,7	83,3	82,8	82,1
StBA (2019) - 14. koord. Bevölkerungsvorausberechnung, Variante G2L2W3		83,4	84,1	84,3	84,3	84,2
EU recommended parameters (2020)		83,2	83,6	83,8	83,8	83,5
Projektionsbericht 2021		83,2	83,6	83,8	83,8	83,5
Sensitivität Projektionsbericht 2021		83,4	84,1	84,3	84,3	84,2

Quelle: (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2019), (Bundesregierung 2017, 2019b), (European Commission 2020)

3.1.2 Gesamtwirtschaftliche Entwicklung

Zur Abschätzung von Treibhausgasemissionen ist das Bruttoinlandsprodukt (BIP) ein wichtiger Parameter. Die Wachstumsraten des BIP, d.h. die Veränderung des BIP über die Zeit, sind dabei wesentliche Treiber in den zu Grunde liegenden Modellen.

Folgende Prognosen für das reale BIP für Deutschland waren zum Zeitpunkt der Erstellung des Projectionsberichts 2021 aktuell verfügbar:

- ▶ Die Herbstprojektion der Bundesregierung von Oktober 2020 (BMW i und BMF 2020): Sie geht von einer Schrumpfung durch die Corona-Pandemie von -5,5 % im Jahr 2020 und einem danach folgenden Wachstum von 4,4 % im Jahr 2021 sowie 2,5 % im Jahr 2022 aus. In den Jahren 2023 bis 2025 wird ein Wachstum von 1 % prognostiziert.
- ▶ Die Prognose der Deutschen Bundesbank (Bundesbank 2020) geht in 2020 von einer höheren Schrumpfung von -7,1 % aus. Für die Jahre 2021 und 2022 prognostiziert sie Wachstumsraten von 3,2 % und 3,8 % (kalenderbereinigt).¹¹

Die empfohlenen Wachstumsraten der Europäischen Kommission (European Commission 2020), die von den Mitgliedstaaten für ihre Treibhausgasprojektionen verwendet werden können, berücksichtigen ebenfalls die Auswirkungen der Corona-Pandemie. Dabei wird die Frühjahrsprognose der Europäischen Kommission von Mai 2020 zugrunde gelegt. Die entsprechenden Wachstumsraten (European Commission 2020) liegen im Jahr 2020 bei -6,5 % und 2021 bei 5,9 %. In den Jahren 2023 und 2024 wird im Vergleich zur Frühjahrsprojektion der Bundesregierung von einem stärkeren Wachstum ausgegangen. Die Wachstumsraten liegen hier bei 1,7 %, sinken dann aber ab 2025 auf unter 1 % und steigen ab 2029 wieder an. Der prognostizierte Anstieg im Zeitraum bis 2040 ist auf die Annahme eines höheren Produktivitätswachstums in den Mitgliedstaaten zurückzuführen, denen ein Aufholpotenzial zugeschrieben wird (European Commission (EC) 2018). Schließlich wird angenommen, dass im Jahr 2070 alle Mitgliedstaaten das gleiche Produktivitätswachstum von 1,5 % erreichen werden.

Eine Zusammenschau der verschiedenen Annahmen zu Wachstumsraten ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Für den Projectionsbericht 2021 werden für die Jahre 2020 bis 2025 die Wachstumsraten der Herbstprojektion der Bundesregierung 2020 übernommen. Ab 2026 wird angenommen, dass die Wachstumsraten leicht sinken und ab 2030 denen der Europäischen Kommission (2020) aus dem Frühjahr 2020 folgen. Für die Sensitivität werden die Wachstumsraten der Europäischen Kommission ab 2020 verwendet.

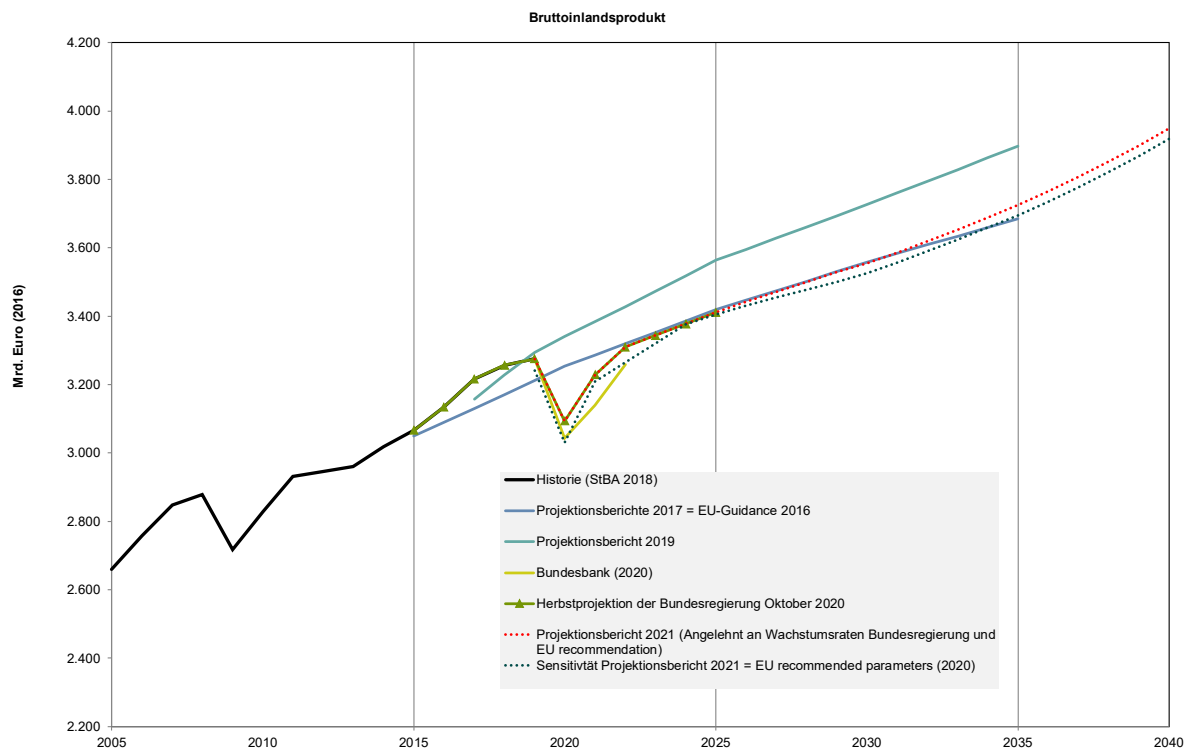
¹¹ Es wird darauf hingewiesen, dass im Verlauf der Modellierung die Frühjahrsprognose der Bundesregierung (27. April 2021) veröffentlicht wurde. Sie geht von einer Erholung in den Jahren 2021 und 2022 aus; es wird mit einem Wachstum der Wirtschaftsleistung um 3,5 % bzw. 3,6 % gerechnet. In den Jahren 2023 bis 2025 wird ein Wachstum von 1,1 % prognostiziert. Ebenfalls wurden die Prognosen der Deutschen Bundesbank (Bundesbank 2021) aktualisiert. Sie geht davon aus, dass die Wirtschaftsleistung in den Jahren 2021 und 2022 um 3,7 % bzw. 5,1 % zunehmen wird.

Tabelle 5: Jährliche Wachstumsraten des Bruttoinlandsproduktes für Deutschland in verschiedenen Projektionen für die Jahre 2020-2040

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2030	2035	2040
Historie (StBa 2020)	1,5%	0,6%										
Projektionsbericht 2017	1,3%	1,3%	1,3%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	0,8%	0,7%	
Projektionsbericht 2019	1,3%	1,3%	1,3%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,8%	
Bundesregierung 2020			-5,5%	4,4%	2,5%	1,0%	1,0%	1,0%				
Bundesbank 2020			-7,1%	3,2%	3,8%							
EU Recommendation 2020			-6,5%	5,9%	1,7%	1,7%	1,7%	0,9%	0,8%	0,8%	1,0%	1,3%
Projektionsbericht 2020			-5,5%	4,4%	2,5%	1,0%	1,0%	1,0%	0,9%	0,8%	1,0%	1,3%
Sensitivität Projektionsbericht 2020			-6,5%	5,9%	1,7%	1,7%	1,7%	0,9%	0,8%	0,8%	1,0%	1,3%

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der oben angegebenen Quellen

Abbildung 4 stellt die historische Entwicklung (schwarze durchgängige Linie) und aktuelle sowie bisherige BIP-Projektionen vergleichend dar und hebt Projektionen für die Szenarien des Projektionsberichts 2021 gestrichelt hervor.

Abbildung 4: Vergleich verschiedener Projektionen des Bruttoinlandsprodukts

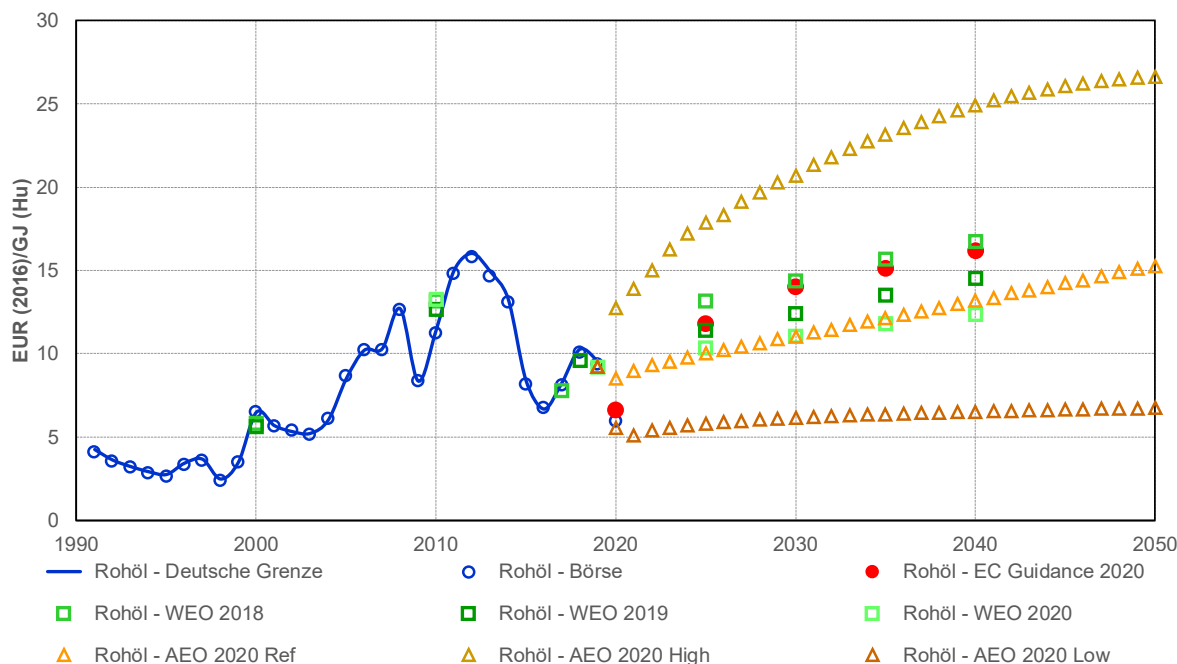
Quelle: Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt (StBA 2018); (European Commission 2020; Bundesregierung 2017; 2019b; Bundesbank 2020; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Bundesministerium der Finanzen 2020; BMWi und BMF 2020), (BMWi und BMF 2020).

3.2 Entwicklung der Primärenergiepreise

3.2.1 Preisprojektionen für Rohöl, Steinkohle und Erdgas

Die internationalen Brennstoffmärkte für Mineralöl, Erdgas und Steinkohle sind in den letzten ein bis zwei Dekaden durch erhebliche Preisvolatilitäten geprägt und befinden sich nach Einschätzung vieler Analysten im Umbruch. Neue Gewinnungs- und Transportoptionen, aber auch politische Interventionen neuer Qualität (z. B. mit Blick auf die Klimapolitik) können die traditionellen Mechanismen in diesen Märkten deutlich verändern.

Vor diesem Hintergrund stellt sich auch die Frage, inwieweit sich die Empfehlungen der Europäischen Kommission für die den Projektionen im Rahmen der Governance-Verordnung zugrundeliegenden Brennstoff-Preisprojektionen (European Commission (EC) 2020) in dieses Bild einordnen. Die entsprechenden Analysen erfolgen für Mineralöl, Erdgas sowie Steinkohle, jeweils mit Blick auf die spezifische Situation der Grenzübergangspreise für Deutschland bzw. Nordeuropa.

Abbildung 5: Preise für Rohöl (Brent) im historischen Trend sowie für ausgewählte Projektionen

Quelle: Historische Preise: Bafa, Intercontinental Exchange (ICE), European Commission (EC) (2020), International Energy Agency (IEA) (2018, 2019, 2020), Energy Information Administration (EIA) (2020)

Abbildung 5 zeigt zunächst die historische Entwicklung für die Rohölpreise der Sorte Brent von 1991 bis Mitte 2020. Nach einer Phase relativ niedriger Preise im Verlauf der 1990er Jahre (die u. a. durch den Zusammenbruch der Sowjetunion und anderer ost- und mitteleuropäischer Staaten sowie den entsprechenden Einflussverlust des OPEC-Kartells geprägt waren) ergaben sich nach der Jahrtausendwende erhebliche Preissteigerung, an die sich nach der Finanz- und Wirtschaftskrise wieder ein Preiszusammenbruch und in den letzten fünf Jahren eine volatile Preissituation ergibt, die im Jahr 2020 auch durch die Sondersituation der weltweiten Covid-19-Pandemie beeinflusst wird. Aktuell liegen die Rohölpreise (in konstanten Preisen von 2016) wieder etwa auf den zur Jahrtausendwende beobachteten Niveaus.

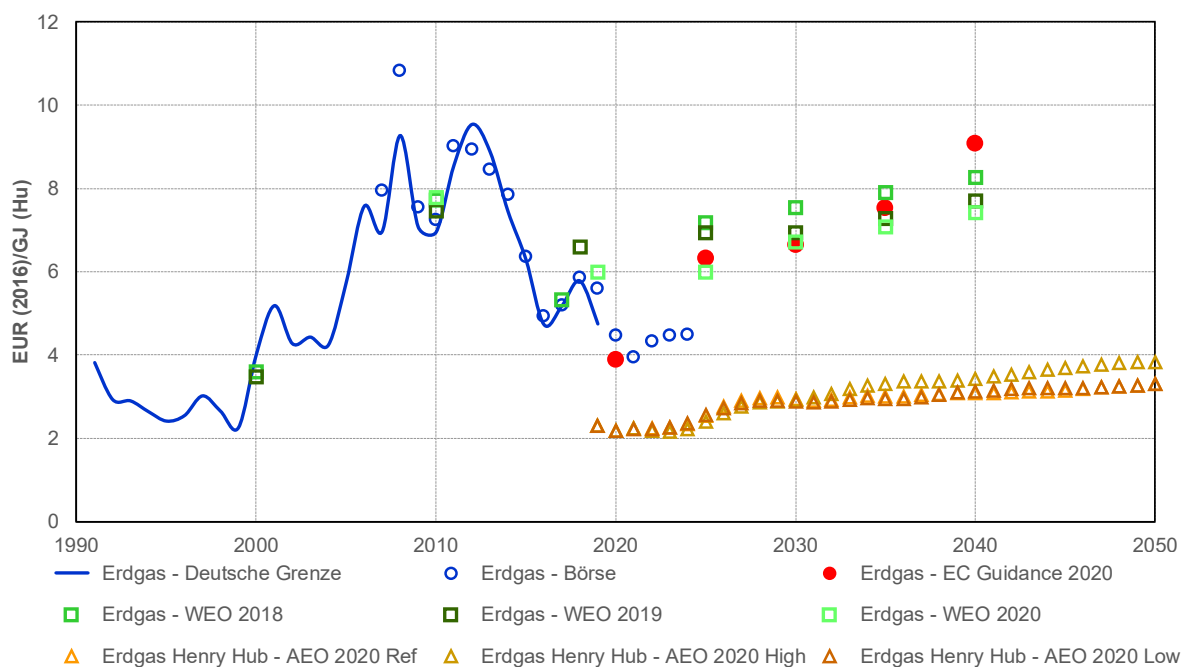
Die Auswertung besonders renommierter bzw. einflussreicher Preisprojektionen bzw. der Empfehlungen seitens der Europäischen Kommission verdeutlicht folgende Aspekte:

- ▶ Die dem World Energy Outlook (WEO) der Internationalen Energieagentur (IEA) zugrunde liegenden Preisprojektionen für Öl sind in den Ausgaben seit 2017 immer weiter nach unten korrigiert worden und liegen nun auch für den längeren Zeithorizont deutlich unter den bisherigen Spitzenniveaus von 2010-2014 (International Energy Agency (IEA) 2017, 2018, 2019, 2020).
- ▶ Eine der aktuellsten Preisprojektionen liegt mit dem Annual Energy Outlook (AEO) 2020 der Energy Information Administration (EIA) der US-Regierung vor (Energy Information Administration (EIA) 2020), deren Verlauf, mit nochmals etwas reduziertem Niveau, etwa denen der verschiedenen WEO-Ausgaben folgt. Der aktuelle World Energy Outlook der International Energy Agency (IEA) (2020) liegt relativ genau auf dem Niveau des AEO 2020.
- ▶ Im Vergleich dazu liegen die Empfehlungen der Europäischen Kommission (European Commission (EC) 2020), die auf den POLES-JRC-Projektionen für das (noch nicht veröffentlichte)

EU Reference Scenario zurückgehen, auf einem nur schwer erklärbaren hohen Niveau (d.h. etwa auf den Niveaus der WEOs 2018 und 2019).

Mit Blick auf die Entwicklungen der letzten Jahre (sowie die im Folgenden beschriebenen Analysen für Erdgas und Steinkohle) wird daher für die Modellierungen die zum Zeitpunkt der Spezifikation der Rahmendaten aktuellste internationale Projektion, der WEO 2020 für die Rohölpreisentwicklung der Sorte Brent zugrunde gelegt.

Abbildung 6: Preise für Erdgas im historischen Trend sowie für ausgewählte Projektionen



Quelle: Historische Preise: Bafa, European Energy Exchange (EEX), European Commission (EC) (2020), International Energy Agency (IEA) (2018, 2019, 2020), Energy Information Administration (EIA) (2020)

Für die historische Entwicklung der Erdgaspreise (Abbildung 6) ergibt sich ein strukturell ähnliches Bild, auch wenn die Volatilitäten jeweils etwas stärker ausgeprägt sind, sich aber vor allem die Börsenpreise für Erdgas zumindest zeitweise deutlich von den durchschnittlichen Grenzübergangspreisen unterscheiden, die vor allem durch langfristige Lieferverträge und deren Preisanpassungsklauseln geprägt werden. Diese Differenzen sind ein starkes Indiz dafür, dass die Preisbildungsmechanismen offensichtlich deutlichen Veränderungsprozessen unterliegen. Des Weiteren ist die Situation für das Jahr 2020 offensichtlich der krisenbedingten Sondersituation sowie die dadurch und andere Faktoren (Wetter etc.) bedingten Speicherstände der europäischen Erdgasspeicher geschuldet.

Mit Blick auf die einschlägigen Preisprojektionen aus dem internationalen Raum bzw. die Empfehlungen der Europäischen Kommission lassen sich folgenden Charakteristika ableiten:

- ▶ Die dem World Energy Outlook (WEO) zugrunde liegenden Preisprojektionen sind auch für Erdgaslieferungen nach Europa seit 2017 immer weiter nach unten korrigiert worden und bleiben auch längerfristig deutlich unter den Spitzenwerten der Vergangenheit (International Energy Agency (IEA) 2017; 2018; 2019; 2020).

- ▶ Mit dem Annual Energy Outlook (AEO) liegen nur Preisprojektionen für den US-Handelsplatz Henry Hub vor (Energy Information Administration (EIA) 2020). Hier wird nach zunächst weiterhin niedrigen Preisniveaus für die zweite Hälfte der 2020er Jahre eine leichte Preiserhöhung erwartet, die sich vor allem aus den ökonomischen Problemen der US-Fracking-Industrie und dem entsprechend zurückgehenden Investitionsvolumen ergibt. Längerfristig folgt eine Periode leichter Preisanstiege, die im Profil der des WEO 2019 folgen, mit Blick auf das Niveau jedoch deutlich darunterliegen. Angesichts der Tatsache, dass LNG-Lieferungen aus dem internationalen Raum wegen ihrer Funktion als Grenzressource in zunehmendem Maße auch die Börsenpreise in Europa prägen, ist es interessant, dass die Erdgaspreise in Europa in den letzten Jahren mit einem mittleren Preisunterschied von etwa 3 €/GJ (zu Preisen von 2016 und bezogen auf den unteren Heizwert) strukturell den Henry Hub-Preisen folgen.
- ▶ Für den Zeitraum bis 2035 verlaufen die auf den POLES-JRC-Projektionen beruhenden Empfehlungen der Europäischen Kommission (European Commission (EC) 2020) auf einem durchaus ähnlichen Pfad wie die des World Energy Outlooks (WEO). Die nach 2035 deutlich anziehenden Erdgaspreise sind jedoch nur schwer nachzuvollziehen bzw. bleiben in erheblichem Maße erklärungsbedürftig.

Vor diesem Hintergrund werden die für die Modellierungen zugrunde gelegten Preistrends für Erdgas auf Basis des WEO 2020 entwickelt. Unter Berücksichtigung der typischen Preisdifferenzen zwischen US-Handelsplatz Henry Hub können aus der Projektion des AEO 2020 ähnliche Preisniveaus und -trends abgeleitet werden.

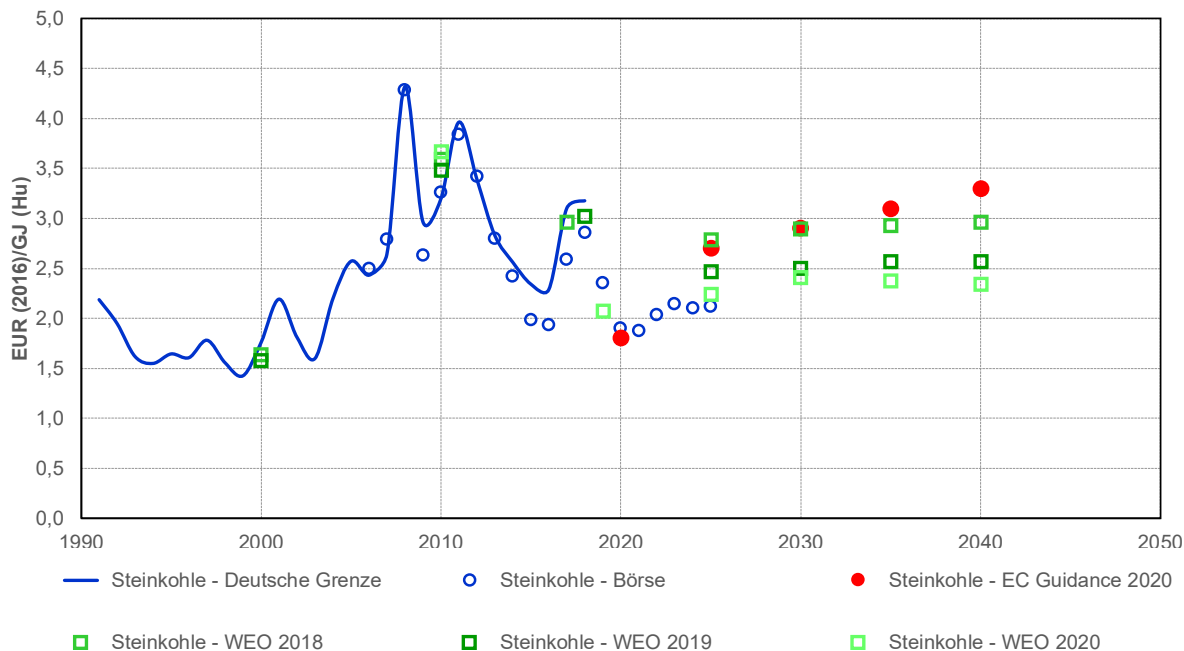
Der historische Trend für Steinkohlelieferungen nach Nordwesteuropa (Abbildung 7) ähnelt strukturell dem der Rohöl- und Erdgaspreise. Auch hier zeigen sich zwischen den amtlich festgestellten mittleren Grenzübergangspreisen für Deutschland und den Börsenpreisen für Steinkohlelieferungen nach Nordwesteuropa zunehmende Differenzen, was tendenziell auf die Herausprägung von zunehmend von anderen Energiepreisentwicklungen entkoppelten, d.h. spezifisch auf die regionale Angebots- und Nachfragesituation für Steinkohle reagierenden Preisbildungsmechanismen hinweist.

Bezüglich der einschlägigen Preisprojektionen bzw. der entsprechenden Empfehlungen ergibt sich das folgende Bild:

- ▶ Die dem World Energy Outlook (WEO) zugrundeliegenden Preisprojektionen sind auch für Steinkohlelieferungen nach Europa seit 2017 immer weiter nach unten korrigiert worden und bleiben im WEO 2020 ab 2030 bei Werten von ca. 2,4 €/GJ bzw. leicht darunter (International Energy Agency (IEA) 2017; 2018; 2019; 2020).
- ▶ Der Annual Energy Outlook (AOE) enthält keine Preisprojektionen, die für Nordwesteuropa verwendbar sein können (Energy Information Administration (EIA) 2020).
- ▶ Die Empfehlungen der Kommission (European Commission (EC) 2020) liegen einerseits wie bei Rohöl im Bereich der Werte, die im WEO 2017 zugrundegelegt sind, zeigen jedoch nach 2030 einen nur schwer erklärbaren Preisschub.

Auf Basis dieses Befundes wird für Steinkohlelieferungen nach Nordwesteuropa die Preisprojektion des WEO 2020 zugrunde gelegt.

Abbildung 7: Preise für Steinkohle im historischen Trend sowie für ausgewählte Projektionen



Quelle: Historische Preise: Bafa, European Energy Exchange (EEX), Intercontinental Exchange (ICE), European Commission (EC) (2020), International Energy Agency (IEA) (2018, 2019, 2020), Energy Information Administration (EIA) (2020)

Vor dem Hintergrund dieser Analysen werden den Modellierungen für Rohöl, Erdgas und Steinkohle die in Tabelle 6 gezeigten Preisdatensätze zugrunde gelegt. Um der Sondersituation des Jahres 2020 angemessen Rechnung zu tragen, werden die Preisniveaus für 2025 als Mittelwert der Stützwerte für 2019 und 2030 ermittelt.

Tabelle 6: Energiepreis-Projektionen für Rohöl, Erdgas und Steinkohle zu Preisen von 2016 (€/GJ), 2019–2040

		2019	2020	2025	2030	2035	2040
Projektionsbericht 2019 / Politikszszenarien IX	Rohöl Brent	9,4	13,2	15,0	16,5	17,2	
	Steinkohle	2,4	2,5	3,0	3,6	3,8	3,8
	Erdgas	5,6	7,7	8,4	9,1	9,7	
Projektionsbericht 2021	Rohöl Brent	9,4	5,9	10,3	11,1	11,8	12,4
	Steinkohle	2,4	1,9	2,2	2,4	2,4	2,3
	Erdgas	5,6	4,5	6,0	6,7	7,1	7,4

Quelle: Öko-Institut

Preise für 2019 sind Börsenpreise an der ICE für Rohöl und Steinkohle sowie Grenzübergangspreise nach Bafa für Erdgas. Alle Angaben sind Grenzübergangs- bzw. nordwesteuropäische Großhandelspreise in €₂₀₁₆/GJ, bezogen auf den unteren Heizwert.

3.2.2 Preisprojektion Braunkohle

Für den Projektionsbericht 2021 werden als Ausgangspunkt für den aktuellen Rand 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. Eine belastbare Aufteilung der Gesamtkosten ist mit folgenden Eckwerten gegeben:

- ▶ 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. 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 (Hermann et al. 2017).

Tabelle 7: Kostenannahmen für das Braunkohleaufkommens, 2019-2040

	2019	2020	2025	2030	2035	2040
Kurzfristige variable Kosten	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
Nicht vermeidbare Kosten	3,3	3,3	3,36	3,3	3,3	3,3
Langfristige Betriebskosten	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
Summe	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4

Quelle: Öko-Institut

Grundsätzlich wird auch für die Zukunft unterstellt, dass die Kosten der Braunkohleförderung inflationsbereinigt konstant bleiben. Im Kontext des gesetzlich vorgeschriebenen Ausstiegs aus der Braunkohleverstromung bis spätestens 2038 wird weiterhin unterstellt, dass es nicht mehr zu relevanten bzw. vermeidbaren Investitionen kommt. Damit bleiben die Kostenstrukturen bis zum Abschluss der Braunkohleverstromung in Deutschland konstant (Tabelle 7).

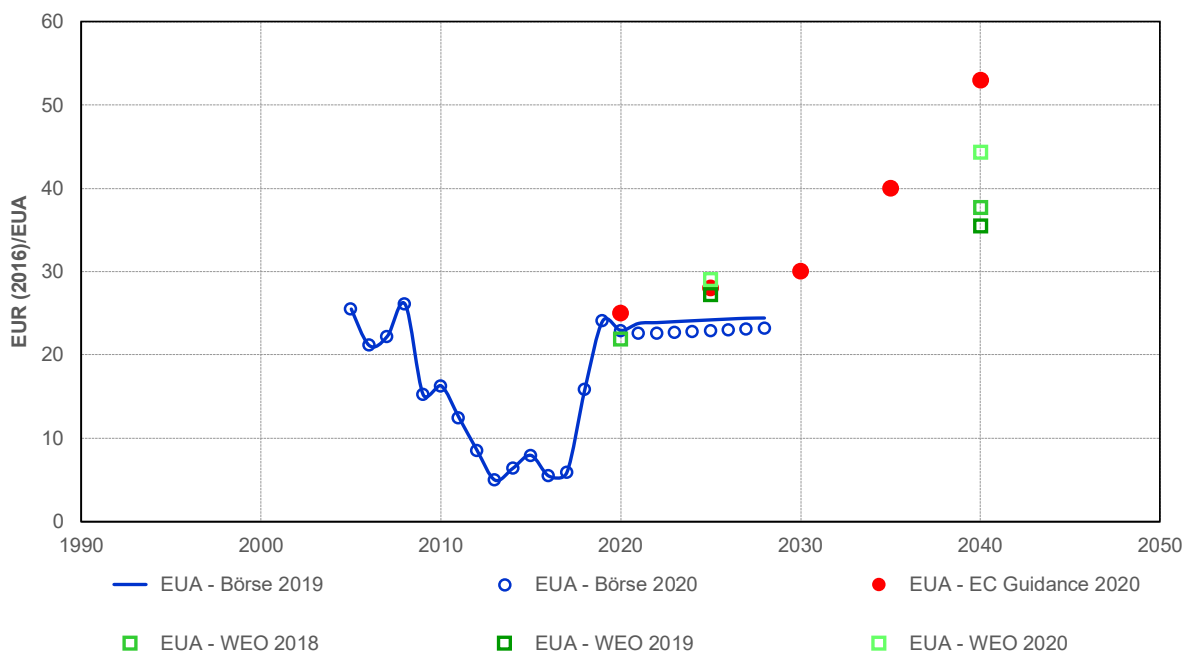
3.3 Entwicklung der Preise für Treibhausgasemissionszertifikate

Die Preise für Emissionsberechtigungen des Europäischen Emissionshandelssystems für Treibhausgase (EU ETS) sind neben den Preisen für Brennstoffe und andere Energieträger eine wesentliche Determinante für die Emissionsentwicklungen in den Bereichen Energiewirtschaft und Industrie.

Die Preisentwicklungen im EU ETS sind in den vergangenen 15 Jahren jedoch durch signifikante Überschussprobleme des Marktes und diverse Gegenmaßnahmen geprägt, wobei letztere erst in den

vergangenen drei Jahren signifikante Effekte gezeigt haben. Erst seit 2018 entstehen im EU ETS wieder Preise, die mit denen vor Beginn der Überversorgungskrise vergleichbar sind (Tabelle 8). Darüber hinaus sind erst ab 2018 Preisniveaus entstanden die zumindest ansatzweise fundamental, d.h. durch die Brennstoffwechselkosten im kontinentaleuropäischen Strommarkt erklärt werden können.

Abbildung 8: Preise für Emissionsberechtigungen des EU ETS im historischen Trend sowie für ausgewählte Projektionen



Quelle: European Energy Exchange (EEX), EC (2020), IEA (2018, 2019, 2020)

Die Preisprojektionen für das EU ETS sind vielfältig, hängen aber durchaus auch von diversen Annahmen zum regulatorische und Energiemarktumfeld ab:

- ▶ Die dem WEO 2020 zugrundeliegenden CO₂-Zertifikatspreisprojektionen für die Referenzprojektion liegen für 2025 mit 29 €/European Union Allowance (EUA) (zu konstanten Preisen von 2016) deutlich über den preisbereinigten Preisen für börsengehandelte Terminkontrakte (im letzten „Normaljahr“ 2019 ergeben sich hier Werte von ca. 24 €/EUA). Für das Jahr 2040 werden hier Werte von ca. 44 €/EUA erwartet, wobei diese Werte in den WEO-Ausgaben von 2017 bis 2019 im Vergleich zum Vorjahr jeweils leicht gesunken, im WEO 2020 dann aber wieder kräftig gestiegen sind (International Energy Agency (IEA) 2017; 2018; 2019; 2020).
- ▶ In den aktuellen Empfehlungen der Kommission erreichen die Zertifikatspreise im Jahr 2025 einen Wert von 28 €/EUA und steigen für die Stützjahre 2030, 2035 und 2040 auf Werte von 30, 40 bzw. 53 €/EUA (European Commission 2020). Für das Jahr 2025 liegt der entsprechende Wert deutlich über den bereits derzeit gehandelten Terminkontrakten für 2025 (25 €/EUA zu Preisen von 2016).
- ▶ In den aktuellen Modellierungsarbeiten der Europäischen Kommission zur Initiative „Stepping up Europe’s 2030 climate ambition“ (European Commission (EC) 2020) wurden mit Blick auf das

Baseline-Szenario Preise für Emissionsberechtigungen des EU ETS von etwa 32 €/EUA sowie von 44,5 €/EUA für das sogenannte MIX-Szenario sowie 60 €/EUA für das sogenannte CPRICE-Szenario im Kontext einer Erhöhung der klimapolitischen Option für die EU-27 errechnet (umgerechnet auf Preise von 2016).

Vor dem Hintergrund der großen Rolle des Stromsystems für die Emissionsentwicklung und damit auch für die Preisentwicklung im EU ETS spielt auch die Konsistenz mit den Brennstoffpreisannahmen eine erhebliche Rolle. Daher wurden mit den Brennstoffpreisannahmen typische Brennstoffwechsel-Konstellationen im kontinentaleuropäischen Strommarkt durchgeführt und entsprechende Brennstoffwechselkosten-Benchmarks abgeleitet, die vergleichsweise gut mit den im Markt beobachteten Preistrends sowie den jüngeren Modellierungsarbeiten der Kommission übereinstimmen und deswegen für das Jahr 2025 in Abweichung von den Kommissionsempfehlungen in Ansatz gebracht werden (Tabelle 8). Mit Blick auf die aus den o.g. Brennstoffwechselkosten-Analysen resultierenden Ergebnisse, die mit 31 €/EUA sehr nahe an den Annahmen der Kommission liegen sowie den erheblichen Unsicherheiten der Ambitionsniveaus nach 2030 und der abnehmenden Rolle des Brennstoffwechsels (v.a. von der Kohle- zur Erdgasverstromung) wurden für die Stützjahre ab 2030 die Empfehlungen der Kommission übernommen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Preise für ETS-Zertifikate zu Preisen von 2016 (€/EUA), 2019-2040

	2019	2020	2025	2030	2035	2040
Projektionsbericht 2019 (entspricht EU-Guidance 2018)		15,5	23,3	34,7	43,5	
Referenzszenario und Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Gesamtabschätzung)		25,0	23,3	34,7	43,5	
Kommissions-Empfehlungen (EU COM 2020)		25,0	28,0	30,0	40,0	53,0
Projektionsbericht 2021	24,1	22,9	25,0	30,0	40,0	53,0
Sensitivität 1 Projektionsbericht 2021	24,1	22,9	34,0	44,5	54,0	65,0
Sensitivität 2 Projektionsbericht 2021	24,1	22,9	49,9	60,6	71,3	82,0

Quellen: European Energy Exchange (EEX), Öko-Institut

Für die Sensitivitätsanalyse 1 bezüglich der Preise für Emissionsberechtigungen des EU ETS wurde für das Stützjahr 2030 der Wert für das MIX-Szenario der Kommission (s.o.) übernommen und unterstellt, dass der Anstieg im Verlauf der ersten fünf Jahre in aktuellen Dekaden etwa linear verläuft und auch in den 2030er Jahren linear um ca. 20 €/EUA je Dekade steigt.

Um das bis Mai 2021 beobachtete Preisniveau für ETS-Zertifikate von knapp unter 50 €/EUA (nominal, Anfang Mai 2021) zu reflektieren, wurde eine zweite Sensitivitätsanalyse (Sensitivität 2) durchgeführt. Für das Jahr 2021 wurde ein Durchschnittswert von 41,4 €/EUA angenommen und für das Stützjahr 2030 der Wert des CPRICE-Szenarios der Kommission (s.o.) übernommen. Der lineare Anstieg zwischen 2021 und 2030 wurde für zukünftige Jahre fortgeschrieben. Im Jahr 2040 liegt der EU-ETS-Zertifikatspreis ca. 20 €/EUA über dem Niveau von 2030.

3.4 Entwicklung der CO₂-Preise für Wärme und Verkehr (BEHG-Preise)

Mit dem Klimaschutzprogramm 2030 wurde am 1. Januar 2021 erstmals eine Bepreisung von CO₂-Emissionen 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) werden die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brenn- und Kraftstoffe erfasst. Das nEHS setzt auf den vorgelagerten Handelsebenen an, also bei den Unternehmen, die Brenn- und Kraftstoffe in Verkehr bringen („Upstream-ETS“). Die rechtliche Umsetzung ist mit der Verabschiedung des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) erfolgt. Zur Vermeidung von Doppelbelastungen sollen Anlagen, die am EU-ETS teilnehmen, möglichst ex-ante von dem CO₂-Preis befreit oder nachträglich hierfür kompensiert werden.

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 des nEHS betreffen. Durch ein vom Bundestag am 8. Oktober 2020 beschlossenes Änderungsgesetz zum BEHG werden Festpreise in der Einführungsphase des nEHS (2021-2025) nach Inkrafttreten des Gesetzes erhöht. Im Startjahr 2021 beträgt der Zertifikatspreis demnach 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 überprüft werden, inwieweit Höchst- und Mindestpreise für die Zeit ab 2027 sinnvoll und erforderlich sind.

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-ETS. 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 die gleichen Annahmen hinsichtlich des Preispfades getroffen wie für die Berechnung des KSPr 2030 im Projekt „Politiksznarien IX“ (Harthan et al. (2020), Veröffentlichung des Langberichts erfolgte im Oktober 2020): 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 beschlossen werden. Für die Zeit ab 2027 wird angenommen, dass der Preis jährlich um 15 € (nominal) ansteigt und im Jahr 2040 275 €/t CO₂ beträgt. Die nominal angegebenen Werte werden für die Modellierung aufgrund unbekannter Regelung zum Inflationsausgleich an reale Preise angepasst und sind in Tabelle 9 dargestellt.

Darüber hinaus hat Deutschland mit dem BEHG eine weitere Regulierung eines Teils der Emissionen, die unter die Effort-Sharing-Regulation (ESR) fallen, geschaffen. Das BEHG leitet von den jährlichen ESR-Emissionsmengen jährlich zulässige Brennstoffemissionen ab, die unter den nationalen Emissionshandel (nEHS) fallen. Der nEHS bepreist somit den Großteil derjenigen CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Brennstoffen, die nicht bereits dem Europäischen Emissionshandel (EU-ETS) unterliegen. Eine Auswertung der Ergebnisse zur Entwicklung der Treibhausgase in EU-ETS, ESR und BEHG kann Abschnitt 14.4 entnommen werden.

Tabelle 9: CO₂-Preise für Verkehr und Wärme sowie für die nicht vom EU ETS erfassten Emissionen der Industrie

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
2036	215	176
2037	230	187
2038	245	198
2039	260	209
2040	275	220

Quelle: (Vermittlungsausschuss 2019), Öko-Institut

3.5 EEG-Umlagesenkung

Im Klimaschutzprogramm 2030 war im Kontext der Einführung des BEHG (Deutscher Bundestag 2019) 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-Preisungspfades beträgt die Entlastung 2022 0,5 Cent pro kWh und 2023 0,625 Cent pro kWh.“

Mit der Einigung im Vermittlungsausschuss wurde 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.“

Am 3. Juni 2020 wurde ein Corona-Konjunktur- und Krisenbewältigungspaket von der Bundesregierung beschlossen. Dies beinhaltet, dass ab 2021 zusätzlich zum Brennstoffemissionshandel ein weiterer Zuschuss durch Haushaltsmittel des Bundes zur schrittweisen Senkung der EEG-Umlage geleistet wird. Ab 2021 wird zusätzlich zu den Einnahmen aus dem BEHG ein weiterer Zuschuss aus Haushaltsmitteln des Bundes zur schrittweisen verlässlichen Senkung der EEG-Umlage geleistet. Damit soll die Umlage von 6,5 ct/kWh im Jahr 2021 auf maximal 6,0ct/kWh im Jahr 2022 sinken.¹²

Am 2. Juli 2020 hat der Bundestag die Verordnung der Bundesregierung zur Änderung der Erneuerbare-Energien-Verordnung (EEV, 19/19381, 19/19655 Nr. 2.3) in der vom Ausschuss für Wirtschaft und Energie geänderten Fassung (19/20653) angenommen. Mit der Verordnung wird die Grundlage für geplante Absenkungen der Umlage nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geschaffen. Die sogenannte EEG-Umlage als Bestandteil des Strompreises wird damit ab Januar 2021 unter Einsatz von Haushaltsmitteln gesenkt.

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 die Jahre 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 (2021 und 2022) 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 erlassen ist. Für die Modellrechnung wurde die Annahme getroffen, dass dieses zusätzliche Finanzierungsvolumen, das nicht

¹² <https://www.netztransparenz.de/EEG/EEG-Umlagen-Uebersicht>

für die Entlastung der EEG-Umlage zur Verfügung steht, für die Jahre 2021 bis 2026 von ca. 390 auf 960 Mio. € jährlich ansteigt;

- entsprechend der Festlegungen im Corona- und Konjunkturpaket wird die EEG-Umlage für 2021 und 2022 durch Mittel aus dem Bundeshaushalt auf 6,5 bzw. 6,0 ct/kWh begrenzt;
 - aus einer leichten Glättung der Zusatzeinnahme folgt für die EEG-Umlage der Jahre 2023 und 2024 eine Senkung von 2,0 bzw. 2,5 ct/kWh, die entsprechende Reduktion der EEG-Umlage 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 (nominal) 6,3 ct/kWh und auch nach 2030 nochmals (leicht) ansteigen, so dass es 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.

Für die Modellierungen wurden die genannten Nominalwerte mit den allgemein verwendeten Deflatoren auf die Preisbasis von 2016 umgerechnet.

3.6 Entwicklung der Endverbraucherpreise für Strom

Die Entwicklung der mittleren Strom-Endverbraucherpreise ist in Tabelle 10 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. Für die Jahre 2021 und 2022 ist die beschlossene Deckelung der Regel-EEG-Umlage auf 6,5 bzw. 6 ct/kWh berücksichtigt. Für die Jahre nach 2022 ist berücksichtigt, dass die EEG-Umlage aus Mitteln des nEHS gedämpft wird. Die Haushalts-Preise für das Jahr 2020 beruhen auf statistischen Werten, während für die Industrie lediglich Statistiken der Endverbraucherpreise bis 2018 verfügbar sind. Die Preise für GHD-Unternehmen wurden aus den einzelnen Preiskomponenten abgeleitet, die größtenteils für das Jahr 2020 verfügbar sind.

Tabelle 10: Annahmen zur Entwicklung der mittleren Endverbraucher-Strompreise je Sektor [Euro-cent₂₀₁₆/kWh]

Sektor	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Haushalte (inkl. MWSt)	28,9	29,0	30,9	29,0	26,9	27,9
GHD (ohne MWSt)	21,3	20,9	20,8	19,8	17,9	18,7
Industrie (ohne MWSt)	10,6	10,7	11,8	12,0	11,2	12,6

Quellen: Eigene Berechnungen basierend auf Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2018), BMWi (2016), Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2016), Bundesnetzagentur (2015), Öko-Institut (2015)

4 Übergreifende Maßnahmen

Im Folgenden werden übergreifende Maßnahmen beschrieben, die in mehreren Sektoren wirken. Die Quantifizierung ihrer Wirkung erfolgt jedoch überwiegend in den einzelnen Sektoren, um die Einsparungen den jeweiligen Sektorzielen korrekt zuordnen zu können. Alle grundsätzlich sektorübergreifenden, jedoch auf sektoraler Ebene quantifizierten Maßnahmen werden im Folgenden mit einem „*“ gekennzeichnet. Die allgemeine Beschreibung der übergeordneten Maßnahmen erfolgt im nachfolgenden Abschnitt. Die sektorspezifische Ausgestaltung und Parametrisierung wird in den jeweiligen Sektorkapiteln dargestellt.

4.1 Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung

a) EU-Emissionshandelssystem*

Die Änderungen der Emissionshandelsrichtlinie für die vierte Handelsperiode 2021-2030 sind am 8. April 2018 in Kraft getreten. Die novellierte Richtlinie enthält wichtige Neuerungen zur Stärkung des EU-ETS und seines Preissignals. Die Gesamtmenge der versteigerten und kostenlos zugeteilten Emissionszertifikate sinkt ab 2021 um 2,2 % p. a. (jeweils bezogen auf den Referenzwert im Jahr 2010). Mit der Marktstabilitätsreserve (MSR) werden dem Markt ab 2019 bis 2023 nun jährlich 24 statt 12 % der überschüssigen Zertifikate entzogen. Ab 2023 ist die maximale Größe der Marktstabilitätsreserve auf die Versteigerungsmenge des Vorjahres beschränkt. Darüberhinausgehende Überschüsse werden aus der MSR gelöscht. Außerdem haben Mitgliedstaaten die Möglichkeit, die Anzahl der Zertifikate zu reduzieren, wenn durch zusätzliche nationale Klimaschutzinstrumente fossile Kraftwerke stillgelegt werden. Wegen der komplexen Wechselwirkungen auf europäischer Ebene kann eine eigene, modellendogene Berechnung des Preises für Emissionszertifikate (CO₂-Preis bzw. EUA-Preis) nicht erfolgen. Deshalb wird der CO₂-Preis des EU-ETS der Sektormodellierung als exogener Rahmenparameter vorgegeben.

b) EEG-Umlagesenkung (Maßnahme 3 des Konjunkturpaketes der Bundesregierung)*

Im Eckpunktepapier des Koalitionsausschusses vom 3. Juni 2020 wird für das Jahr 2021 ein starker Anstieg der EEG-Umlage erwartet. Als Grund wird der Rückgang der Wirtschaftsleistung und der damit verbundene Rückgang des Börsenstrompreises genannt. Um für mehr Verlässlichkeit bei den hoheitlich bestimmten Strompreisbestandteilen zu sorgen, ist ein Zuschuss aus Haushaltsmitteln des Bundes zur „schrittweisen verlässlichen Senkung“ der EEG-Umlage vorgesehen, sodass diese im Jahr 2021 bei 6,5 ct/KWh, im Jahr 2022 bei 6,0 ct/KWh liegen wird. Diese Maßnahme wird auch durch staatliche Einnahmen aus dem Brennstoffemissionshandel finanziert. Auch nach 2022 sollen Einnahmen aus dem Brennstoffemissionshandel zur Senkung der EEG-Umlage eingesetzt werden. Die hierzu erforderlichen Anpassungen in der Erneuerbare-Energien-Verordnung wurden bereits mit Änderungsverordnung vom 15. Juli 2020 umgesetzt. Das ebenfalls novellierte EEG trat zum 1. Januar 2021 in Kraft („EEG 2021“) und wurde parallel als Beihilfe notifiziert.

c) Energie- und Stromsteuer*

Mit dem Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerreform vom 24. März 1999 (BGBl. I S. 378) und den entsprechenden Folgegesetzen wurde die Besteuerung verschiedener fossiler Brennstoffe und Strom so verändert, dass sie eine höhere Lenkungswirkung im Sinne der Energieeinsparung beinhaltet. Das Stromsteuergesetz und das Energiesteuergesetz sehen nach Verbrauchssegmenten und Energieträgern differenzierte Steuersätze vor. Einige Verbrauchssegmente sind gänzlich von der Besteuerung befreit. Es handelt sich hier somit um eine schon lange bestehende sektorübergreifende

Maßnahme, die jedoch weiterhin Wirkung im Hinblick auf Energieeinsparung und Treibhausgasmin- derung zeigt. Die Quantifizierung ihrer Wirkung erfolgt wie bei den anderen übergreifenden Maß- nahmen auf sektoraler Ebene.

d) CO₂-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)*

Die Bundesregierung hat sich im Klimaschutzprogramm 2030 dafür ausgesprochen, ab 2021 eine CO₂-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (Non-ETS-Sektoren) einzuführen. Diese ist am 1. Januar 2021 gestartet. Der Bundestag hatte die Einführung einer solchen CO₂-Bepreisung mit dem im Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) begründeten nationalen Emissionshandel (nEHS) bereits im Dezember 2019 beschlossen. Der nEHS erfasst Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, insbesondere Heizöl, Flüssiggas, Erdgas, Kohle, Benzin und Diesel. Bis einschließlich 2025 ist ein Festpreissystem eingeführt, welches im Jahr 2026 von einem Preiskorridor abgelöst wird. Dadurch soll ein verlässlicher Preispfad entstehen, der es privaten Haushalten und Unternehmen ermöglicht, sich auf die Entwicklung einzustellen. Betroffen von diesem Gesetz sind vor allem die Bereiche Gebäude, Verkehr und Industrie, wo auch die Wirkungsabschätzung dieser Maßnahme erfolgt.

Der CO₂-Preis beträgt 2021 zunächst 25 €/t und steigt dann schrittweise auf 55 €/t im Jahr 2025 an. Für das Jahr 2026 gilt ein Preiskorridor von mindestens 55 und höchstens 65 €/t. Danach soll sich der Preis grundsätzlich am Markt bilden. Grundlage für diese CO₂-Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr ist das „Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG)“; die dargestellten Zertifikatpreise beruhen auf einer am 8. Oktober 2020 beschlossenen Änderung dieses Gesetzes.

In § 7 Abs. 4 BEHG ist festgelegt, dass die Bundesregierung ermächtigt ist, durch Rechtsverordnung ohne Zustimmung des Bundesrates Standardwerte für Emissionsfaktoren von Brennstoffen festzule- gen. Demnach sollen z. B. biogene Brennstoffe bei entsprechendem Nachhaltigkeitsnachweis mit dem Emissionsfaktor Null belegt werden.

e) Energie- und Klimafonds (EKF)*

Mit dem Gesetz zur Errichtung eines Sondervermögens „Energie- und Klimafonds“ (EKF) vom 8. De- zember 2010 (BGBl. I S. 1807) wurde ein finanzieller Rahmen für die Durchführung energie- und kli- mapolitischer Maßnahmen geschaffen. Nach den Beschlüssen der Bundesregierung vom 6. Juni 2011 zur beschleunigten Energiewende fließen dem EKF seit 2012 sämtliche Erlöse aus der Versteigerung von Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen (nach Abzug der Kosten für die Deutsche Emissionshandelsstelle) zu. Zum Wirtschaftsplanausgleich erhält der EKF auch einen Zuschuss aus dem Bundeshaushalt. Der EKF beinhaltet ab dem Wirtschaftsplan 2016 die Umsetzung der am 1. Juli 2015 vereinbarten weiteren Energieeffizienzmaßnahmen und des Nationalen Aktionsplans Energie- effizienz (NAPE) sowie seit 2018 die Umsetzung großer Teile des Sofortprogramms Saubere Luft. Ab dem Wirtschaftsplan 2020 ist der EKF auch das zentrale Instrument für die Realisierung des Klima- schutzprogramms 2030 vom 9. Oktober 2019. Der EKF stellt damit eine übergeordnete finanzielle Rahmenmaßnahme dar, mit der der finanzielle Rahmen für die Umsetzung einer Vielzahl von Maß- nahmen in den einzelnen Sektoren geschaffen wird. Die Wirkungsabschätzung dieser aus dem EKF finanzierten Maßnahmen erfolgt in den jeweiligen Sektoren.

f) Nationale Klimaschutzinitiative (NKI)*

Mit der NKI initiiert und fördert das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Si- cherheit seit 2008 zahlreiche Projekte, die einen Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen leisten. Die Finanzierung der NKI erfolgt über Mittel des EKF (s. o.). Ihre Programme und Projekte

decken ein breites Spektrum an Klimaschutzaktivitäten ab: von der Entwicklung langfristiger Strategien bis hin zu konkreten Hilfestellungen und investiven Fördermaßnahmen soll die NKI zu einer Verankerung des Klimaschutzes vor Ort beitragen. Hauptzielgruppen der NKI sind die Kommunen, die Wirtschaft und Verbraucher sowie Schulen und Bildungseinrichtungen. Zwei aus der NKI finanzierte, investive Maßnahmen sind die Förderung von Kälte- und Klimaanlageanlagen und die Förderung von Mini-KWK-Anlagen. Diese werden im Sektor Industrie & Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) sowie im Gebäudesektor behandelt und modelliert (siehe Abschnitt 6 und 7). Größtes Programm ist die „Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld“, kurz „Kommunalrichtlinie“. Hier werden vielfältige strategische Klimaschutzmaßnahmen wie beispielsweise Klimaschutzkonzepte, Personalstellen im Klimaschutzmanagement in Kommunen sowie Energiemanagementsysteme gefördert. Gefördert werden zudem vor allem investive Klimaschutzmaßnahmen beispielsweise im Bereich der Beleuchtung, nachhaltige Mobilität (Radverkehr), Abfallentsorgung inklusive Maßnahmen im Bereich Siedlungsabfalldeponien (s. Abschnitt Abfallwirtschaft), Abwasser oder Trinkwasserversorgung.

Im April 2016 wurde der "Förderaufruf für kommunale Klimaschutz-Modellprojekte" im Rahmen der NKI veröffentlicht. Der Förderaufruf entfaltet in mehreren Sektoren seine Wirkung, aufgrund der Heterogenität ist eine Einzelmaßnahmenbewertung jedoch nicht durchführbar.

g) Pilotprogramme Einsparzähler*

Das Pilotprogramm Einsparzähler zielt darauf ab, den Trend zur Digitalisierung für Energieeffizienz nutzbar zu machen. Gefördert werden Unternehmen, die innovative digitale Systeme und darauf aufbauende Geschäftsmodelle für die Energiewende erproben und demonstrieren. Die Unternehmen werden mit bis zu zwei Millionen € gefördert. Innerhalb der Pilotvorhaben müssen für einzelne Geräte oder ganze Anlagen Energieverbrauchsdaten exakt erfasst und einzelnen Geräte- oder Anlagen(gruppen) zugeordnet werden. Dies ist die Basis für die IT-gestützte individuelle Ermittlung der Einsparpotenziale. Die aktuelle Förderbekanntmachung „Pilotprogramme Einsparzähler“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) stammt vom 18. Februar 2019 (BAnz AT 21.02.2019). Sie ist befristet bis 31. Dezember 2022 und ersetzt die Förderbekanntmachung „Pilotprogramm Einsparzähler“ vom 20. Mai 2016. Die Bewilligungsbehörde ist das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Mit den bisherigen Pilotprojekten wurden Energieeinsparungen in den Sektoren Private Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Industrie und Verkehr erzielt. Die Berücksichtigung dieses übergeordneten Programms erfolgt dementsprechend in den jeweiligen Sektoren.

h) Nationale Wasserstoffstrategie

Die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) der Bundesregierung wurde vom Bundeskabinett am 10. Juni 2020 beschlossen. Zur konsequenten Umsetzung und Weiterentwicklung der Strategie ist vorgesehen, eine flexible und ergebnisorientierte Governance-Struktur zu schaffen. Im Mittelpunkt steht dabei die Einrichtung eines Nationalen Wasserstoffrates, der am 9. Juli 2020 zu seiner konstituierenden Sitzung zusammentrat.

Im Konjunkturprogramm der Bundesregierung vom 3. Juni 2020 wurde beschlossen, die Förderung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie auszuweiten. Das Konjunkturprogramm unterstützt damit die in der NWS festgelegten Maßnahmen. Insgesamt sind hier für nationale Maßnahmen Mittel in einem Umfang von 7 Mrd. € vorgesehen (einschließlich Investitionszuschüsse für den Umstieg von fossilen Energieträgern auf Wasserstoff bei industriellen Prozessen). Viele Einzelmaßnahmen lassen sich dem Sektor Industrie zuordnen. So etwa die Entwicklung eines neuen Pilotprogramms für Klimaschutzverträge nach dem Prinzip Carbon Contracts for Difference (CCfD), das sich zunächst auf die Stahl-, Chemie-, und Zement- und Kalkindustrie mit prozessbedingten Emissionen

bezieht. Weiterhin soll eine Nachfragequote für klimafreundliche Grundstoffe, z. B. grünen Stahl, geprüft werden. Ebenso Ausschreibungsmodelle für die Herstellung von grünem Wasserstoff, der zum Beispiel zur Dekarbonisierung der Stahl- und Chemieindustrie dient.

Ein wichtiges Instrument für die Umsetzung der NWS ist das Important Project of Common European Interest (IPCEI) Wasserstoff. Hier plant die Bundesregierung die Förderung von integrierten Projekten entlang der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette und hat auf EU-Ebene eine Koordination angeboten. In Q1/2021 wurde das Interessenbekundungsverfahren eröffnet, in dem Unternehmen entsprechende Vorhaben einreichen können.

4.2 Ordnungsrecht

i) Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie*

Die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG (vormals: Richtlinie 2005/32/EG) stellt den Rechtsrahmen für die Festlegung von Mindesteffizienzstandards für energieverbrauchsrelevante Produkte, welche neu auf den europäischen Binnenmarkt kommen, dar. Die neugefasste Richtlinie 2009/125/EG wurde durch das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) in der Fassung vom 25. November 2011 in deutsches Recht umgesetzt, welches das Energiebetriebene-Produkte-Gesetz (EBPG) vom 27. Februar 2008 ablöste. Die Mindesteffizienzstandards werden nicht durch die Richtlinie selbst, sondern erst durch die auf ihrer Grundlage erlassenen EU-Durchführungsverordnungen festgelegt. Diese EU-Durchführungsverordnungen sind direkt in den Mitgliedstaaten gültig. Die festgelegten Anforderungen sind eine der Voraussetzungen, damit ein Produkt die CE-Kennzeichnung tragen und in der EU auf den Markt gebracht oder in Betrieb genommen werden darf. Die Anforderungen werden auf Grundlage einer technischen, wirtschaftlichen und umweltbezogenen Analyse festgelegt. Hierzu wird für jede Produktgruppe oder horizontale Maßnahme (wie z. B. Regulierung des Standby-Verbrauchs) eine Vorstudie im Auftrag der Europäischen Kommission durchgeführt, die unter anderem eine Marktanalyse und eine technische Analyse der Produkte beinhaltet. Wird nach dieser Vorstudie eine Regulierung als sinnvoll und möglich erachtet, erstellt die Kommission einen Regulierungsentwurf, der einer Stakeholderkonsultation (Konsultationsforum) und einem Impact Assessment unterzogen wird. Die Europäische Kommission hat auch die Möglichkeit, freiwillige Selbstvereinbarungen der Industrie als Alternative zu ordnungsrechtlichen Maßnahmen anzuerkennen. Insgesamt gibt es derzeit 29 Ökodesign-Verordnungen und 3 freiwillige Vereinbarungen, wovon eine seit dem 1. Dezember 2020 beendet ist.¹³

Im MMS werden alle relevanten Durchführungsmaßnahmen, die bis zum 31. August 2020 beschlossen wurden, quantifiziert. Die Quantifizierung erfolgt in dem Sektor, dem die Produktgruppe jeweils zuzuordnen ist.

¹³ Leicht abweichende Zahlen über die Zeit ergeben sich daraus, dass im Zuge der Revision von Verordnungen verschiedene Produktgruppen neu zugeschnitten wurden.

Tabelle 11: Übersicht Ökodesign-Richtlinie: Umsetzungsstand und Modellierung

Losnummer	Produktgruppe	Vorstudie abgeschlossen	Energieeffizienzmindestanforderung (verbindlich ab)	Industrie	GHD	Haushalte
ENER 1	Heizkessel und Kombiboiler (Gas/Öl/elektrisch)	ja	26.9.2015	X	X	X
ENER 2	Warmwasserbereiter (Gas/Öl/elektrisch)	ja	26.9.2015		X	X
ENER 3	PCs (Desktop/Laptop) und Computermonitore	ja	1.7.2014		X	X
ENER 4	Bildgebende Geräte (Drucker, Scanner, Kopierer, ...)	ja	Freiwillige Vereinbarung	X	X	X
ENER 5	Elektronische Displays	ja	7.1.2010; rev. 1.3.2021			X
ENER 6	Bereitschafts- und im Aus-Zustand	ja	7.1.2020; rev. 1.4.2017		X	X
ENER 7	Externe Netzteile	ja	27.4.2010; rev. 1.4.2020			
ENER 8; 9	Bürobeleuchtung und Straßenbeleuchtung	ja	13.4.2010; rev. 1.9.2021	X	X	
ENER 10	Klimatechnik bis 12 kW- und Komfortventilatoren bis 125 W	ja	1.1.2013 ¹⁴		X	X
ENER 11	Elektromotoren	ja	12.8.2009; rev. 1.7.2021	X	X	
ENER 11	Umlaufpumpen	ja	1.1.2013	X	X	X
ENER 11	Ventilatoren	ja	1.1.2013	X	X	
ENER 11	Wasserpumpen	ja	1.1.2013	X		
ENER 12	Kühlgeräte mit Direktverkaufsfunktion	ja	1.3.2021		X	
ENER 13	Kühl- und Tiefkühlgeräte im Haushalt	ja	1.7.2010; rev. 1.3.2021			X
ENER 14	Haushaltswaschmaschinen und -waschtrockner	ja	1.12.2011, rev. 1.3.2021			X
ENER 14	Haushaltsgeschirrspüler	ja	1.12.2021; rev. 1.3.2021			
ENER 15	Festbrennstoffkessel	ja	1.1.2020		X	X

¹⁴ Vorstudie zur Revision Mai 2018 abgeschlossen, Konsultationsforum September 2019

ENER 16	Haushaltswäschetrocknern	ja	1.11.2013			X
ENER 17	Staubsauger	ja	1.9.2014			X
ENER 18	Komplexe Set-Top-Boxen	ja	Freiwillige Vereinbarung beendet (12.2020)			X
ENER 19	Haushaltsbeleuchtung, allgemeine Beleuchtung	ja	1.9.2009, rev. 1.9.2022		X	X
ENER 19	Überarbeitung: Beleuchtungstechnik	ja	1.1.2013; rev. 1.9.2023		X	X
ENER 20	Einzelraumheizgeräte	ja	1.1.2018		X	X
ENER 20	Festbrennstoff-Einzelraumheizgeräte	Ja	1.1.2022		X	X
ENER 21	Luftheizungsprodukte, Kühlungsprodukte, Prozesskühler	ja	1.1.2018	X	X	X
ENER 22	Haushaltsbacköfen, -kochmulden und -dunstabzugshauben	Ja	20.2.2015			X
ENER 24	Gewerbliche Geschirrspüler, Waschmaschinen und Trockner	ja	Keine Regulierung		X	
ENER 25	Nicht-gewerbliche Kaffeemaschinen	ja	1.1.2015			X
ENER 26	Verbrauch im vernetzten Betriebsbetriebsbetrieb (networked stand-by)	ja	1.1.2015		X	X
ENER 27	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV)	ja	Keine Regulierung		X	X
ENER 28	Abwasserpumpen	ja	Keine Regulierung		X	X
ENER 29	Pumpen für Schwimmbecken, Brunnen etc.	ja	Keine Regulierung		X	X
ENER 30	Spezielle Motoren (Antriebe außerhalb VO 640/2009)	ja	1.7.2021	X	X	
ENER 31	Kompressoren	ja	Keine Regulierung	X	X	
ENER 32	Fenster	ja	Keine Regulierung		X	X
ENER 33	Smart grid Geräte und Verbrauchszähler	ja	Keine Regulierung		X	X
ENER 34	Weinkühlschränke	nein	Integriert in Regulierung zu Haushaltskühlgeräten		X	X

ENER 35	Stromerzeuger	nein	Keine Regulierung			
ENER 36	Dämmstoffe	ja	Keine Regulierung			
ENER 37	Beleuchtungssysteme	ja	1.9.2021	X	X	X
SSTB	Einfache Set-Top-Boxen	ja	25.2.2010			X
ENTR 1	Gewerblichen Kühlgeräte	ja	1.7.2016	X	X	
ENTR 2	Transformatoren	ja	1.7.2015, rev. 1.7.2021	X	X	
ENTR 3	Spielkonsolen	ja	Freiwillige Vereinbarung (zuletzt 24.03.2020)	X	X	X
ENTR 4	Industrie- und Laboröfen	ja	Keine Regulierung	X		
ENTR 5	Werkzeugmaschinen	ja	Keine Regulierung	X		
ENTR 5	Schweißgeräte	ja	1.1.2023	X		
ENTR 6	Lüftungsanlagen	ja	1.1.2016	X	X	
ENTR 9	Server und Datenspeicherprodukte	ja	1.3.2020	X	X	
ENV 1	Wasserhähne und Duschköpfe	ja	Voraussichtlich keine Regulierung, sondern freiwilliges Label		X	X

Quelle: Zusammenstellung Fraunhofer ISI, basierend auf https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-products/list-regulations-product-groups-energy-efficient-products_en, <https://netzwerke.bam.de/Netzwerke/Naviga-tion/DE/Evpg/evpg.html> und <https://circabc.europa.eu/>.

j) **Energielabel – EU-Verordnung zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung***

Die seit dem 1.8.2017 geltende Verordnung (EU) 2017/1369 zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung löst die zuvor geltende Richtlinie 2010/30/EU ab. Diese EU-Rahmenverordnung gilt in jedem EU-Mitgliedstaat unmittelbar und muss anders als bei Richtlinien nicht in nationales Recht umgesetzt werden. Mit der neuen Rahmenverordnung ist insbesondere eine Rückkehr zum A-G Label (Pluszeichen wie A+++ werden künftig nicht mehr verwendet), eine Neubewertung der Effizienzklassen (Neuskalierung) für solche Produktgruppen sowie eine Registrierung in einer Produktdatenbank vorgesehen.

In Deutschland wurde die EU-Rahmenverordnung zur Energieverbrauchskennzeichnung von Produkten mit der Neufassung des Energieverbrauchskennzeichnungsgesetzes (EnVKG) und der Novellierung der Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung (EnVKV) ergänzt.

Im MMS werden alle Gerätegruppen berücksichtigt, für die mit Stichtag 31. August 2020 eine Pflichtkennzeichnung unter dieser Regelung besteht. Die Quantifizierung erfolgt wie bei den Mindeststandards in dem Sektor, dem die Produktgruppe jeweils zuzuordnen ist. Derzeit betreffen die meisten der delegierten Verordnungen die Bereiche private Haushalte (insbesondere große Haushaltsgeräte und Fernseher) sowie Gebäude (Heizgeräte, Warmwasserbereiter).

- k) NEC-Richtlinie (EU) 2016/2284 über nationale Emissionsminderungsverpflichtungen für bestimmte Luftschadstoffe

Die im Dezember 2016 beschlossene, neue NEC-Richtlinie (EU) 2016/2284 über nationale Emissionsminderungsverpflichtungen für bestimmte Luftschadstoffe schreibt u. a. eine Reduzierung der NH₃-Emissionen ggü. 2005 um 29 % Prozent bis 2030 vor. Laut Klimaschutzprogramm 2030 (Kap. 3.4.5.1) soll eine zügige und umfassende Umsetzung aller Minderungsoptionen der Maßnahmen des nationalen Luftreinhalteprogramms (NLRP, Bundesregierung 2019) zur Erfüllung der NEC-Richtlinie erfolgen. Daher wird im MMS davon ausgegangen, dass das NLRP umgesetzt wird und die Minderungsziele für die NH₃-Emissionen bis 2030 erreicht werden. Durch die Senkung der NH₃-Emissionen vermindern sich auch die indirekten Lachgasemissionen aus Stickstoffdepositionen, die durch die Landwirtschaft verursacht werden. Diese Reduzierung ist durch die konsequente Umsetzung verschiedener Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung der NH₃-Emissionen aus der Landwirtschaft erreichbar, u. a. die Abdeckung von Güllelagern, die sofortige Einarbeitung oder Injektion von Wirtschaftsdüngern, der Einsatz von Ureaseinhibitoren bei Einsatz mineralischer Harnstoffdünger oder der verstärkte Einsatz von Abluftfiltern in der Schweine- und Geflügelhaltung. Viele dieser Maßnahmen sind bereits rechtlich vorgeschrieben, einerseits über die aktuelle Düngeverordnung 2020 (emissionsarme Ausbringung von Wirtschaftsdüngern, Einsatz von Ureaseinhibitoren) oder über das Immissionsschutzrecht (bauliche Abdeckung von Gülle- und Gärrestlagern in genehmigungspflichtigen Anlagen, Ländereirlasse zur Stallabluftreinigung in großen Schweinemastanlagen). Weiterhin werden bestimmte, emissionsmindernde Maschinen und Anlagen über Investitionshilfen gefördert.

4.3 Sonstige quantifizierte Instrumente

- l) Klimaneutrale Bundesverwaltung bis 2030*

Diese übergeordnete Maßnahme aus dem Klimaschutzprogramm 2030 (Kap. 3.5.1) umfasst eine Reihe von Einzelmaßnahmen:

- ▶ Einführung von Umweltmanagementsystemen nach EMAS/LUMASPlus in der Bundesverwaltung bis 2025
- ▶ Steigerung des Anteils elektrisch betriebener Kraftfahrzeuge gemäß §2 Elektromobilitätsgesetz (EmoG) und mit Biogas betriebener Kraftfahrzeuge
- ▶ Minderung der Emissionen aus Dienstreisen durch (1) Reisevermeidung durch verstärkten Einsatz von Video- und Telefonkonferenzen und Aufnahme der Reisevermeidung als Ziel in die Leitbilder der Behörden sowie (2) Änderungen im Bundesreisekostengesetz
- ▶ Bestehende Klimaschutzziele im Projekt Green-IT Bund nachschärfen und ausbauen
- ▶ Verwaltungsvorschrift zur klimafreundlichen öffentlichen Beschaffung

Die Wirkungsabschätzung erfolgt in dem Sektor, dem die Einzelmaßnahme jeweils zuzuordnen ist.

4.4 Flankierende Instrumente

Sowohl das Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 als auch das Klimaschutzprogramm 2030 und die EffSTRA enthalten eine Reihe von sektorübergreifenden Instrumenten, die hier als flankierend eingestuft werden. Diese Instrumente, die überwiegend informatorischer Art sind oder die Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen erleichtern sollen bzw. Forschungscharakter haben, lassen sich dadurch charakterisieren, dass ihnen keine eigenständige quantitative Wirkung zugeschrieben werden kann, sie jedoch die Wirkung anderer quantifizierter Maßnahmen unterstützen. Auch ohne eigenständige quantitative Wirkung sind diese Maßnahmen relevant für die Berechnung des MMS.

Weitere flankierende Instrumente, die lediglich einen Sektor betreffen, werden ggf. dort beschrieben. Die meisten der als flankierend eingestuften Instrumenten sind jedoch als sektorübergreifend einzustufen.

4.4.1 Flankierende Instrumente aus dem Aktionsprogramm Klimaschutz 2020¹⁵

- m) Freiwillige Produktkennzeichnungen für energierelevante Produkte (Blauer Engel, Energy Star, EU-Umweltzeichen)

Seit 2009 ist Klimaschutz ein Schwerpunkt des Umweltzeichens Blauer Engel. Mittlerweile gibt es für mehr als 60 Produktkategorien entsprechende Vergabekriterien. Diese umfassen einige kleine Haushaltsgeräte (Staubsauger, Toaster, Wasserkocher, Dunstabzugshauben und Haartrockner), Unterhaltungselektronik sowie Informationstechnik bis hin zur unterbrechungsfreien Stromversorgung. Anders als beim EU-Energielabel erfolgt keine Unterteilung in Effizienzklassen, sondern das jeweilige Zeichen wird für alle Geräte vergeben, die einen festgelegten Mindeststandard erfüllen.

- n) Förderung von Contracting

Energiespar-Contracting ist eine innovative Energiedienstleistung, die mit umfassenden Lösungskonzepten die Energieeffizienz z. B. von Gebäuden steigert. Um das große Potential dieses Instruments besser auszuschöpfen, gilt es noch eine Reihe von Hemmnissen zu überwinden. Hierzu wurde insbesondere das Kompetenzzentrum Contracting bei der dena ins Leben gerufen, um den Dialog zum Contracting mit den Ländern zu stärken, Rahmenbedingungen zu verbessern und konkrete Vorbild-Projekte zu schaffen.

- o) Stärkung der Forschung für mehr Energieeffizienz

Die Ausgaben im Rahmen des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung für Forschung, Entwicklung und Demonstration im Bereich Energieeffizienz wurden in den letzten Jahren gesteigert. Eine Übersicht über die Maßnahmen zur Forschungsförderung im Bereich Energieeffizienz gibt der jährliche Bundesbericht Energieforschung.¹⁶

- p) Verbesserung der Rahmenbedingungen für Energieeffizienzdienstleistungen

Eine Vielzahl nicht-monetärer Hemmnisse verhindert die Realisierung rentabler Investitionen in Energieeffizienz und Einspartechnologien. Gemeinsam mit den betroffenen Akteuren soll hieran und an der Verbesserung der Rahmenbedingungen für solche Investitionen gearbeitet werden. Ziel ist die Überwindung bestehender nicht-monetärer Hemmnisse und die Förderung des Marktes für Energiedienstleistungen. Zu diesem Zweck stellt die Bundesstelle für Energieeffizienz unabhängige

¹⁵ Eine detailliertere Beschreibung dieser Maßnahmen und ihres aktuellen Umsetzungsstandes findet sich im jährlich von Öko-Institut und Fraunhofer ISI erstelltem Quantifizierungsbericht zur Umsetzung des Aktionsprogramms Klimaschutz 2020 (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2020).

¹⁶ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bundesbericht-energieforschung-2018.pdf>

Informationen zu Musterverträgen, Arbeitshilfen und Anbieterlisten zur Verfügung und führt jährlich eine Marktstudie zur Entwicklung der Energiedienstleistungsmärkte durch.

q) Neue Finanzierungsansätze

Auch eine Reihe monetärer Hemmnisse führen dazu, dass Investitionen in hochrentable Effizienzmaßnahmen unterbleiben. Dazu gehören unter anderem das Problem gebundener Liquidität sowie betriebliche Anforderungen hinsichtlich der Amortisationszeit. Zudem fallen die Transaktionskosten bei der Bewertung und Finanzierung von Energieeffizienzprojekten, bedingt durch die Kleinteiligkeit der Maßnahmen und der fehlenden Standardisierung bei der Projektbewertung oft prohibitiv hoch aus. Der Dialogprozess zu diesen Vorhaben wurde durch die Gründung einer Arbeitsgruppe „innovative Finanzierungsinstrumente“ im Rahmen der Plattform Energieeffizienz beim BMWi gestartet. Aus der Arbeitsgruppe heraus entstand das Projekt „Asset Class Energieeffizienz“, welches zu einer verbesserten Standardisierung von Projektbewertungsprozessen und einer vermehrten Bündelung von Energieeffizienzprojekten führen soll. Das Projekt wurde auch in der EffSTRA nochmals aufgegriffen.

r) Bündelung und Qualitätssicherung der Energieberatung

Eine hochqualifizierte Beratung ist wesentliche Voraussetzung für eine nachhaltige Erschließung von Effizienzpotenzialen und damit auch zur Minderung von Treibhausgasemissionen. Um dies sicherzustellen, werden existierende Beratungsangebote in Zusammenarbeit mit allen Stakeholdern auf ihre Verständlichkeit, Wirksamkeit sowie auf weitere Anforderungen überprüft und, soweit möglich, Beratungsangebote für die jeweiligen Handlungsfelder zusammengeführt. Darüber hinaus werden bestehende Qualitätssicherungsinstrumente der Energieberatung auf weitere Zielgruppen ausgeweitet und, so weit wie möglich, für die jeweiligen Handlungsfelder vereinheitlicht.

s) Entwicklung von Kennzahlen und Benchmarks

Um Energie effizienter nutzen zu können, müssen zunächst die bisherigen Energieverbräuche bekannt, die Baseline definiert und die künftigen Energieverbräuche messbar sein. Dazu können anerkannte Vergleichsgrundlagen, Methoden, Kennzahlen und Benchmarks und eine Komplettierung des Instrumentenmixes zur Erhebung und Nutzung dieser Daten dienen. Die Umsetzung der Maßnahme erfolgt durch die Förderung von FuE-Vorhaben zur Entwicklung und Kommunikation von Vergleichskennzahlen, Standards und Benchmarks in den Sektoren private Haushalte, GHD sowie Industrie.

t) Energie- und Ressourceneffizienz in der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)

Einerseits leistet der technologische Fortschritt in der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Energieeffizienz in vielen Anwendungsbereichen und die Digitalisierung tritt zunehmend in die Rolle des „Enablers“ für Ressourceneffizienz. Andererseits führt die weiterhin anhaltende Nutzungsintensivierung verbunden mit wachsenden Endgerätebeständen und IT-Infrastruktur zu einer Steigerung der Ressourcen- und Stromverbräuche und damit auch der Kühlbedarfe der IKT. Um diesem Trend durch geeignete Maßnahmen entgegenzuwirken und die Nutzung der IKT effizienter und damit klimaschonender zu gestalten, sollen auch bestehenden Effizienzpotenziale im Bereich IKT-Nutzung stärker adressiert und ausgeschöpft werden. Basierend auf einer umfassenden Bestandsaufnahme des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland bis 2025 (Fraunhofer IZM und Borderstep 2015) wurde zunächst ein Dialogprozess mit relevanten Akteuren angestoßen, um geeignete Maßnahmen und Instrumente zur Effizienzsteigerung im IKT-Bereich zu identifizieren. Die Rolle der Digitalisierung für die Energieeffizienz wurde auch in dem im Frühsommer 2020 im Rahmen der EffSTRA gestarteten Roadmap-Prozess wieder aufgegriffen.

4.4.2 Flankierende Instrumente aus dem Klimaschutzprogramm 2030

u) Finanzpolitik / Sustainable Finance

Eine nachhaltige Finanzwirtschaft ist ein wichtiger Begleiter in der Entwicklung einer nachhaltigen Realwirtschaft. Dieses Maßnahmenbündel aus dem Klimaschutzprogramm 2030 (Kap. 3.5.2) umfasst drei Einzelmaßnahmen, die als wichtige begleitende Maßnahmen zur Finanzierung der Systemtransformation zu sehen sind:

- ▶ Entwicklung und Umsetzung einer Sustainable Finance-Strategie
- ▶ Weiterentwicklung der KfW zur transformativen Förderbank zur Unterstützung der Transformation von Wirtschaftssektoren und Finanzmarkt für eine THG-neutrale Zukunft
- ▶ Einführung von Grünen Bundeswertpapieren und Aufbau einer Grünen Renditekurve des Bundes

v) Forschung und Innovation

Die übergreifenden Maßnahmen im Bereich Forschung und Innovation (Klimaschutzprogramm 2030, Kap. 3.5.3) beinhalten ein umfassendes Bündel von Einzelmaßnahmen, die unterschiedliche Sektoren adressieren:

- ▶ Forschungsinitiative Vermeidung von Prozessemissionen in der Industrie
- ▶ Forschungsförderung KMU-innovativ (Energieeffizienz und Klimaschutz)
- ▶ Stärkung der Energieforschung
- ▶ Forschungsinitiative Synthetische Energieträger (NAMOSYN)
- ▶ Forschung für die Energiewende in der anwendungsorientierten Grundlagenforschung
- ▶ Forschungs- und Innovationsagenda zur stofflichen Nutzung von CO₂
- ▶ Bessere Teilhabe von Start-ups an der Energieforschung
- ▶ Batterieforschung im Rahmen des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“
- ▶ BMBF-Beitrag zur nationalen Wasserstoffstrategie
- ▶ Beitrag der anwendungsnahen Energieforschung zur Wasserstoffstrategie
- ▶ Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr
- ▶ Schlüsselbereiche der Mobilität: A) Urbane Mobilität B) Systemische Innovationsbarrieren Klimaschutz Forschungsinitiative „Energiewende und Gesellschaft“
- ▶ Nationale Umsetzung UNESCO-Weltaktionsprogramm Bildung für eine nachhaltige Entwicklung (BNE) und des Nationalen Aktionsplans BNE (NAP) im frühkindlichen Bildungsbereich
- ▶ Berufsbildung für nachhaltige Entwicklung im Weltaktionsprogramm BNE

- ▶ Innovationsfonds „Klimaschutz als Jugendpolitik“ (Neu: Jugendklimafonds)
- ▶ Digital Innovation Hub for Climate
- ▶ Green ICT: F&E zur Verringerung des CO₂-Fußabdrucks digitaler Technologien
- ▶ Forschungsinitiative „Digitalisierung der Energiewende“
- ▶ Finanzwirtschaft und Klimaschutz
- ▶ Forschungsinitiative Klimaschutz in Land- und Forstwirtschaft
- ▶ Neue Bioökonomiestrategie
- ▶ Zukunft Bau Modellvorhaben für experimentelles Bauen
- ▶ Erforschung und Beobachtung von Aerosolen, Wolken und Spurengasen

Diese Maßnahmen sind grundsätzlich wichtig, insbesondere auch im Hinblick auf eine frühzeitige Einleitung von Maßnahmen zur Zielerreichung im Jahr 2050. Sie lassen sich jedoch nicht zuverlässig quantifizieren und werden daher als flankierend eingestuft.

w) Klimaschutz und Gesellschaft

Für den Bereich Klimaschutz und Gesellschaft (Klimaschutzprogramm 2030, Kap. 3.5.4) werden die folgenden vier Maßnahmen genannt, die ebenfalls als flankierend einzustufen sind:

- ▶ Programm zur Stärkung der Nachhaltigkeit in der Gemeinschaftsverpflegung
- ▶ Informationskampagne „Klimaschutz 2050“
- ▶ Strategische Früherkennung klimaschutzrelevanter Entwicklungen
- ▶ Vermeidung von Lebensmittelabfällen

4.4.3 Flankierende Instrumente aus der Effizienzstrategie 2050

Die EffSTRA enthält im Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) 2.0 ebenfalls eine Reihe flankierender Instrumente. Einige davon greifen bereits im ursprünglichen NAPE genannte Instrumente auf und entwickeln sie weiter, so die Modellprojekte zum Einsparcontracting im öffentlichen Sektor oder die Asset Class. Als weitere sektorübergreifende, als flankierend einzustufende Instrumente lassen sich nennen:

- ▶ Informationskampagne für das neue Energielabel (Skala A bis G) sowie
- ▶ Kampagne für nachhaltiges Verbraucherverhalten und nachhaltige Ressourcennutzung.

5 Energiewirtschaft

5.1 Stromerzeugung und gekoppelte Wärmeerzeugung

5.1.1 Methodik

Die Modellierung der projizierten Strom- und Wärmeerzeugung wird mit Hilfe des Strommarktmodells PowerFlex des Öko-Instituts vorgenommen. Ausgangsjahr der Modellierung ist 2018.

5.1.1.1 PowerFlex

Das am Öko-Institut entwickelte Strommarktmodell PowerFlex ist ein Fundamentalmodell, welches thermische Kraftwerke, die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerke und flexible Stromverbraucher kostenminimal einsetzt, um die Strom- und Fernwärmenachfrage zu decken.¹⁷

Der Fokus des Modells liegt auf Deutschland, wofür die Modellierung in großer Detailtiefe vorgenommen wird. PowerFlex berücksichtigt zudem 25 weitere im ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) organisierte Länder, darunter alle Nachbarn Deutschlands. Hier findet die Modellierung auf aggregierter Ebene statt. Dies sind Belgien, Bulgarien, Dänemark, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Italien, Irland, Lettland, Litauen, Luxemburg, die Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, die Schweiz, die Slowakei, Spanien, Tschechien, Ungarn und das Vereinigte Königreich.

Zentrale Eingangsdaten des Modells sind Zeitreihen der Strom- und Fernwärmenachfrage und des Angebots erneuerbarer Energien sowie techno-ökonomische Parameter von Strom- und Wärmeerzeugungstechnologien und Speichern.

Für Deutschland werden thermische Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung größer 100 MW blockscharf und mit individuellem Wirkungsgrad erfasst. Kleinere thermische Stromerzeugungsanlagen sind in technologie- und baujahrspezifischen Gruppen zusammengefasst und durch typspezifische Parameter charakterisiert. Biomassekraftwerke, welche Biogas, Pflanzenöl oder feste Biomasse als Brennstoff verwenden, werden über Technologie-Aggregate als Teil des thermischen Kraftwerksparks im Modell abgebildet. In den übrigen europäischen Ländern sind alle Erzeugungs- und Speichertechnologien als technologie- und kohortenspezifische Aggregate abgebildet. Die variablen Kosten der Stromerzeugung werden aus den Kosten für Brennstoffe, Emissionszertifikate sowie dem Wirkungsgrad berechnet.

Das Stromdargebot aus den fluktuierenden erneuerbaren Erzeugern Laufwasser, Wind und Photovoltaik sowie der natürliche Zufluss in Speicherwasserkraftwerke wird als Zeitreihe in stündlicher Auflösung vorgegeben. Das Erzeugungsprofil für Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung setzt sich aus einem typischen Profil der Fernwärmenachfrage und einer angenommenen Gleichverteilung für industrielle KWK-Anlagen zusammen.¹⁸

Die jährliche Stromnachfrage wird exogen vorgegeben und ergibt sich aus den Stromnachfragen der anderen Sektoren (Abschnitt 5.1.4.1). Im Modell unterteilt sich die Stromnachfrage in einen größeren, zeitlich unflexiblen Anteil mit vorgegebenem stündlichen Lastprofil sowie einen zeitlich flexiblen Anteil. Dieser resultiert aus der Stromnachfrage von Pumpspeicherkraftwerken, Batteriespeichern und flexiblen Verbrauchern wie batterie-elektrischen Fahrzeugen.

¹⁷ Für eine detaillierte Modellbeschreibung, siehe z. B. UBA (2017).

¹⁸ Zur modelltechnischen Implementierung der gekoppelten und ungekoppelten Fernwärme siehe auch Abschnitt 5.2.1.

Bezüglich des internationalen Stromaustauschs stellt jedes Land einen Knoten dar und ist über Kuppleitungen mit anderen Ländern verbunden, zu denen entsprechende Austauschkapazitäten existieren. Innerhalb eines Knotens wird ein einheitliches Marktgebiet ohne Netzengpässe unterstellt. Die Austauschkapazitäten zwischen den Ländern (*Net Transfer Capacities, NTC*) in beide Richtungen sind als Obergrenze für die stündlichen Importe und Exporte vorgegeben.

Aus Basis dieser exogenen Inputdaten minimiert PowerFlex die Kosten der Deckung der Strom- und Fernwärmenachfrage unter Berücksichtigung technischer und energiewirtschaftlicher Nebenbedingungen. Die endogenen Entscheidungsvariablen des Modells umfassen den stündlichen Einsatz aller Erzeugungs- und Speichertechnologien, die Zeitpunkte der flexiblen Nachfrage sowie die stündlichen Importe und Exporte. Hierbei kann das zur Verfügung stehende fluktuierende Stromangebot auch modellendogen als Überschuss identifiziert und abgeregelt werden. Für die flexible Stromnachfrage stellen zusätzliche Nebenbedingungen sicher, dass die Anforderungen aus den Fahrprofilen oder die Kapazität der Speicher beachtet werden. Insbesondere ist die Ladung von Batteriespeichern an das Dargebot an PV-Strom geknüpft.

PowerFlex modelliert jeweils ein Jahr in stündlicher Auflösung mit perfekter Voraussicht. Alle Technologien werden zu ihren Grenzkosten eingesetzt. Dies spiegelt das Ergebnis auf einem friktionsfreien Markt mit perfektem Wettbewerb und vollständiger Information wider. Mathematisch ist das Modell ein lineares Programm. Es ist im General Algebraic Modeling System (GAMS) implementiert und wird mittels des Solvers CPLEX bis zur globalen Optimalität gelöst.

Der Modelloutput umfasst die optimalen Werte aller Entscheidungsvariablen sowie zahlreiche daraus abgeleitete Indikatoren wie etwa Emissionen und die Anteile der verschiedenen Technologien an der Lastdeckung.

5.1.1.2 Industriekraftwerke, KWK und Fernwärme

Strom und Fernwärme werden sowohl von öffentlichen Kraftwerken erzeugt als auch von Kraftwerken des Industriesektors erzeugt. Diese Anlagen können sich bei der Strom- und Wärmeerzeugung zumindest teilweise substituieren.

Abbildung 9 zeigt für die Wärmeerzeugung die Überschneidungen dieser Bereiche. Da es für die Modellierung nicht sinnvoll ist, diese voneinander zu trennen, wird der gesamte Bereich der Kraftwerke gemeinsam modelliert. Die Treibhausgasemissionen und sonstigen Indikatoren werden in einem nachgelagerten Schritt auf die einzelnen Inventarquellgruppen¹⁹ aufgeteilt (siehe hierzu Abschnitt 6.2.1).

¹⁹ Kraftwerke der öffentlichen Versorgung, Industriekraftwerke, Raffineriekraftwerke und Kraftwerke des übrigen Umwandlungsbereichs.

Abbildung 9: Begriffserklärung KWK-Wärme und Fernwärme



Quelle: Darstellung Öko-Institut

5.1.2 Maßnahmen

5.1.2.1 Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung

a) EU-Emissionshandelssystem*

Der CO₂-Preis (Preis für ein Emissionszertifikat) wird in einem separaten Dokument zur Abstimmung der Rahmendaten aufgeführt. Der CO₂-Preis wirkt auf die Stromerzeugung in Kraftwerken. Siehe auch Kapitel 4.1 zu übergreifenden Instrumenten.

b) Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Für das Jahr 2021 wird, basierend auf den historischen Zubauzahlen und den noch ausstehenden Ausschreibungen, die absehbare installierte Leistung ermittelt. Ziel des EEG ist es, den Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms am Bruttostromverbrauch auf 65 % im Jahr 2030 zu steigern. Ungeachtet dessen besteht die Notwendigkeit, den nationalen Rechtsrahmen im Lichte der Beschlüsse auf europäischer Ebene noch anzupassen. Mit der Novelle des EEG, die zum 1. Januar 2021 in Kraft getreten ist („EEG 2021“), wurde darüber hinaus das Ziel verankert, dass der gesamte Strom in Deutschland vor dem Jahr 2050 treibhausgasneutral ist. Dies gilt sowohl für den hier erzeugten Strom als auch für den hier verbrauchten Strom. Dabei soll der für die Erreichung der Ziele erforderliche Ausbau der erneuerbaren Energien stetig, kosteneffizient und netzverträglich erfolgen. Zur Erreichung des 65-Prozent-Ziels im Jahr 2030 werden Ausbaupfade für installierte Leistungen für die Technologien Windenergieanlagen an Land und Solaranlagen in Zweijahresschritten geregelt. Für Biomasseanlagen²⁰ und Windenergie auf See liegen Zielleistungen für 2030 bzw. 2030 und 2040 vor; siehe Tabelle 12. Der Weg dorthin soll durch einen in Einjahresschritten verankerten Strommengenpfad für die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien und einen hierauf fußenden Monitoring- und Nachsteuerungsmechanismus abgesichert werden. Dieser eröffnet auch die Möglichkeit, im

²⁰ Gemäß Klimaschutzprogramm 2030 beträgt die für Bioenergie maximal verfügbare Biomasse in Deutschland gegenwärtig rund 1.000 bis 1.200 PJ/a (Inlandspotenzial). Dabei ist eine Ausweitung der Anbauflächen für Bioenergie nicht zu erwarten und kommt aufgrund von Flächenrestriktionen nicht in Betracht.

Falle eines prognostizierten Anstiegs des Bruttostromverbrauchs, die technologiespezifischen Ausbaupfade anzupassen. Tabelle 12 fasst die technologiespezifischen Ausbaupfade zusammen.

Tabelle 12: Ausbauziele für erneuerbare Energien nach § 4 EEG 2021 und nach dem Windenergie-auf-See-Gesetz (in Gigawatt, GW)²¹

[GW]	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2040
Windenergieanlagen an Land		57		62		65		68		71	
Solaranlagen		63		73		83		95		100	
Biomasseanlagen ²⁰										8,4	
Windenergie auf See										20	40

Quelle: Bundesregierung, Bundesregierung.

c) Förderung von KWK-Anlagen

Als Teil des Artikelgesetzes zum Kohleausstieg (Kohleausstiegsgesetz, KASTG) wurde das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) umfangreich novelliert. Hierbei sind insbesondere die

- ▶ Verlängerung der Förderung von KWK-Strom bis 31.12.2029²²,
- ▶ Einführung eines auf die installierte elektrische Leistung einer KWK-Anlage bezogenen Südbonus für neuerrichtete, modernisierte oder nachgerüstete Anlagen in der Südregion (Definition Anlage zu den §§ 7b und 7d KWKG)²³,
- ▶ Umstellung des bereits zuvor existierenden Kohleersatzbonus von einer erzeugungsbasierten Zahlung auf eine mit Alter und Abschaltzeitpunkt der alten Kohleanlage abnehmenden, auf die installierte elektrische Leistung einer KWK-Anlage bezogenen Zahlung,
- ▶ Einführung eines Bonus für elektrische Wärmeerzeuger²⁴,

²¹ Nicht berücksichtigt sind die mit dem Beschluss der Bundesregierung vom 27. April 2021 beschlossenen Sonderausschreibungen für Windenergie-an-Land und Photovoltaik im Jahr 2022 im Umfang von 1,1 bzw. 4,1 Gigawatt zu installierender Leistung.

²² Es besteht der Vorbehalt der Beendigung der Förderung für Anlagen < 50 MW ab 2026, falls die entsprechende Evaluierung im Jahr 2022 keinen die Förderung rechtfertigenden Nutzen für die Erreichung KWK-Ausbauziele ausweist.

²³ Der Bonus von 60 € pro kW Bonus nach Satz 1 sollte einmalig 60 € je kW elektrischer KWK-Leistung des KWK-Leistungsanteils betragen und für Anlagen mit Baubeginn vor 31.12.2026 und nach 31.12.2019 gewährt werden. Die Gewährung des Bonus sollte voraussetzen, dass erzeugter Strom in das Netz der allgemeinen Versorgung eingespeist wird und dass die elektrische Leistung voll von einer Wärmesenke entkoppelt werden kann. Sollte der Bonus in Anspruch genommen werden, so sollte der reguläre KWK-Zuschlag für höchstens 2.500 Vollbenutzungsstunden vergütet werden. Der Südbonus wurde Ende 2020 von der Bundesregierung gestrichen. Hintergrund waren beihilferrechtliche Bedenken. In diesem Bericht liegt er der Umsetzung der Maßnahme aber noch zugrunde, da die Streichung erst nach Festlegung der in diesem Bericht betrachteten Maßnahmen erfolgte.

²⁴ Der Bonus wird für KWK-Anlagen > 1 MW gewährt. Um den Bonus von 70 € je kW thermischer Leistung des Wärmeerzeugers erhalten zu können, muss es sich um eine fabrikkneue Anlage handeln, die nicht im Rahmen der innovativen KWK oder im Rahmen des Bonus für innovative Wärme gefördert wird. Der elektrische Wärmeerzeuger sollte mindestens 80 % der KWK-Wärmeleistung der unmittelbar oder mittelbar verbundenen KWK-Anlagen ersetzen können müssen und sollte nicht in der Südregion stehen. Ende des Jahres 2020 wurde der Bonus von der Bundesregierung dahingehend angepasst, dass der elektrische Wärmeerzeuger nur noch 30 % der entsprechenden KWK-Leistung ersetzen können muss. Zudem wurde die Beschränkung auf Standorte außerhalb der Südregion aufgehoben und die Maßnahme erst zum Jahr 2025 in Kraft gesetzt. Diesem Bericht liegt die ungeänderte Version des Bonus zugrunde, da die Änderung erst nach Festlegung der in diesem Bericht betrachteten Maßnahmen erfolgte.

- ▶ Einführung eines Bonus für die Steigerung des Anteils an erneuerbarer Wärme, die in ein Fernwärmenetz eingespeist wird,²⁵ sowie
- ▶ Flexibilität anreizende Begrenzung der förderfähigen Vollbenutzungsstunden auf 3.500 pro Jahr²⁶

zu nennen. Das KWK-Ausbauziel einer Mindesterzeugung von 110 TWh der jährlichen Nettostromerzeugung bis 2020 und 120 TWh bis 2025 bleibt erhalten.

Für die Implementierung der Maßnahmen unter dem ersten und zweiten Spiegelstrich für das MMS des Projektionsberichts 2021 ist die Zubauliste der KWK-Anlagen überprüft und um neue Projekte aktualisiert worden. Des Weiteren wird für die Implementierung der Maßnahme unter dem dritten Spiegelstrich der obigen Liste von einem teilweisen Ersatz der bestehenden kohlebefeuerter KWK-Anlagen durch erdgasbefeuerte KWK-Anlagen ausgegangen, der vor 2030 vollständig abgeschlossen ist. Grundlage ist die Wärmebereitstellung, die durch die Abschaltung der Braunkohle- und Steinkohle-Anlagen wegfällt. Diese wird zum Teil durch große Erdgas-KWK-Anlagen und -BHKWs und zum Teil durch erneuerbare Wärme bereitgestellt. Die Aufteilung zwischen GuD-Anlagen und BHKW erfolgt auf Grundlage der heute bekannten geplanten Projekte.²⁷ Der Anteil an EE-Wärmeeratz steigt über die Zeit an. Für die Implementierung der Maßnahme unter dem vierten Spiegelstrich wird ein moderater Zubau elektrischer Wärmeerzeuger und für die Maßnahme unter dem fünften Spiegelstrich der Zubau von Großwärmepumpen angenommen.

d) Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVBG)

Das KVBG definiert für den 31.12.2022, den 1.4.2030 und spätestens den 31.12.2038 konkrete Zielniveaus für die installierte Leistung von Kohlekraftwerken, nach Steinkohle und Braunkohle differenziert. In den Jahren ohne ausgewiesenes Zielniveau soll die Reduktion der am Markt verbleibenden Stein- und Braunkohlekapazitäten insgesamt in gleichgroßen Schritten verlaufen. Die spätesten Abschaltzeitpunkte der installierten Leistung der Braunkohleanlagen > 150 MW sind im Rahmen des Gesetzes festgeschrieben. Die jährlichen Zielniveaus für Braunkohleanlagen < 150 MW und Steinkohleanlagen ab 10 MW ergeben sich als Differenz eines linear-degressiven Zielpfades unter Berücksichtigung der Zielniveaus der Zieldaten 2022, 2030 und 2038 und der Stilllegungsliste nach Kohleverstromungsbeendigungsgesetz für Braunkohleanlagen. Um diese Zielniveaus zu erreichen, werden Braunkohleanlagen entsprechend einer gesetzlich fixierten Stilllegungsliste stillgelegt, wobei die Anlagenbetreiber für die frühzeitige Stilllegung der von ihnen betriebenen Anlagen Entschädigungen erhalten. Für die Stilllegung von Steinkohlekraftwerken und kleinen Braunkohleanlagen wird die Höhe der Entschädigung in einem Ausschreibungsverfahren ermittelt, im Rahmen dessen die Kraftwerksbetreiber die Stilllegung der Anlagen gegen eine Zahlung (Gebot) anbieten.

Für die Umsetzung der Maßnahme im MMS des Projektionsberichts 2021 wird, basierend auf den Rahmenbedingungen der ordnungsrechtlichen Stilllegung, unter Einbeziehung der sonstigen Stilllegungsmöglichkeiten (insbesondere der Stilllegung im Rahmen des Kohleersatzes im KWKG und der Steinkohleauktionen), eine Abschätzung der für jedes Jahr zwischen 2021 und 2040 jeweiligen installierten Kapazität an Braunkohle- und Steinkohlekraftwerken auf Anlagenbasis getroffen. Für Steinkohleanlagen gilt: Werden ab dem Jahr 2024 die durch die Steinkohleausschreibungen angestrebten Zielniveaus nicht erreicht, kommt es zur Anordnung der Stilllegung von Kraftwerken. Die

²⁵ Der Zuschlag erhöht sich mit einer Erhöhung des Anteils der eingespeisten erneuerbaren Wärme.

²⁶ Nach einer Übergangsfrist kommt die Begrenzung ab dem Kalenderjahr 2025 voll zum Tragen.

²⁷ Für die Bewertung der Einzelmaßnahmen wird der Kohleersatz der Maßnahme Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVBG) zugeordnet. Würde dies in der kontrafaktischen Rechnung für das KVBG nicht geschehen, so könnte die Fernwärmenachfrage nicht gedeckt werden. Für die konkrete Umsetzung siehe Kapitel 5.1.4.4.

Stilllegung erfolgt dann nach Altersreihung, wobei kürzliche Modernisierungen bei der Reihung berücksichtigt werden. Kleinanlagen unter 150 MW werden frühestens 2030 ordnungsrechtlich stillgelegt.

e) Modellvorhaben Wärmenetze 4.0

Im Rahmen des Förderprogramms „Wärmenetzsysteme 4.0“ fördert die Bundesregierung seit dem 1. Juli 2017 den Bau hochinnovativer Wärmenetzsysteme (Wärmenetze der 4. Generation) zur nachhaltigen Versorgung von Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie gewerblichen Prozessen mit Niedertemperaturwärme. Die Förderung wurde Anfang 2020 novelliert, wobei einige Anforderungen an die Wärmesysteme reduziert wurden, sodass von einer erhöhten Anzahl an realisierten Wärmenetzsystemen auszugehen ist. Das Förderprogramm soll im Jahr 2021 in die Bundesförderung effiziente Wärmenetze überführt werden.

Für die Implementierung des MMS für den Projektionsbericht 2021 wird davon ausgegangen, dass vor allem Projekte im Bereich von Solarthermie, Wärmepumpen, und Abwärmenetzen angeschoben werden und außerdem auch Wärmeverluste im Bestandsnetz verringert werden.

5.1.2.2 Ordnungsrecht

Das KVBG enthält neben ökonomischen Anreizen auch ordnungsrechtliche Elemente (vgl. Beschreibung der Maßnahme oben).

5.1.2.3 Flankierende Instrumente

Flankierende Maßnahmen wie Mieterstromregelungen werden zwar bei der Gesamtbewertung berücksichtigt, eine Bewertung der Einzelmaßnahmen findet jedoch nicht statt.

5.1.3 Annahmen und Parameter

Im Folgenden werden die grundlegenden techno-ökonomischen Annahmen und Parameter für die Strom- und Fernwärmeerzeugung dargelegt.

5.1.3.1 Bestandskraftwerke und grundlegende technische Parameter

Ausgangspunkt für die Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks ist das Basisjahr 2018. Als Datengrundlage dienen hauptsächlich die Kraftwerklisten der Bundesnetzagentur (2021).²⁸ Vorliegende Stilllegungsanzeigen wurden hierbei berücksichtigt (Bundesnetzagentur 2020b).

Für die Ermittlung der Wirkungsgrade wurde auf anlagenscharfe Bewegungsdaten (Emissionsdaten aus dem European Union Transaction Log (EUTL) und Erzeugungsdaten aus ENTSO-E) zurückgegriffen und damit eine Kalibrierung vorgenommen. Die Wirkungsgrade der deutschen Bestandskraftwerke steigen mit dem Inbetriebnahmejahr an. Dabei bilden die verwendeten Wirkungsgrade einen durchschnittlichen Anlagenbetrieb über ein Jahr ab und berücksichtigen zusätzlichen Brennstoffverbrauch im Teillastbetrieb und für An- und Abfahrvorgänge. In der Literatur wird oft ein Wirkungsgrad unter optimalen Bedingungen angegeben, etwa der Abnahmewirkungsgrad. In der Jahresperspektive entspricht der hier angesetzte Wirkungsgrad dem Nutzungsgrad. Für Pumpspeicher wird von einem Wirkungsgrad (*roundtrip efficiency*) von 85 % ausgegangen; für Batteriespeicher von 92 %.

Im europäischen Ausland basiert der bestehende Kraftwerkspark auf der Datenbank des Anbieters Platts (2018). Die einzelnen Erzeugungstechnologien werden nach Brennstoff- und Alterskohorten

²⁸ Die Daten wurden im Einzelfall durch eigene Recherchen ergänzt. Angaben zu techno-ökonomischen Parametern der Kraftwerke stammen aus DIW 2014. Für kleinere KWK-Anlagen wurden die installierten Leistungen durch eigene Auswertungen auf Basis der BHKW-Datenbank des Öko-Instituts vorgenommen.

zu Aggregaten zusammengefasst. Die unterschiedliche Altersstruktur der Bestandskraftwerke in den einzelnen Ländern ist im Wirkungsgrad der Aggregate berücksichtigt.

KWK-Anlagen werden mit dem KWK-Modul in PowerFlex abgebildet. Ein 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. Da bei Entnahme-Kondensations-Kraftwerken unterschiedliche Betriebszustände mit unterschiedlicher Wärmeauskopplung möglich sind, variiert zudem der zum jeweiligen Zeitpunkt im Modell relevante elektrische Wirkungsgrad der Gesamtanlage (Kondensations- und KWK-Scheibe).²⁹ Für die Bestandsanlagen werden die elektrischen Wirkungsgrade der KWK-Scheiben aus der im Rahmen des KWK-Evaluierungsberichts 2019 ermittelten Statistik für das Basisjahr 2018 abgeleitet.

5.1.3.2 Entwicklung der Erzeugungskapazitäten und Beschreibung Maßnahmenumsetzung

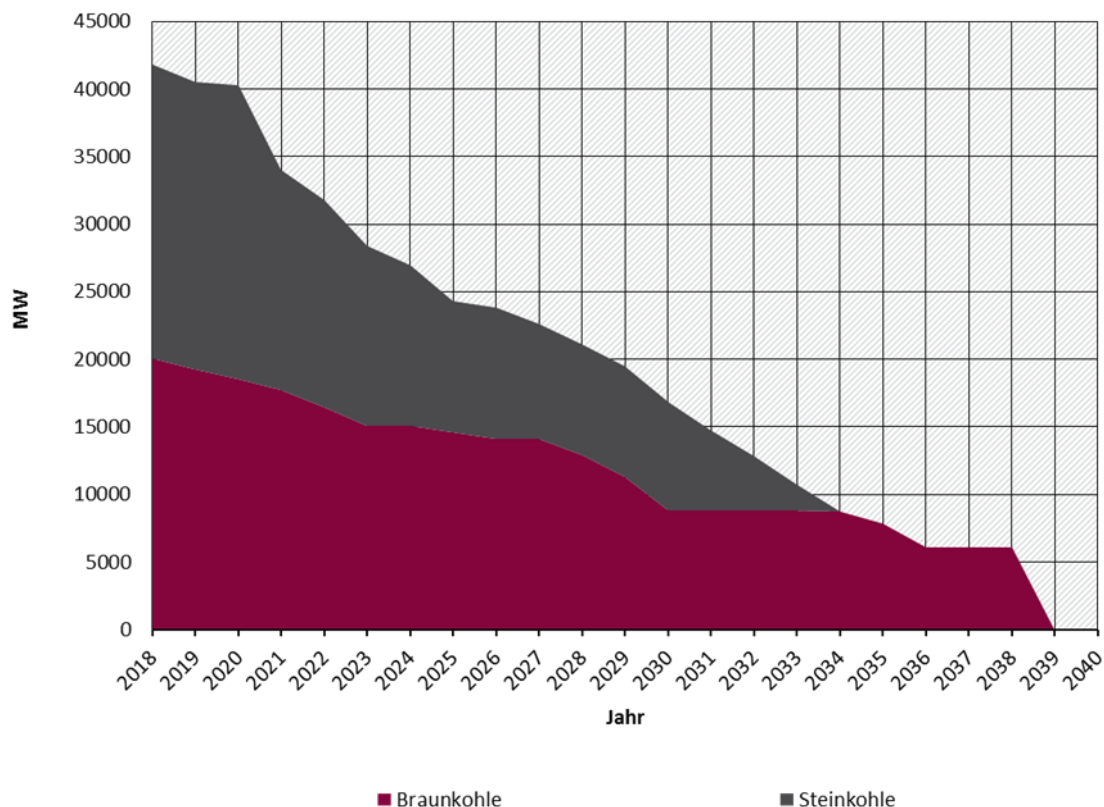
Als Maßnahme zur beschleunigten Reduktion der Kohlenutzung wird im MMS das **Kohleverstromungsbeendigungsgesetz** (KVBG) umgesetzt. Hierbei sind die Erzeugungskapazitäten von **Braun- und Steinkohlekraftwerken** für drei Zeitpunkte in der Zukunft festgesetzt (31.12.2022, 1.4.2030, 31.12.2038). Der Zielpfad für die Gesamtkapazität an Kohlekraftwerken wird für die Zwischenjahre linear interpoliert.

Für große Braunkohleblöcke (>150 MW) werden die Abschaltzeitpunkte aus dem Anhang des KVBG verwendet. Für die übrigen Kohlekraftwerke werden die Abschaltungen so vorgenommen, dass der Zielpfad erreicht wird. Hierbei wird für kleinere Braunkohleanlagen unterstellt, dass diese sukzessive bis 2030 abgeschaltet werden, außer in Fällen, in denen der Betrieb direkt an den Tagebaubetrieb gekoppelt ist. In diesem Fall wird von einer Schließung mit der angenommenen Schließung des Tagebaus ausgegangen. Für Steinkohlekraftwerke werden alle bis August 2020 bekannten geplanten Abschaltungen implementiert. Bei den Annahmen für den weiteren Stilllegungspfad wurde die Rentabilität der verschiedenen Anlagen sowie ihre geographische Lage berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass KWK-Anlagen auf Grund des zusätzlichen Einkommensstroms aus der Wärmeerzeugung eine höhere Rentabilität aufweisen als reine Kondensationsanlagen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass Anlagen in der Südregion auf Grund des in der Steinkohleausschreibung angelegten Netzfaktors eher nachrangig zum Zug kommen, und hier zunächst vor allem Anlagen mit überwiegendem Kondensationsbetrieb außerhalb der Südregion zum Zuge kommen.

Abbildung 10 zeigt die resultierende Entwicklung der Kohlekapazitäten. Im Jahr 2020 geht Datteln IV als letztes neues Steinkohlekraftwerk ans Netz. Spätestens im Jahr 2033 geht das letzte Steinkohlekraftwerk vom Netz; spätestens im Jahr 2038 das letzte Braunkohlekraftwerk.

²⁹ Eine eingehende Diskussion findet sich im Projektionsbericht 2019 (Bundesregierung 2019b).

Abbildung 10: Kapazitäten der deutschen Kohlekraftwerke im MMS



Quellen: Berechnungen Öko-Institut auf Basis von Bundesnetzagentur (2021), Bundestag (2020) und eigenen Annahmen

Der Neubau von **Erdgas-Kraftwerken** ist im MMS exogen vorgegeben. Zum einen sind dies Kraftwerke, die bereits heute fertiggestellt sind, sich im Bau oder in einem fortgeschrittenen Planungsstadium befinden. Insbesondere sind dies Projekte, die als Kohleersatz beim BAFA vorangemeldet oder konkret von Betreibern geplant sind. Diese konkreten Einzelprojekte werden anlagenscharf umgesetzt. Gegenüber dem Basisjahr 2018 gehen 3.901 MW bis 2025 in Betrieb.³⁰

Zum anderen werden Erdgas-KWK-Kraftwerke zugebaut, bei denen davon ausgegangen wird, dass sie aufgrund von Politikmaßnahmen im Projektionshorizont errichtet werden. Dieser Zubau erfolgt sowohl im Rahmen des Kohleersatzes im Zuge der Maßnahme KVBG als auch im Rahmen der Maßnahme der Förderung von KWK-Anlagen.

Für den **Kohleersatz** im Zuge der Maßnahme KVBG wird die in den 2020er-Jahren jährlich wegfallende Fernwärmeerzeugung aus Kohle ermittelt und zunächst das Potenzial abgeschätzt, welcher Anteil aus erneuerbaren Wärmequellen und Nachfragereduktion ersetzt werden kann. Für den übrigen Anteil werden neue Erdgas-KWK-Anlagen errichtet. Dieser Zubau unterteilt sich wiederum in Ersatzprojekte an bestehenden Standorten größerer Kohle-KWK-Anlagen und einen generischen Zubau (Tabelle 13). Nach 2029 findet grundsätzlich kein Kohleersatz mehr statt.

³⁰ Dies sind Kraftwerke in Mainz, Berlin-Marzahn, Cottbus, Köln-Godorf, München-Freimann, Erlangen und Höchst, die seit 2018 in Betrieb gegangen sind, sowie geplante KWK-Anlagen in Chemnitz, Wolfsburg, Herne, Scholven, Marl, Frankfurt (Oder), Leipzig, Höchst, Braunschweig, Pforzheim, Saarbrücken, Dresden, Ulm, Jena, Flensburg, Wiesbaden, Kaiserslautern, Bremen, Berlin-Neukölln und Duisburg Mitte.

- ▶ Für die Bestimmung der Ersatzprojekte an bestehenden Standorten wird eine neue Erdgas-KWK-Anlage so parametrisiert, dass sie im folgenden Jahr einen Teil der Wärme aus der weggefallenen Kohlenutzung ersetzt. Hierbei wird nach Kraftwerken der öffentlichen Versorgung und Industriekraftwerken differenziert.
- ▶ Für die Bestimmung des generischen Zubaus, der die übrige wegfallende Wärmemenge aus Kohle-KWK-Anlagen ersetzt, wird zwischen drei Größenklassen (unter 10 MW, 10-50 MW, über 50 MW elektrische Netto-Nennleistung) sowie Kraftwerken der öffentlichen Versorgung und Industriekraftwerken unterschieden. Anlagen unter 10 MW werden grundsätzlich durch BHKW ersetzt. In der öffentlichen Versorgung gilt dies auch für größere Anlagen. Im Industriebereich werden Anlagen über 10 MW durch GuD-Kraftwerke ersetzt. Für die verschiedenen Größenklassen und Versorgungsbereiche wird zudem eine unterschiedliche Ersatzquote angenommen. Dies trägt einer durch Effizienz über die Zeit sinkenden Wärmenachfrage sowie steigender Fernwärmeerzeugung aus anderen Quellen Rechnung. So werden etwa in der öffentlichen Versorgung im Jahr 2025 nur 78 % der wegfallenden Wärmemenge aus kleinen Kraftwerken unter 10 MW durch Erdgas-KWK ersetzt. Tabelle 13 listet den resultierenden Pfad des Kohleersatzes auf.
- ▶ Für die **Förderung von KWK-Anlagen** über den Kohleersatz hinaus wird bis 2029 die Wirkung der Fortsetzung des KWKG abgeschätzt. Basierend auf historischen Zubauzahlen wird für BHKW unter 0,5 MW elektrischer Nettonennleistung von einem jährlichen Zubau von rund 150 MW ausgegangen. Für größere Anlagen zwischen 0,5 und 50 MW folgt der Zubaupfad von jährlich insgesamt 200 MW bis 2025 den entsprechen Auktionsvolumina des KWKG, mit einem maximal dreijährigen Nachlauf für die Realisierung. Der sich ergebende Pfad der elektrischen Leistung ist ebenfalls in Tabelle 13 dargestellt. Über den maßnahmengetriebenen Zubau hinaus wird sowohl für kleine BHKW als auch für größere Anlagen ein Zubau von jeweils 50 MW bis Mitte der 2020er-Jahre sowie danach von 100 MW bis zum Ende des Projektionszeitraums angenommen.

Tabelle 13: Neubau von Erdgas-KWK-Kraftwerken im MMS (in MW elektrisch)

Zubau	Größenklasse	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Kohleersatz im Rahmen der Maßnahme KVBG											
anlagen-scharf	Unter 10 MW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-50 MW	30	11	78	0	5	0	0	0	0	0
	Über 50 MW	312	1.832	681	52	0	0	0	0	0	0
generisch	Unter 10 MW	0	0	0	41	17	11	12	16	0	4
	10-50 MW	0	151	0	76	268	45	183	64	45	96
	Über 50 MW	0	0	0	349	286	0	948	473	548	0
Maßnahme Fortsetzung der Förderung von KWK-Anlagen											
gene-risch	Unter 0,5 MW	100	250	150	150	250	150	150	150	150	0
	0,5-50 MW	200	200	200	200	200	200	200	100	0	0
Summe über beide Maßnahmen											
	Gesamt	642	2.543	1.109	868	1.331	405	1.493	803	743	100

Quellen: Berechnungen und Annahmen Öko-Institut, Bundesnetzagentur (2021), Bundestag (2020), BAFA (2020)³¹

Zudem wird für das MMS im Rahmen der Maßnahme Förderung von KWK-Anlagen angenommen, dass sich die Kapazität von Elektrodenkesseln und das Dargebot von Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen erhöhen (siehe Abschnitt 5.2.2).

Die Kapazitäten von **Ölkraftwerken** werden für den Brennstoff leichtes Heizöl über den Projektionshorizont als konstant angenommen. Für schweres Heizöl folgen sie dem sinkenden Pfad der Aktivität von Raffinerien, entsprechend der über die Zeit abnehmenden Nachfrage nach Mineralölprodukten. Die installierte Leistung der **Kraftwerke auf Basis von Sonderbrennstoffen** (Gichtgas, Kokereigas, Raffineriegas, sonstige Gase) wird über den Projektionszeitraum als konstant angenommen.³² Entsprechend der Novelle des Atomgesetzes (AtG) von 2011 geht das letzte deutsche **Kernkraftwerk** im Jahr 2022 vom Netz.

Die Entwicklung der **Leistung erneuerbarer Energien** wird im MMS auf Basis der Vorgaben des EEG 2021 und weiterer Abschätzungen abgeleitet. Für die Jahre 2018 und 2019 werden historische Daten verwendet. Tabelle 14 und Abbildung 11 zeigen die installierten Leistungen, die den Modellrechnungen zugrunde liegen. Hierbei werden die Leistungen zur Jahresmitte verwendet. Unter Annahme unterjährig gleichmäßigen Zubaus entsprechen diese der installierten Leistung im Jahresdurchschnitt. Basierend auf der Ausführung in der allgemeinen Begründung zum EEG 2021 (Begründung A II 2.) wird für das Jahr 2030 das Erreichen der Zielleistungen bereits zum Jahresanfang unterstellt. Für die weiteren Jahre werden die zugrunde liegenden Leistungsziele des EEG (vgl. Tabelle 12) zum jeweiligen Jahresende erreicht.

- ▶ Für **Windenergie an Land** wird der jährliche Brutto-Zubau so gewählt, dass die installierte Netto-Leistung den in § 4 Absatz 1 des EEG 2021 (Bundesregierung) bis 2030 avisierten Zielpfad erreicht. Hierfür wird davon ausgegangen, dass die Betriebsdauer mit 25 Jahren die Förderdauer von 20 Jahren übersteigt und die Anlagen danach abgeschaltet werden. Im Jahr 2022 sind im Mittel 56 GW installiert, im Jahr 2024 61 GW, im Jahr 2026 64 GW, im Jahr 2028 67 GW und Anfang des Jahres 2030 sind 71 GW installiert (Abbildung 11). Nach 2030 wird ein jährlicher Bruttozubau in Höhe von 5.800 MW jährlich angenommen. Dies entspricht der vorgesehenen Ausschreibungsmenge des Jahres 2028 (Bundesregierung 2020a).
- ▶ Für **Photovoltaik** wird der jährliche Bruttozubau analog zum Zubaupfad der Windenergie an Land bestimmt. Auch hier werden die Zahlen so gewählt, dass der im EEG 2021 avisierte Zielpfad erreicht wird, wobei ebenso davon ausgegangen wird, dass die Betriebsdauer die Förderdauer von 20 Jahren um fünf Jahre übersteigt. Im Mittel sind im Jahr 2022 60 GW installiert, im Jahr 2024 71 GW, im Jahr 2026 81 GW, im Jahr 2028 92 GW und Anfang des Jahres 2030 ist eine Leistung von 100 GW installiert (Abbildung 11). Nach 2030 wird der Bruttozubau des Jahres 2030 in Höhe von 5.700 MW jährlich fortgeschrieben.
- ▶ **Windenergie auf See** wird bis zum Jahr 2025 entsprechend bereits erteilter Zuschläge für Förderung nach dem EEG auf insgesamt über 10 GW ausgebaut. Der weitere Ausbau bis 2030 erfolgt entsprechend der im Flächenentwicklungsplan 2019 (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie 2019) ausgewiesenen Leistungen und des vorgesehenen Leistungsziels des Windenergie-

³¹ Für den anlagenscharfen KWK-Kohleersatz durch erdgasgefeuerte KWK-Anlagen wurden unter anderem die Anlagen berücksichtigt, die bereits einen Vorbescheid für den Kohleersatzbonus bei BAFA beantragt haben. Diese Daten lagen zur Parametrisierung vor, sind jedoch nicht öffentlich verfügbar.

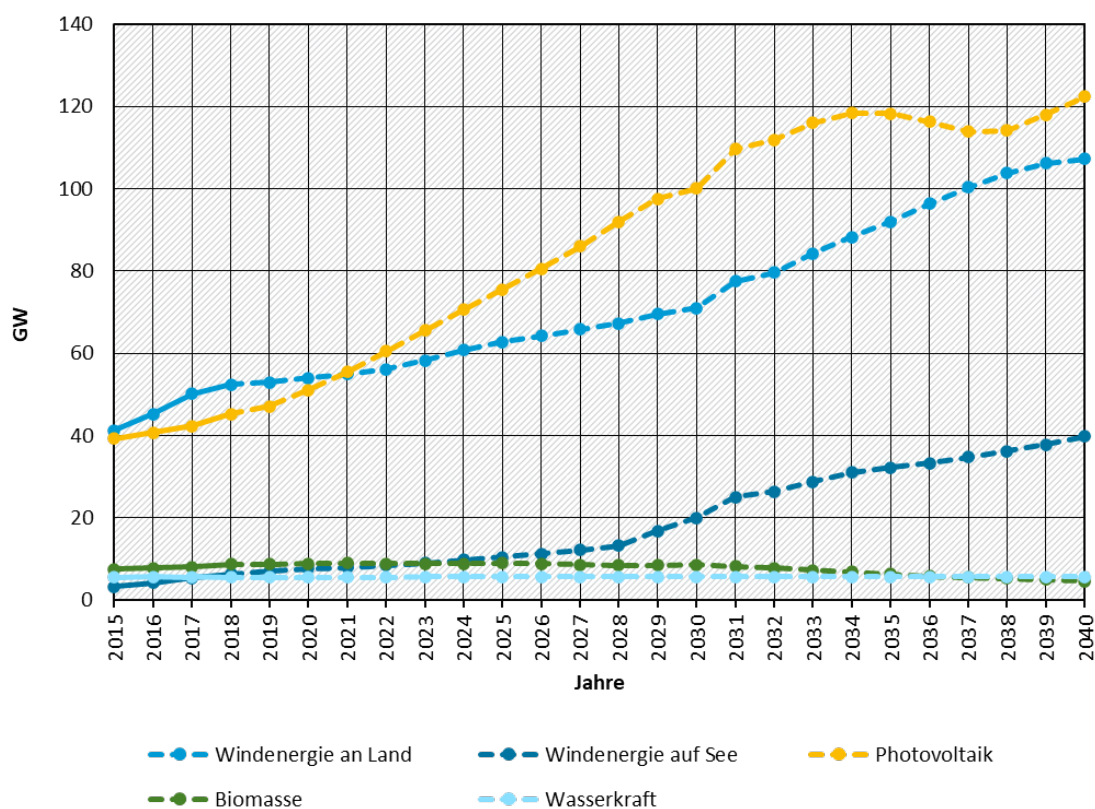
³² Die Stromerzeugung aus diesen Kraftwerken kann hingegen über den Zeitverlauf sinken. Siehe Tabelle 20.

gie-auf-See-Gesetzes (WindSeeG, Bundesregierung 2020) auf 20 GW im Jahr 2030. In den folgenden Jahren wird von einem jährlichen Bruttozubau in Höhe von 2,6 GW jährlich ausgegangen, um die im WindSeeG vorgesehene Leistung von etwa 40 GW im Jahr 2040 zu erreichen.

Wasserkraft ist in Laufwasser- und Speicherwasserkraftwerke unterteilt. Für Laufwasser wird ein geringer Zubau von 5 MW brutto jährlich angenommen. Die Kapazitäten der Speicherwasserkraftwerke bleiben mit knapp 280 MW annahmegemäß auf dem Niveau von 2018. Für **Geothermie** wird von einem Bruttozubau von 10 MW jährlich ausgegangen, bei einer Betriebsdauer von 25 Jahren.

Der Bruttozubau von **Biomasseanlagen** wird so parametrisiert, dass im Jahr 2030 die im EEG 2021 avisierte Zielleistung von 8.400 MW in Summe erreicht wird. Der Großteil hiervon entfällt auf Biogaskraftwerke. Hier werden in den Jahren 2020 bis 2022 jährlich 160 MW und danach 460 MW zugebaut. Aufgrund von Abschaltungen nach Ende der Betriebszeit von im Mittel 17 Jahren führt dies gegenüber dem Jahr 2018 insgesamt zu einer leichten Verringerung der installierten Netto-Leistung. Für feste Biomasse wird ein konstanter Zubau von 40 MW jährlich bis zum Jahr 2029 angenommen. Bei einer angenommenen Betriebsdauer von im Mittel 30 Jahren erhöht sich hierdurch die insgesamt installierte Leistung gegenüber dem Basisjahr leicht. Nach 2030 findet annahmegemäß kein Zubau von Biomasseanlagen mehr statt. Über den gesamten Projektionszeitraum ist der Bruttozubau von Deponie- und Klärgasanlagen so parametrisiert, dass die installierte Nettoleistung einen leicht sinkenden Pfad aufweist. Pflanzenölkraftwerke werden im Projektionszeitraum nicht zugebaut und die Bestandsanlagen nach einer Betriebszeit von 20 Jahren abgeschaltet.

Abbildung 11: Entwicklung der installierten Leistung erneuerbarer Energien im MMS



Quellen: BMWi (2021b), (Bundesregierung), Bundesregierung, Annahmen und Berechnungen des Öko-Instituts
 Anmerkungen: Biomasse umfasst feste und flüssige Biomasse, Klär-/Deponie- und Biogas

Die Volllaststunden der variablen erneuerbaren Energien wurden wie im Projektionsbericht der Bundesregierung (2019b) angesetzt und steigen für Windkraft und Photovoltaik im Projektionszeitraum an. Für Speicherwasserkraftwerke wurden 4.000 Volllaststunden angenommen. Basierend auf dem durchschnittlichen Wert der Jahre 2005 bis 2019 für Wasserkraft insgesamt (BMWi 2021a) ergeben sich für Laufwasserkraftwerke 3.676 Volllaststunden, die konstant bis 2040 angenommen wurden. Für Windenergie und Photovoltaik werden moderat steigende Volllaststunden angenommen. Diese beruhen auf Annahmen zu graduellen Verbesserungen in Technologie und Auslegung neuer Kohorten von Anlagen. Tabelle 15 fasst die Annahmen zusammen. Für das Dargebot an variablen erneuerbaren Energien ergibt sich aus der jahresdurchschnittlich installierten Leistung und den Volllaststunden die maximal mögliche Stromerzeugung. Die im Modell ermittelte Stromerzeugung kann durch Abregelung gegebenenfalls hiervon abweichen.

Tabelle 14: Installierte Leistung erneuerbarer Energien im MMS in ausgewählten Jahren in GW

Technologie	2018	2025	2030	2035	2040
Laufwasserkraft	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4
Speicherwasserkraft	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Windenergie an Land	52,3	62,8	71,0	92,0	107,2
Windenergie auf See	6,4	10,5	20,0	32,2	39,8
Photovoltaik	45,2	75,5	100,0	118,2	122,4
Biogase	6,8	7,2	6,9	5,3	3,9
Feste Biomasse	1,6	1,6	1,7	1,0	0,8
Flüssige Biomasse	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
Geothermie	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2

Quellen: BMWi (2021b), Bundesregierung, Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

Anmerkungen: Jahresdurchschnittliche Kapazitäten unter der Annahme eines unterjährig gleichmäßigen Zubaus. Biogase umfassen auch Deponie-/Klärgas. Alle Werte auf eine Dezimalstelle gerundet.

Tabelle 15: Volllaststunden der variablen erneuerbaren Energien im MMS für ausgewählte Jahre

Technologie	2018 ³³	2025	2030	2035	2040
Speicherwasserkraft	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Laufwasserkraft	3.676	3.676	3.676	3.676	3.676
Windenergie an Land	1.728	1.888	1.936	2.033	2.098
Windenergie auf See	3.253	4.030	4.032	4.036	4.039
Photovoltaik	1.047	875	903	918	943

³³ Für Laufwasserkraft, Windenergie an Land, Windenergie auf See und Photovoltaik sind die hier für 2018 dargestellten Werte nur indikativ ausgewiesen. Im Modell wird das Dargebot anhand der Dargebotsprofile und der für 2018 berichteten Dargebotsmengen hinterlegt.

Quellen: Daten für 2018: BMWi (2021a), Annahmen Öko-Institut; Laufwasser: BMWi (2021a), Annahmen Öko-Institut; Speicherwasser: Annahmen Öko-Institut; Windenergie: Öko-Institut & Forwind (2016), Photovoltaik: Nitsch et al. (2012)

Anmerkungen: Alle Angaben auf ganze Zahlen gerundet. Für das Jahr 2018 sind die historischen Volllaststunden der jeweiligen Technologien in Deutschland angegeben. Für alle anderen Jahren beruhen die angenommenen Volllaststunden auf den oben unter Quellen genannten Studien.

Die **Stromerzeugung aus Abfall** wird durch die Abfallmenge bestimmt, die im Projektionszeitraum zur Entsorgung in Müllverbrennungsanlagen und Heizkraftwerken anfällt. Für den Industrieabfall wird angenommen, dass die anfallende Gesamtmenge und damit die zur Verfügung stehende Menge an Brennstoff sich von 2020 bis 2030 aufgrund von verstärktem Recycling um 10 % reduziert und nach 2030 konstant bleibt. Gleichzeitig steigt im selben Zeitraum der biogene Anteil des Industrieabfalls wegen des zunehmenden Einsatzes nachwachsender Rohstoffe von 20 % auf 30 %. Im Bereich der Siedlungsabfälle führt stärkeres Recycling im Jahr 2030 zu einem Rückgang der Brennstoffmenge von insgesamt etwas über 13 % gegenüber 2018. Dieser Rückgang betrifft sowohl den fossilen Anteil der Siedlungsabfälle als auch den biogenen. Aufgrund der Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zur getrennten Erfassung und Verwertung von Bioabfällen werden diese zunehmend weniger in Kraftwerken verbrannt. Nach 2030 werden die Annahmen für Siedlungsabfälle konstant fortgeschrieben. Auch die Menge des Klärschlammes, der zum biogenen Abfall zählt, wird als konstant auf dem recht hohen Wert von 2018 angenommen. Mit den gegebenen Annahmen zum Gesamtnutzungsgrad der Müllverbrennungsanlagen ergibt sich die in Tabelle 16: zusammengefasste Nettostromerzeugung aus Abfall für ausgewählte Jahre.

Tabelle 16: Nettostromerzeugung aus Abfall

		2018	2025	2030	2035	2040
Industrieabfall	TWh	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
<i>davon biogen</i>	<i>TWh</i>	<i>0,3</i>	<i>0,3</i>	<i>0,3</i>	<i>0,3</i>	<i>0,3</i>
Siedlungsabfälle	TWh	9,8	9,0	8,5	8,5	8,5
<i>davon biogen</i>	<i>TWh</i>	<i>4,9</i>	<i>4,6</i>	<i>4,4</i>	<i>4,4</i>	<i>4,4</i>
Klärschlamm	TWh	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut, Daten für 2018: AGEB (2021)

Anmerkungen: Auf ganze Zahlen gerundet. Eventuelle Abweichungen der Summe aufgrund von Rundungsfehlern.

Für die Entwicklung der **Stromspeicher** wird bei Pumpspeichern eine Erhöhung von 8,9 GW im Jahr 2018 auf 9,8 GW im Jahr 2040 angenommen, angelehnt an den Ten Year Network Development Plan (TYNDP) der ENTSO-E und ENTSO-G (2018). Hierbei wird von einer identischen Kapazität für Pumpen und Turbinen ausgegangen sowie einer *Energy-to-Power-Ratio*³⁴ von 8 Stunden. Die Pumpspeicher können somit bei voller Leistung für 8 Stunden Strom erzeugen, wenn sie komplett gefüllt sind. Die Gesamtkapazität teilt sich auf Anlagen in Deutschland sowie auf Anlagen in Luxemburg und Österreich auf, die ans deutsche Netz angeschlossen sind.

Die Kapazitäten von Batteriespeichern entsprechen für die Jahre 2018 bis 2020 den historischen Werten für Lithium-Ionen-Batterien (Bundesnetzagentur 2020c). Sonstige historische Batteriekapa-

³⁴ Die *Energy-to-Power-* oder E/P-Ratio gibt das Verhältnis von Speichervolumen in MWh und Turbinenkapazität in MW an.

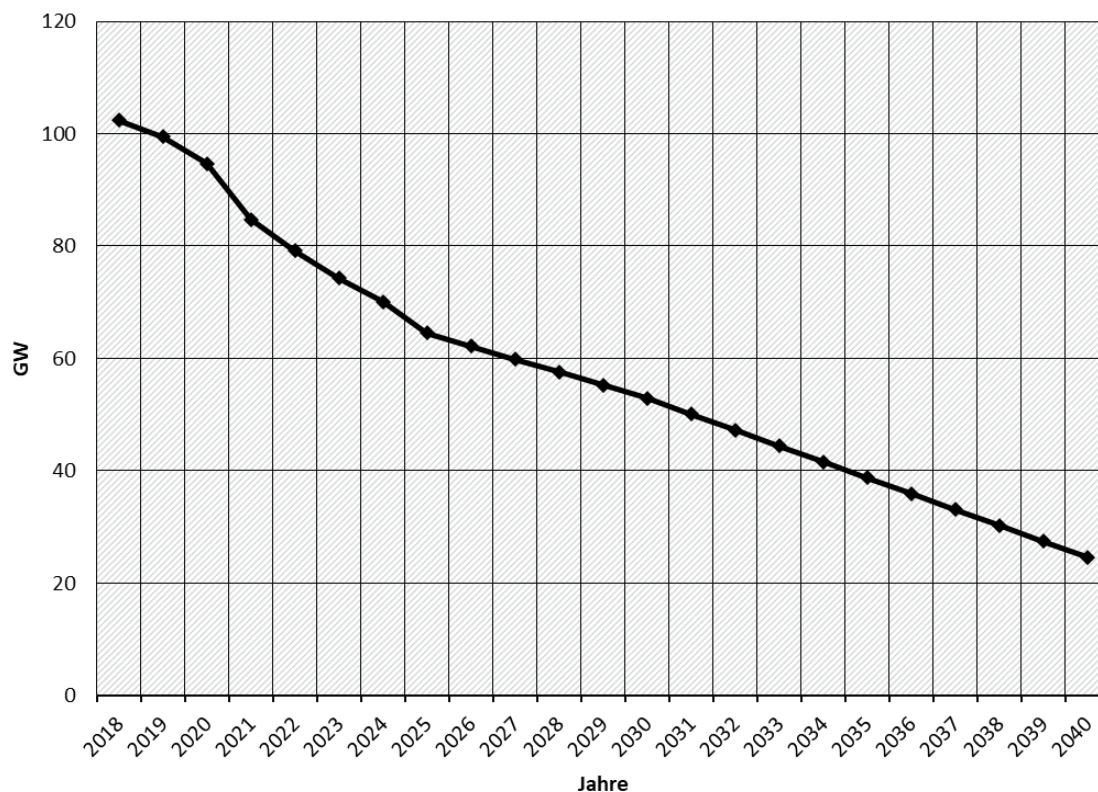
zitäten dienen annahmegemäß für Systemdienstleistungen und stehen zur Lastdeckung und Aufnahme von Überschüssen nicht zur Verfügung. Für den Pfad bis 2040 folgen die Batteriekapazitäten der Entwicklung der PV-Kapazitäten. Insbesondere wird angelehnt an den Netzentwicklungsplan 2021 (Bundesnetzagentur 2020a) für das Jahr 2035 angenommen, dass 60 % der installierten PV-Kapazität auf private Haushalte entfällt und 20 % dieser Haushalte einen Batteriespeicher besitzen. Hierbei wird von einer Speichergröße von 5 kW und 10 kWh pro Haushalt ausgegangen. Der Pfad bis 2035 wird interpoliert und nach 2035 gemäß der vorgestellten Berechnung bis 2040 fortgeführt. In PowerFlex sind die Batteriespeicher an das Dargebot an PV-Strom geknüpft. Falls dieses in einer Stunde etwa 50 % der installierten Leistung entspricht, stehen auch nur 50 % der Einspeicherleistung zur Verfügung. Das Ausspeichern ist hiervon unberührt.

Tabelle 17: Kapazitäten von Stromspeichern im MMS

Technologie	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
Pumpspeicher	GW	8,9	9,8	9,8	9,8	9,8
Batteriespeicher	GW	0,2	3,8	7,0	10,1	10,5

Quellen: Berechnungen und Annahmen Öko-Institut, basierend auf Bundesnetzagentur (2020c), ENTSO-E und ENTSO-G (2018), Bundesnetzagentur (2020a)

Für **das europäische Ausland** beruht die Entwicklung der Stromnachfrage sowie der Erzeugungskapazitäten von thermischen Kraftwerken, erneuerbare Energien und Speichern auf dem Szenario Sustainable Transition des TYNDP 2018 (ENTSO-E und ENTSO-G 2018). Dieses Szenario reflektiert die Logik des Projektionsberichts insoweit, dass es ein moderates Szenario ist, in dem keine Maßnahmen vorgesehen sind, die deutlich über die bekannten hinausgehen. Insbesondere für Kohle- und Kernkraftwerke wurden die Daten durch eigene Recherchen ergänzt. Hierzu wurde die tatsächliche Entwicklung, soweit veröffentlicht, bis zum Jahr 2021 nachgezeichnet. Abbildung 12 zeigt exemplarisch die angenommene Entwicklung der installierten Leistung der Kohlekraftwerke. Die Entwicklung der Übertragungskapazitäten zwischen den Ländern beruht ebenfalls auf dem TYNDP.

Abbildung 12: Entwicklung der Kohlekapazitäten im europäischen Ausland im MMS

Quellen: Berechnungen und Recherchen Öko-Institut, ENTSO-E und ENTSO-G (2018)

Anmerkungen: Kapazitäten Braun- und Steinkohle addiert

Die **Maßnahme Wärmenetze 4.0** schließlich beinhaltet einen Ausbau der Solarthermie und Abwärmenutzung für die Fernwärme sowie eine Steigerung der Wärmebereitstellung von Großwärmepumpen in diesem Bereich. Zudem sinken durch Effizienzmaßnahmen die Verluste im Wärmemetz. Abschnitt 5.2.2 erläutert die Parametrisierung.

5.1.4 Ergebnisse

5.1.4.1 Stromnachfrage

Die Entwicklung des inländischen Stromverbrauchs wird direkt aus der Aggregation der Modellierungsergebnisse der Nachfragesektoren (Industrie, GHD, Gebäude, Verkehr) ermittelt. Über weitere Verluste und Verbräuche wird er in die notwendige Stromerzeugung umgerechnet, die PowerFlex für die Modellierung des Stromsektors vorgegeben wird.³⁵

Insgesamt ist sowohl für den Endenergieverbrauch Strom als auch für den Bruttostromverbrauch über den Projektionszeitraum ein U-förmiger Verlauf auszumachen (Tabelle 18). Der Endenergieverbrauch nimmt von etwa 513 TWh im Basisjahr 2018 auf knapp 509 TWh im Jahr 2025 leicht ab und steigt anschließend bis 2040 auf über 581 TWh an.

³⁵ 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 den 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.

Hierbei spielen zwei gegenläufige Effekte eine Rolle. Auf der einen Seite sinkt durch Effizienzmaßnahmen der Endenergieverbrauch der klassischen Verbraucher in Industrie, GHD und Haushalten. Gegenüber 2008 stellt sich hier bis 2040 ein Rückgang von fast 14 % ein. Auf der anderen Seite steigt der Endenergieverbrauch neuer Verbraucher aus der Sektorenkopplung von einem zu vernachlässigenden Wert in den Jahren 2008 und 2018 auf fast 55 TWh im Jahr 2030 und fast 150 TWh im Jahr 2040. Hier werden Verbrauchsbereiche, die in der Vergangenheit andere Brennstoffe verwendet haben, zunehmend elektrifiziert. Dies betrifft vor allem den Verkehr mit knapp unter 50 TWh im Jahr 2030 und fast 130 TWh im Jahr 2040, wo Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren durch batterieelektrische Fahrzeuge ersetzt werden, und den Gebäudesektor, wo Wärmepumpen Gas- und andere Heizungen ersetzen.³⁶

Der Bruttostromverbrauch ergibt sich als Summe des Endenergieverbrauchs und des Stromverbrauchs der Energiewirtschaft. Er folgt ebenso einem U-förmigem Verlauf über den Projektionszeitraum (Tabelle 18). Der Stromverbrauch von Raffinerien sinkt über die Zeit wegen fallender Nachfrage nach Ölprodukten. Ebenso sinkt der Eigenverbrauch der thermischen Kraftwerke, in denen in Zukunft weniger Strom erzeugt wird. Im Gegenzug steigt der Stromverbrauch aus der Sektorenkopplung an. Dies betrifft vor allem die Herstellung wasserstoffbasierter Energieträger auf Basis von Elektrolyse in den Bereichen *Power to Gas* (PtG) und *Power to Liquid* (PtL) sowie Elektrodenkessel und Großwärmepumpen zur Bereitstellung von Fernwärme. Zudem steigt der Pumpstromverbrauch an. Dieser wird im Modell PowerFlex endogen bestimmt und dient vor allem zur zeitlichen Glättung der Nutzung variabler erneuerbarer Energie.

In den vergangenen Jahren wurde signifikant mehr Strom erzeugt als verbraucht. Der Überschuss wurde in Nachbarländer exportiert. Die Exporte von knapp 49 TWh machten im Jahr 2018 etwas über 7,5 % der Bruttostromerzeugung aus (Tabelle 18). Bis zum Jahr 2038 wird eine vergleichbare Exportquote zwischen knapp unter 20 und 50 TWh, in einzelnen Jahren über 60 TWh, projiziert. Zum Ende des Projektionszeitraums sinken die Exporte. Dies liegt vor allem am deutlich steigenden Bruttostromverbrauch sowie dem Ausstieg aus der Kohleverstromung.

Tabelle 18: Bruttostromverbrauch im MMS, 2008-2040

Sektor	2008	2018	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Industrie	232,6	226,1	218,4	210,7	207,2	207,9
GHD	135,7	148,9	144,2	138,4	135,0	132,1
<i>davon Wärmepumpen</i>	0,0	0,2	0,6	1,2	2,6	4,3
Haushalte	139,5	126,6	118,9	115,0	115,4	118,0
<i>davon Wärmepumpen</i>	0,0	2,4	3,3	5,7	10,3	15,2
Schienenverkehr	16,5	11,5	12,7	13,6	13,5	13,3
Neue Verbraucher im Verkehr	0,0	0,2	18,4	47,0	87,8	129,4
Stromverbrauch Endenergie	524,3	513,3	508,7	517,9	546,0	581,1
<i>Änderung ggü. 2008</i>	0,0%	-2,1%	-3,0%	-1,2%	4,1%	10,8%

³⁶ In der Abschätzung der Treibhausgasminde rungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung (Harthan et al. 2020) wurde für das Jahr 2030 noch von einem Endenergieverbrauch Strom durch neue Verbraucher im Verkehr von nur 12,4 TWh ausgegangen. Ebenso wurde kein Verbrauch durch Großwärmepumpen sowie kein Verbrauch von Wasserstoff und -derivaten angenommen.

Summe Endenergie klassische Verbraucher	524,3	510,5	490,3	470,8	458,2	451,7
<i>Änderung ggü. 2008</i>	0,0%	-2,6%	-6,5%	-10,2%	-12,6%	-13,8%
Summe Endenergie neue Verbraucher im Verkehr	0,0	2,8	18,4	47,0	87,8	129,4
<i>Anteil am Stromverbrauch Endenergie</i>	0,0%	0,5%	3,6%	9,1%	16,1%	22,3%
Raffinerien	6,4	6,1	5,8	5,2	4,3	3,6
H2/PtG/PtL für Endverbrauch	0,0	0,0	3,1	15,9	23,7	31,5
Übrige Energiewirtschaft	7,7	6,3	4,7	3,5	2,2	1,1
Leistungsverluste	30,1	26,7	26,5	27,6	29,4	31,5
Pumpstrom	7,9	8,3	4,1	3,0	4,2	3,8
Eigenstromverbrauch Kraftwerke	38,3	34,0	24,9	22,6	18,4	15,4
Elektrodenkessel und Großwärmepumpen	0,0	0,0	1,1	2,1	3,1	5,1
Stromverbrauch Energiewirtschaft	90,5	81,4	70,4	79,8	85,7	92,1
<i>Änderung ggü. 2008</i>	0,0%	-10,1%	-22,2%	-11,8%	-5,3%	1,7%
Statistische Differenz ^a	-6,6	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	0,3
Bruttostromverbrauch	621,4	594,7	579,2	597,8	632,0	673,4
<i>Änderung ggü. 2008</i>	0,0%	-4,3%	-6,8%	-3,8%	1,7%	8,4%
Stromhandelssaldo ^b	-20,1	-48,7	-17,0	-39,6	-46,7	-20,5
Bruttostromerzeugung	641,5	643,5	579,2	637,4	678,7	694,0

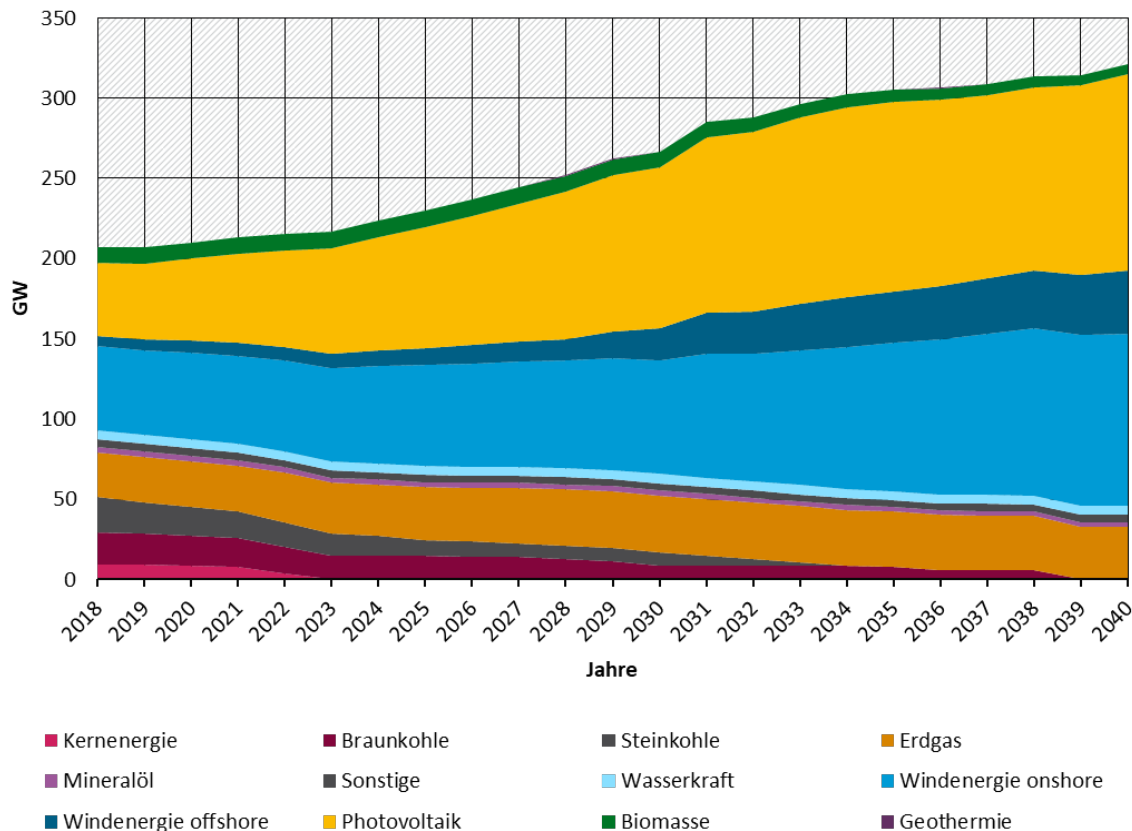
Quelle: (AG Energiebilanzen (AGEB) 2008-2020a, 2008-2020b), Modellrechnungen des Öko-Instituts

Anmerkung: Alle Werte auf eine Dezimalstelle gerundet. ^a Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Datenquellen ergeben sich kleine statistische Differenzen. ^b Ein positives Vorzeichen zeigt einen Netto-Import, ein negatives Vorzeichen einen Netto-Export an.

5.1.4.2 Entwicklung von installierter Leistung und Stromerzeugung

Abbildung 13 zeigt die projizierte Entwicklung der installierten Leistung im MMS. Tabelle 19 schlüsselt die Netto-Kapazitäten für ausgewählte Jahre detailliert auf. Der Kernenergieausstieg ist im Jahr 2023 abgeschlossen. In der ersten Hälfte der 2020er-Jahre findet eine zügige Reduktion der Steinkohlekapazitäten statt. Vor allem werden KWK-Anlagen durch Erdgas-KWK-Kraftwerke ersetzt, deren Leistung im Gegenzug ansteigt (siehe Abschnitt 5.1.3.2). Im Jahr 2034 ist kein Steinkohlekraftwerk mehr am Netz. Die Leistung der Braunkohle sinkt bis 2030 auf weniger als die Hälfte im Vergleich zum Basisjahr 2018. Ab dem Jahr 2039 sind keine Kapazitäten mehr im System. Bei den erneuerbaren Energien steigt vor allem die installierte Leistung der Windkraft und Photovoltaik deutlich an. Bis 2030 bleibt die Gesamtleistung von Biomassekraftwerken auf ähnlichem Niveau wie 2018 und reduziert sich in den 2030er-Jahren auf etwas mehr als die Hälfte. Die installierten Leistungen von Lauf- und Speicherwasser sowie Geothermie weisen einen leicht ansteigenden Trend auf.

Abbildung 13: Entwicklung der installierten Leistung im MMS



Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Daten für 2018 basierend auf Bundesnetzagentur (2020c), BMWi (2021b)

Tabelle 19: Aufschlüsselung der installierten Nettonennleistung im MMS für ausgewählte Jahre

Technologie	2018	2025	2030	2035	2040
	GW				
Kernenergie	9,5	0	0	0	0
Braunkohle	20,0	14,6	8,8	7,8	0
Steinkohle	21,8	9,7	8,0	0	0
Erdgas	28,0	33,0	35,5	34,3	32,9
Öl	3,3	3,3	3,1	2,9	2,8
Sonstige	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
<i>Gichtgas</i>	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
<i>Kokereigas</i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Raffineriegas</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Sonstige Gase</i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Abfall</i>	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Summe fossile und Kernbrennstoffe, Abfall	87,2	65,2	60,0	49,6	40,2

Windenergie an Land	52,4	62,8	71,0	92,0	107,2
Windenergie auf See	6,4	10,5	20,0	32,2	39,8
Photovoltaik	45,2	75,5	100,0	118,2	122,4
Biomasse	8,6	8,9	8,4	6,2	4,6
<i>Biogas und Deponie-/Klärgas</i>	6,7	7,1	6,7	5,2	3,8
<i>Feste Biomasse</i>	1,6	1,6	1,7	1,0	0,8
<i>Pflanzenöl</i>	0,2	0,2	0	0	0
Lauf- und Speicherwasser	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7
Geothermie	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
Summe Erneuerbare	118,1	163,4	205,1	254,5	279,9
Pumpspeicher (Turbinenleistung)	8,9	9,9	10,0	10,0	10,0
Batteriespeicher	0,2	3,8	7,0	10,1	10,5
Summe gesamt	214,4	242,3	282,1	324,2	340,7

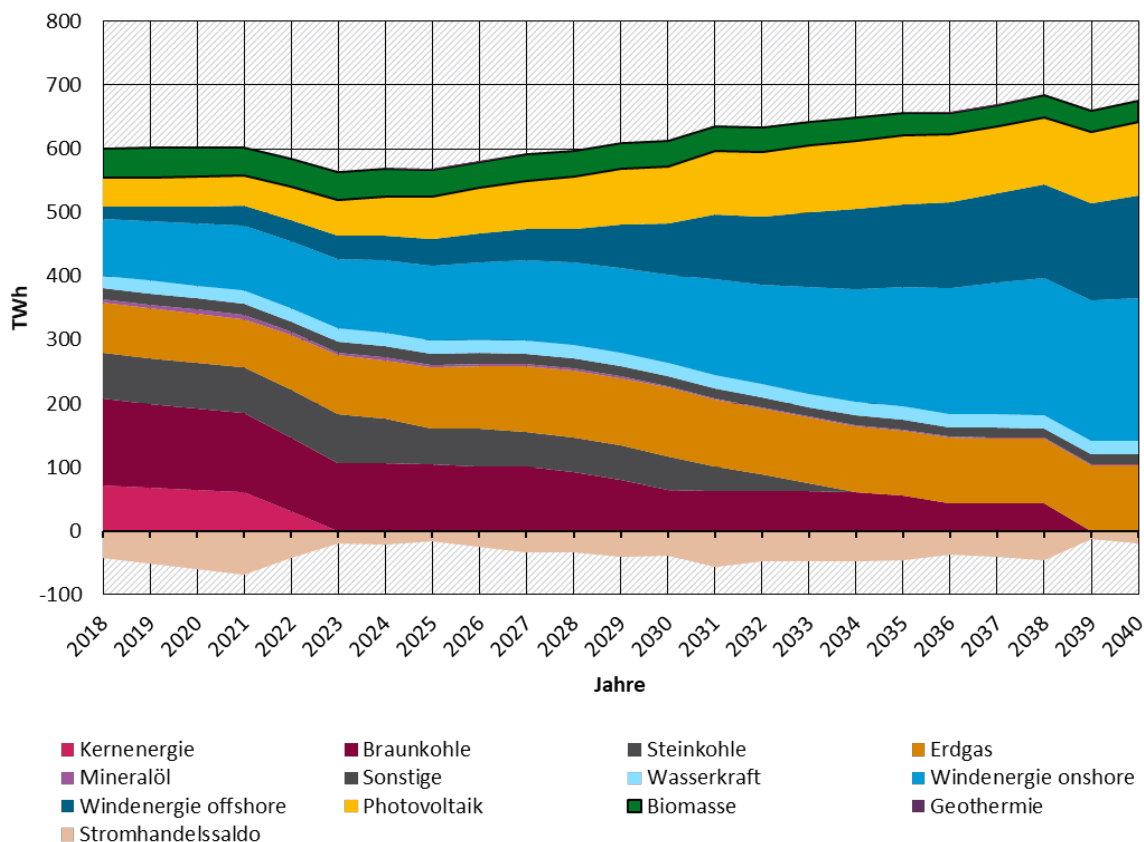
Quellen: Berechnungen Öko-Institut, Daten für 2018 basierend auf Bundesnetzagentur (2020c), BMWi (2021)

Anmerkungen: Angaben auf eine Dezimalstelle gerundet, eventuell nicht aufgehende Summen aufgrund von Rundungsfehlern

Die Nettostromerzeugung reflektiert die installierte Leistung. Abbildung 14 stellt den Verlauf über den gesamten Projektionshorizont dar. Tabelle 20 schlüsselt die Zahlen für ausgewählte Jahre detailliert auf.

Entsprechend der Reduzierung der installierten Leistung von Kohlekraftwerken sinkt die Stromerzeugung aus Kohle kontinuierlich über den Projektionszeitraum. Im Basisjahr entspricht sie mit knapp 208 TWh noch etwas über einem Drittel der gesamten Nettostromerzeugung. Der Anteil sinkt auf knapp unter 20 % im Jahr 2030 (117 TWh) und 8 % im Jahr 2035 (55 TWh). Ab 2039 wird keine Kohle mehr verstromt. Der Rückgang der installierten Leistung (Tabelle 19) kommt dabei durch eine konstant hohe, und teilweise steigende Auslastung, der Kohlekraftwerke nur unterproportional zum Tragen. So sinkt von 2018 bis 2030 die gesamte installierte Leistung an Kohlekraftwerken um knapp 60 %, die Nettostromerzeugung aus Kohle hingegen nur um 44 %. Ein Faktor hierfür ist, dass der wegfallende Strom aus dem Kernenergieausstieg kompensiert wird.

Abbildung 14: Nettostromerzeugung im MMS, 2018-2040



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Die Nettostromerzeugung aus Erdgas steigt von knapp 80 TWh im Jahr 2018 zunächst auf über 96 TWh im Jahr 2025, knapp 108 TWh im Jahr 2030 und sinkt danach über den Projektionszeitraum auf 103 TWh im Jahr 2040. Der Anstieg zum Anfang des Projektionszeitraums ist vor allem durch den zügigen Ersatz von Kohle-KWK-Kraftwerken Anfang der 2020er-Jahre zu erklären. Die wegfallende Wärme wird durch Gaskraftwerke ersetzt, welche auch zur Stromerzeugung beitragen. Im weiteren Verlauf ist dieser Ersatz weitgehend abgeschlossen und der Ausbau der erneuerbaren Energien verdrängt zum Teil die Stromerzeugung aus Gas.

Die Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Energien steigt über den Projektionszeitraum deutlich an. Im Jahr 2018 beträgt sie knapp 220 TWh, im Jahr 2030 über 369 TWh und im Jahr 2040 über 555 TWh. Dies liegt vor allem am Ausbau der Wind- und Solarenergie. Die Stromerzeugung aus Wasserkraft und Geothermie steigt hingegen nur leicht an, die Stromerzeugung aus Biomasse sinkt. Nicht nutzbare Überschüsse liegen in keinem nennenswerten Umfang vor (0,01 % im Jahr 2040).

Im Jahr 2025 beträgt der EE-Anteil am Bruttostromverbrauch 51 % (Anhang A.3), im Jahr 2030 liegt er bei 63 %, im Jahr 2035 bei 78 % und im Jahr 2040 bei 84 %. Insbesondere reicht der Ausbau der erneuerbaren Energien nicht aus, um das Ziel von 65 % Strom aus erneuerbaren Quellen am Bruttostromverbrauch im Jahr 2030 zu erreichen. Die Bruttoerzeugung von 376 TWh (entspricht der Nettoerzeugung von 369,1 TWh in Tabelle 20) stellt einen Anteil von nur 63 % am Bruttostromverbrauch von 597,8 TWh (Tabelle 18) dar. Dies liegt am Zusammenspiel eines zu geringen Energiedarfs und einer hohen Stromnachfrage. Bei gegebener Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Quellen von 375,9 TWh entsprächen 65 % einem Bruttostromverbrauch von knapp unter 580 TWh. In der Projektion liegt der Stromverbrauch jedoch höher, insbesondere durch neue Verbraucher im

Verkehr und die Nachfrage nach Strom für Elektrolyse. Andersherum erforderte ein gegebener Bruttostromverbrauch von 597,7 TWh eine Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien von gut 390 TWh. Diese wird bei gegebenen Ausbauzahlen für die installierte Leistung sowie insbesondere den angenommenen Volllaststunden (Tabelle 15) nicht erreicht. So liegt die Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in der Modellrechnung im Jahr 2030 bei 376 TWh; das Strommengenziel im Bundesregierung bereits für das Vorjahr 2029 bei 376 TWh.

Der Stromhandelsaldo schwankt bis Ende der 2030er-Jahre um 40 TWh Exporte jährlich (Tabelle 18, Abbildung 14). In den Jahren 2039 und 2040 liegt es bei 14 bzw. 21 TWh Exporten. Dies liegt vor allem an der zum Ende des Projektionszeitraums deutlich ansteigenden Stromnachfrage neuer Verbraucher sowie dem Ende der Kohleverstromung.

Tabelle 20: Aufschlüsselung der Nettostromerzeugung im MMS für ausgewählte Jahre

Technologie	2018	2025	2030	2035	2040
	TWh				
Kernenergie	71,6	0	0	0	0
Braunkohle	135,9	103,6	63,2	55,0	0
Steinkohle	71,8	57,2	53,6	0	0
Erdgas und Grubengas	79,6	96,1	107,9	102,5	103,0
Öl	4,0	3,6	2,5	1,7	1,6
Sonstige	18,5	17,1	15,9	15,4	15,0
Gichtgas	6,8	6,3	5,9	5,6	5,4
Kokereigas	2,8	2,6	2,4	2,3	2,2
Raffineriegas	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5
Sonstige Gase	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Fossiler Anteil des Abfalls	6,6	5,8	5,3	5,3	5,3
Summe fossile und Kernbrennstoffe	381,4	277,3	242,6	173,9	118,8
Windenergie an Land	88,7	118,5	137,4	187,1	224,8
Windenergie auf See	19,2	42,1	80,7	130,0	160,5
Photovoltaik	45,8	66,1	90,3	108,5	115,4
Biomasse	46,5	42,4	39,3	34,9	33,1
Biogas und Deponie-/Klärgas	31,5	26,9	23,6	23,7	23,9
Feste Biomasse, biogener Anteil des Abfalls	14,5	15,2	15,7	11,2	9,2
Pflanzenöl	0,4	0,3	0	0	0
Lauf- und Speicherwasser	19,0	20,8	20,8	20,9	21,0
Geothermie	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8
Summe Erneuerbare	219,3	290,2	369,1	482,2	555,7
Pumpspeicher	5,0	3,5	2,6	3,5	3,2

Nettostromerzeugung	605,6	5713	614,8	660,3	678,5
----------------------------	--------------	-------------	--------------	--------------	--------------

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

5.1.4.3 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Zunächst werden die CO₂-Emissionen der Kraftwerke einschließlich der Emissionen von KWK-Anlagen für Strom- und Wärmeerzeugung betrachtet. Diese sinken von 315 Mio. t CO₂ (2018) auf etwa 250 Mio. t CO₂ im Jahr 2025, 198 Mio. t CO₂ im Jahr 2030, 140 Mio. t CO₂ im Jahr 2035 und 85 Mio. t CO₂ im Jahr 2040 (Tabelle 21). Gegenüber dem Jahr 1990 entspricht dies im Jahr 2018 einer Minderung von 31 %, im Jahr 2025, einer Minderung von 45 %, im Jahr 2030 von 56 %, im Jahr 2035 von 69 % und im Jahr 2040 von 81 %.³⁷

Entsprechend des Designs von PowerFlex (siehe Abschnitt 5.1.1.2) umfassen diese Zahlen sowohl CO₂-Emissionen aus Kraftwerken, die der Energiewirtschaft zugeordnet sind, als auch CO₂-Emissionen aus Kraftwerken, die dem Industriesektor zugeordnet sind. Abschnitt 5.4 diskutiert die Ergebnisse zusammengefasst für die Energiewirtschaft; Abschnitt 6.6 für die Industrie.

Tabelle 21: CO₂-Emissionen der Kraftwerke nach Subsektoren im MMS, 1990–2040³⁸

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂						
Kraftwerke der Energiewirtschaft	386,4	341,1	258,8	201,4	155,8	101,8	45,1
<i>Braunkohle</i>	227,7	165,8	149,0	110,3	63,4	54,5	0,0
<i>Steinkohle</i>	119,1	120,5	68,6	48,4	44,8	0,0	0,0
<i>Erdgas</i>	17,5	30,3	27,6	29,4	35,5	35,1	33,1
<i>Gichtgas</i>	3,2	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Sonstige fossile</i>	18,9	17,7	13,7	13,3	12,1	12,2	12,0
Industriekraftwerke	68,5	40,3	56,4	48,8	42,6	38,5	39,7
<i>Braunkohle</i>	16,7	2,2	2,7	1,8	1,0	0,7	0,0
<i>Steinkohle</i>	14,5	3,3	4,8	3,2	2,2	0,0	0,0
<i>Erdgas</i>	15,4	16,8	21,1	18,9	16,9	16,9	19,5
<i>Gichtgas</i>	12,9	11,0	18,8	17,5	16,5	15,7	15,1
<i>Sonstige fossile</i>	8,9	7,0	8,9	7,4	6,1	5,3	5,2
Summe: Kraftwerke der Energiewirtschaft und Industrie	454,9	381,4	315,2	250,2	198,4	140,4	84,8
<i>Braunkohle</i>	244,4	168,0	151,7	112,1	64,4	55,2	0,0
<i>Steinkohle</i>	133,7	123,8	73,4	51,6	46,9	0,0	0,0
<i>Erdgas</i>	32,9	47,2	48,7	48,3	52,4	52,0	52,6
<i>Gichtgas</i>	16,1	17,7	18,8	17,5	16,5	15,7	15,1

³⁷ Im Vergleich zu 2005 ist dies im Jahr 2018 ein Rückgang von 18 %, im Jahr 2030 ein Rückgang von 50 % und im Jahr 2040 ein Rückgang von 79 %.

³⁸ Kleine Abweichungen in der Summe der Kraftwerke im Vergleich zu den Einzelsektoren entstehen durch Rundung der Dezimalstellen.

<i>Sonstige fossile</i>	27,8	24,7	22,6	20,7	18,2	17,5	17,2
Rauchgasentschwefelung (REA)	0,6	1,1	0,9	0,7	0,4	0,2	0,0
Kraftwerke der Energiewirtschaft und Industrie inkl. REA	455,5	382,6	316,1	250,9	198,8	140,6	84,8

Quelle: : (UBA 2020a), Modellrechnungen Öko-Institut

Zu den insgesamt 315 Mio. t CO₂ im Jahr 2018 tragen die Braunkohlekraftwerke mit knapp 152 Mio. t CO₂ den größten Anteil bei, gefolgt von den Steinkohlekraftwerken mit Emissionen in Höhe von etwas über 73 Mio. t CO₂. Die Emissionen aus Erdgas liegen bei knapp 49 Mio. t CO₂, gefolgt von sonstigen fossilen Brennstoffen (23 Mio. t CO₂) und Gichtgas (19 Mio. t CO₂).

Bis zum Jahr 2025 gehen die Emissionen aus der Kohleverstromung um 60 Mio. t CO₂ auf in Summe 164 Mio. t CO₂ zurück. Etwa zwei Drittel dieses Rückgangs entfallen auf Braunkohle, für die im Rahmen des KVBG in diesem Zeitraum gut 6 GW installierter Leistung (Tabelle 19) stillgelegt werden. Die CO₂-Emissionen aus Erdgaskraftwerken bleiben etwa konstant.

Bis 2030 sinken aufgrund von Stilllegungen die Emissionen der Kohleverstromung auf rund 111 Mio. t CO₂. Für Erdgas steigen die CO₂-Emissionen leicht an. Nach 2030 sinken die CO₂-Emissionen in der Energiewirtschaft deutlich ab, vor allem durch den Kohleausstieg. Die verbleibenden 85 Mio. t CO₂ im Jahr 2040 entfallen zum größten Teil auf Erdgas (53 Mio. t CO₂). Die CO₂-Emissionen aus Gichtgas und sonstigen fossilen Energieträgern bleiben im Szenariohorizont entsprechend der Stromerzeugung aus diesen Brennstoffen weitgehend konstant. Mit zusammen etwa 32 Mio. t CO₂ stellen sie einen ebenfalls relevanten Anteil der gesamten CO₂-Emissionen.

Zusätzlich zum CO₂ fallen weitere Treibhausgasemissionen an. Die Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen der Kraftwerke ist in Tabelle 22 dargestellt. CO₂ ist hierbei das relevanteste Treibhausgas. Es macht in allen Jahren mehr als 98 % der Treibhausgasemissionen aus. Im Vergleich dazu sind die Anteile von CH₄ und N₂O gering. Daher ist die relative Emissionsänderung von CO₂ sehr ähnlich zur Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung. Die N₂O-Emissionen gehen bis 2040 um 80 % gegenüber 1990 zurück. Ganz anders hingegen entwickeln sich CH₄-Emissionen: Diese haben sich, vor allem durch den Ausbau von Biogasanlagen, zwischen 1990 und 2018 um den Faktor 10 vervielfacht und betragen 2,7 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2018. Bis zum Jahr 2040 reduzieren sie sich etwa 20 % gegenüber 2018. Größte Quelle von CH₄-Emissionen sind Biogasanlagen, gefolgt von Erdgaskraftwerken.³⁹

Bis zu Jahr 2040 sinken die gesamten Treibhausgasemissionen der Kraftwerke auf etwa 88 Mio. t CO₂-Äq. Im Vergleich zum Jahr 2018, als die Emissionen noch 322 Mio. t CO₂-Äq betragen, wird somit eine deutliche Emissionsminderung von 73 % erreicht. Im Vergleich zum Jahr 1990 beträgt im Jahr 2040 die Minderung der gesamten Treibhausgasemissionen 81 %.

³⁹ Der gewählte Ansatz bei der Emissionsmodellierung (Verwendung brennstoffspezifischer Emissionsfaktoren ohne Unterscheidung einzelner Verbrennungstechnologien) unterschätzt möglicherweise zukünftige Methanemissionen aus motorischen Erdgaskraftwerken etwas.

Tabelle 22: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Stromsektor nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
CO₂-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	455,5	382,6	316,1				
MMS				250,9	198,8	140,6	84,8
CH₄-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,3	0,9	2,7				
MMS				2,2	2,1	2,1	2,2
N₂O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	3,5	2,8	2,7				
MMS				2,1	1,6	1,3	0,7
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018	459,3	386,3	321,5				
MMS				255,2	202,6	144,0	87,7
Veränderung ab 1990 in %							
Entwicklung 1990 – 2018		-15,9	-30,0				
MMS				-44,4	-55,9	-68,6	-80,9
Veränderung ab 2005 in %							
Entwicklung 1990 – 2018			-16,8				
MMS				-33,9	-47,5	-62,7	-77,3

Quelle: (UBA 2020a), Modellrechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Nur energiebedingte Emissionen in der Abgrenzung des NIR, Brennstoffeinsatz in den öffentlichen Kraftwerken, Raffineriekraftwerken, übrigen Kraftwerken der Energiewirtschaft sowie Industriekraftwerken des Verarbeitenden Gewerbes; einschließlich Rauchgasentschwefelung

5.1.4.4 Bewertung der Einzelmaßnahmen

Im MMS werden im Stromsektor die folgenden fünf Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel modelliert:

- ▶ EU-Emissionshandelssystem
- ▶ Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)
- ▶ Fortsetzung der Förderung von KWK-Anlagen
- ▶ Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVBG)
- ▶ Modellvorhaben Wärmenetze 4.0

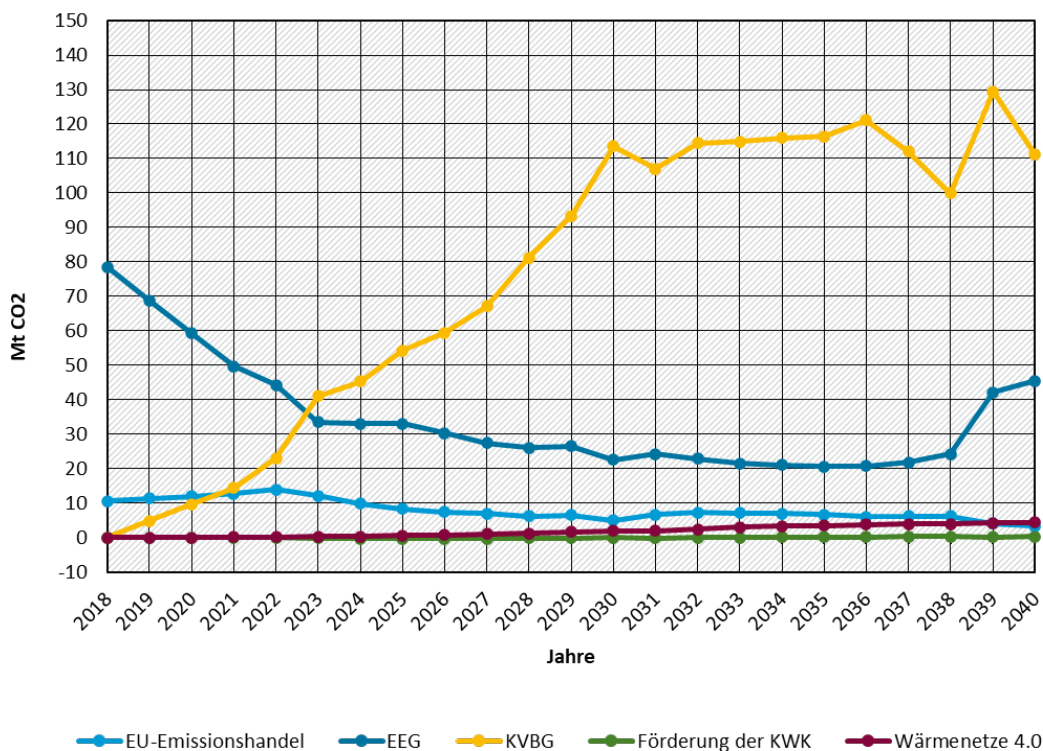
Die einzelnen Maßnahmen werden jeweils gegenüber einem Modelllauf ohne die jeweilige Maßnahme bewertet. Hierzu wird jede Maßnahme jeweils einzeln ausgeschaltet, indem die relevanten Eingangsdaten in das Modell für ihren Wirkungszeitraum variiert werden. Die resultierenden CO₂-Emissionen eines Modelllaufs bei ausgeschalteter Maßnahme werden jeweils mit den CO₂-Emissionen des MMS verglichen, um die Minderungswirkung der Maßnahme zu quantifizieren. Ein vollumfängliches OMS (Ohne-Maßnahmen-Szenario) wird im Rahmen des Projektionsberichts für den Stromsektor nicht berechnet, weil nur schwer abzuschätzen ist, wie sich die Struktur der Stromerzeugung in Deutschland ohne den Einfluss von bereits langjährig wirkenden Instrumenten wie dem EEG oder dem EU-ETS entwickelt hätte. Die Ergebnisse der Maßnahmenbewertung sind für ausgewählte Jahre in Tabelle 23 und für den gesamten Projektionshorizont in Abbildung 15 dargestellt.

Tabelle 23: CO₂-Minderungswirkung der einzelnen Maßnahmen des MMS für ausgewählte Jahre

Maßnahme	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
EU-Emissionshandel	Mio. t CO ₂	11	8	5	7	3
EEG	Mio. t CO ₂	78	33	34	21	45
Fortsetzung der Förderung von KWK-Anlagen	Mio. t CO ₂	0	-0,4	-0,1	0,2	0,3
Kohleverstromungsbeendigungsgesetz	Mio. t CO ₂	0	54	114	116	111
Modellvorhaben Wärmenetze 4.0	Mio. t CO ₂	0	0,6	2,0	3,5	4,4

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Anmerkungen: Werte auf ganze Zahlen gerundet; für die Maßnahmen Fortsetzung der Förderung KWK-Anlagen und Wärmenetze 4.0 auf eine Dezimalstelle gerundet.

Abbildung 15: CO₂-Minderungswirkung der einzelnen Maßnahmen im MMS

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Für die **Bewertung der Wirkung des EU-Emissionshandels in Deutschland** wird der CO₂-Preis in PowerFlex für alle betrachteten Jahre auf 0 €/t CO₂ festgesetzt. Dies reflektiert die Annahme, dass der EU-Emissionshandel in Deutschland nicht greift. Je nach Szenariojahr ergeben sich hierdurch zwischen 3 (im Jahr 2040) und knapp 14 Mio. t CO₂ (im Jahr 2032) höhere Emissionen pro Jahr (Tabelle 23, Abbildung 15). Diese können umgekehrt als CO₂-Emissionsminderungen interpretiert werden, die durch den EU-Emissionshandel bewirkt werden. Die Minderungen verfolgen dabei über den Projektionshorizont einen abnehmenden Verlauf. Sie liegen bei über 10 Mio. t CO₂ in den frühen 2020er-Jahren, sinken bis 2030 auf etwa 5 Mio. t CO₂ ab und bleiben in dieser Größenordnung bis zum Jahr 2038, in dem die letzten Kohlekraftwerke noch am Netz sind. Nach dem Kohleausstieg ist die Minderungswirkung des EU-ETS geringer. So liegt sie im Jahr 2040 nur noch bei knapp über 3 Mio. t CO₂. Über die Jahre 2021 bis 2040 ergibt sich eine kumulierte Emissionsminderung von etwas über 180 Mio. t CO₂.

Dieser Verlauf reflektiert größtenteils eine veränderte Nutzung von Kohle und Gas. In den frühen 2020er-Jahren steigt ohne CO₂-Preis aus dem EU-ETS die Stromerzeugung aus Braun- und Steinkohle gleichermaßen an und somit auch die Emissionen. Dieser zusätzliche Strom verdrängt Stromerzeugung aus Gas und steigert die deutschen Exporte ins Ausland. Ab Mitte der 2020er-Jahre liegt die Verstromung von Kohle kaum höher als im MMS, weil die noch angeschlossenen Kraftwerke bereits dort gut ausgelastet sind. Dafür liegt sowohl die Nutzung von Gas- als auch von Ölkraftwerken höher als im MMS; dieser Strom wird exportiert. Insgesamt ist der Emissionseffekt aber geringer.

Für die **Bewertung der Wirkung des EEG** wird als alternative Entwicklung ein Szenario angenommen, in dem im Jahr 2000 das EEG nicht eingeführt worden wäre. Es hätte dann zwar auch ein Ausbau der erneuerbaren Energien stattgefunden, jedoch auf Basis des seit 1990 geltenden Stromeinspeisungsgesetzes. Hierzu wurde der historische Ausbau der Jahre 1990 bis 2000 für Windkraft, PV und Biomasse grundsätzlich linear fortgeschrieben (Tabelle 24).

Für die Wasserkraft wurde angenommen, dass die im Jahr 2000 installierte Leistung nicht weiter ansteigt. Für Windenergie auf See und Pflanzenöl bedeutet die lineare Fortschreibung Kapazitäten von null. Die Kapazitäten von (fester und gasförmiger) Biomasse bleiben auf niedrigem Niveau. Auch die installierte Leistung der Photovoltaik wäre bei linearer Fortschreibung sehr gering (unter 500 MW im Jahr 2030). Hier wird zusätzlich angenommen, dass es außerhalb des EEG einen relevanten Ausbau durch Eigenverbrauch gibt. Dafür wird vorausgesetzt, dass entsprechende Kostensenkungen der Photovoltaik, welche die Eigenversorgung attraktiv machen, auch ohne die durch das EEG induzierten Skaleneffekte bis Ende der 2010er-Jahre erreicht worden wären. Hierzu werden die tatsächlichen PV-Eigenverbrauchsquoten der Jahre 2018 bis 2021 (50Hertz, Amprion, TenneT, TransnetBW 2017, 2018, 2019, 2020) mit einer moderaten Wachstumsrate fortgeschrieben. Diese Quoten werden mit der jährlichen Stromerzeugung aus PV im MMS multipliziert und mit der gegebenen Annahme zu Volllaststunden in die installierte Leistung umgerechnet. Ferner wird angenommen, dass in zwei Dritteln der Haushalte mit PV-Anlagen für den Eigenverbrauch ein 5 kW/15kWh-Batteriespeicher installiert ist.

Windenergie an Land weist als bereits in den 1990ern skalierte Technologie auch in diesem kontrafaktischen Szenario eine nennenswerte Leistung auf. Für Deponie- und Klärgas wurde dieselbe Entwicklung wie im MMS angenommen, da eine lineare Fortschreibung eine höhere Leistung zur Folge haben würde. Auch für Geothermie wurde keine Variation gegenüber dem MMS vorgenommen.

Tabelle 24: Installierte Leistung erneuerbarer Energie für die Bewertung des EEG für ausgewählte Jahre

Technologie		2018	2025	2030	2035	2040
Windkraft an Land	GW	17,0	21,2	24,2	27,2	30,3
Windkraft auf See	GW	0	0	0	0	0
Photovoltaik	GW	3,1	9,9	17,3	25,4	31,5
Wasserkraft	GW	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
Biomasse (feste Biomasse, Biogas)	GW	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7

Quelle: BMWi (2021a), Berechnungen und Annahmen Öko-Institut

Im Vergleich zum MMS hätten sich mit einer solchen Entwicklung der erneuerbaren Energien zusätzliche CO₂-Emissionen zwischen knapp 21 (im Jahr 2035) und 50 Mio. t (im Jahr 2022) pro Jahr ergeben (Tabelle 23, Abbildung 15). Diese können umgekehrt als Emissionseinsparungen durch die Maßnahme EEG interpretiert werden. Hier ist ein U-förmiger Verlauf über die Zeit zu beobachten, mit hohen jährlichen Einsparungen zum Anfang und Ende des Projektionszeitraums und moderateren Einsparungen in der Mitte. Für die Jahre 2021 bis 2040 kumulieren sie sich auf fast 600 Mio. t CO₂.

Dieses Ergebnis reflektiert vor allem die induzierten Änderungen in der Stromerzeugung. Fällt kontrafaktisch, ohne den Ausbau durch das EEG, viel erneuerbare Energie weg, wird diese durch Stromerzeugung aus Kohle sowie durch Erdgas und Importe ersetzt. Am Anfang des Projektionszeitraums weiten insbesondere die Steinkohlekraftwerke ihre Erzeugung aus, was den anfänglichen kontrafaktischen Anstieg der Emissionen bewirkt. Ihre Auslastung hat im MMS noch Spielraum nach oben. Braunkohlekraftwerke sind hingegen bereits im MMS bis Anfang der 2030er-Jahre gut ausgelastet.

Bis zur Mitte des Projektionszeitraums fallen die Steinkohlekapazitäten sukzessive weg und die erneuerbare Stromerzeugung wird vermehrt durch weniger emissionsintensives Erdgas sowie steigende Importe ersetzt, deren Emissionen nicht in Deutschland bilanziert werden. So betragen die Netto-Importe im Jahr 2030 fast 190 TWh. Zum Ende des Projektionszeitraums steigt die Stromerzeugung aus Erdgas weiter an, um immer mehr kontrafaktisch wegfallende erneuerbare Energie zu ersetzen.

Für die **Bewertung des Kohleverstromungsbeendigungsgesetzes (KVBG)** wird kontrafaktisch angenommen, dass die Kohlekraftwerke nicht gemäß eines Ausstiegspfades bis 2038 stillgelegt werden, sondern entsprechend einer technischen Lebensdauer von 65 Jahren vom Netz gehen.⁴⁰ Im Gegensatz zum MMS werden daher auch keine Gas-KWK-Kraftwerke als Ersatz für die Wärmeerzeugung benötigt. Insgesamt reduzieren sich damit die Kohlekapazitäten von knapp 42 GW im Jahr 2018 nur auf knapp 38 GW im Jahr 2030 (MMS: 17 GW) und 33 GW im Jahr 2040 (MMS: 0 GW).

Verglichen zum MMS wären ohne Kohleausstieg die CO₂-Emissionen deutlich höher (Tabelle 23, Abbildung 15). Hierbei steigt die Emissionsminderung durch das KVBG von 2021 (14 Mio. t CO₂) kontinuierlich bis zum Jahr 2030 (114 Mio. t CO₂) an und verharrt dann auf hohem Niveau über 100 Mio. t CO₂. Dies reflektiert den sukzessiven Rückgang der Kohleverstromung im MMS. Ein relevanter Anteil des zusätzlichen Kohlestroms wird ins europäische Ausland exportiert. Zum Ende des Projektionszeitraums finden trotz vollständigem Kohleausstieg im MMS keine nennenswerten Steigerungen der Emissionseinsparungen mehr statt.

Für die **Bewertung des Modellvorhabens Wärmenetze 4.0** werden die dort implementierten Maßnahmen deaktiviert. Dies betrifft zum einen den Ausbau der Fernwärmeerzeugung aus Solarthermie. Hier wird kontrafaktisch zum MMS angenommen, dass die Einspeisung von Fernwärme aus Solarthermie mit etwa 50 GWh auf dem für das Jahr 2019 angenommenen Wert verbleibt. Für den Ausbau von Großwärmepumpen wird ebenfalls von einem niedrigeren Pfad ausgegangen. Hier kommt nur noch die Förderung durch das KWKG zum Tragen. Ihr Wärmedargebot beträgt im Jahr 2025 1,8 TWh (MMS: 2,5 TWh), im Jahr 2030 3,6 TWh (MMS: 4,9 TWh), im Jahr 2035 5,4 TWh (MMS: 7,4 TWh) und im Jahr 2040 7,2 TWh (MMS: 9,8 TWh). Zudem findet keine Fernwärmenutzung von Abwärme statt. Schließlich wird auch von einer insgesamt höheren Fernwärmenachfrage ausgegangen, weil die im MMS umgesetzten Effizienzmaßnahmen nicht erfolgen. So macht dies für das Jahr 2025 fast 2 TWh aus, für das Jahr 2030 fast 4 TWh und für 2035 sowie 2040 über 5 TWh.

Im Vergleich zum MMS liegen die jährlichen CO₂-Emissionen ohne die Maßnahmen des Modellvorhabens Wärmenetze 4.0 zwischen 0,1 Mio. t (im Jahr 2021) und 4,4 Mio. t (im Jahr 2040) höher (Tabelle 23, Abbildung 15). Umgekehrt betrachtet ergibt sich über den gesamten Projektionszeitraum eine Emissionsminderung durch die Maßnahmen über 40 Mio. t CO₂. Über den Zeitverlauf steigt diese Minderung von 0,1 Mio. t CO₂ im Jahr 2021 auf 2,0 Mio. t CO₂ im Jahr 2030 an und erhöht sich kontinuierlich weiter auf 4,4 Mio. t CO₂ im Jahr 2040. Die Minderungen sind zum einen auf die insgesamt geringere Wärmenachfrage im MMS zurückzuführen. Zum anderen sind die Minderungen auf das höhere Dargebot von solarthermischer Wärme und Abwärme im MMS zurückzuführen. Fehlt dieses Dargebot, so wird es vor allem mit zusätzlicher Fernwärme aus Erdgas-KWK-Kraftwerken ersetzt. Als Nebeneffekt zieht dies eine stärkere Auslastung auch in der Stromerzeugung dieser Anlagen nach sich. Hierdurch wird Stromerzeugung aus Kohlekraftwerken verdrängt und der Anstieg der Emissionen aus Erdgas-KWK-Anlagen zum Teil kompensiert.

⁴⁰ Im Zuge der Einführung der Großfeuerungsanlagenverordnung (13. BImSchV) in den 1980er- und 1990er-Jahren wurden viele Kraftwerke Nachrüstungsmaßnahmen unterzogen. Deswegen wird die technische Lebensdauer bestehender Braun- und Steinkohlekraftwerke relativ hoch angesetzt.

Für die Bewertung der **Fortsetzung der Förderung von KWK-Anlagen** wird ein kontrafaktisches Szenario definiert, in welchem die entsprechenden Maßnahmen nicht durchgeführt werden. Für kleine und mittelgroße (bis 50 MW) Erdgas-KWK-Kraftwerken wird angenommen, dass die Förderung durch das KWKG nicht verlängert wird und Ende 2022 ausläuft. Ab dem Jahr 2023 findet daher kein durch das KWKG induzierter Zubau außerhalb des Kohleersatzes (vgl. Tabelle 13) mehr statt. Wichtig ist an dieser Stelle, noch mal darauf hinzuweisen, dass der Großteil der neu errichteten Erdgas-KWK-Kraftwerke im Rahmen des Kohleersatzes stattfindet und der Maßnahme Kohleverstromungsbeendigungsgesetz zugeordnet wird.⁴¹ Zum anderen wird davon ausgegangen, dass die Kapazitäten von Elektrodenkesseln (Tabelle 25) und das Wärmedargebot von Großwärmepumpen (Tabelle 26) nicht wie im MMS ansteigen. Stattdessen wird für die Elektrodenkessel der Ausbau der Jahre 2011 bis 2018 linear fortgeschrieben. Dies resultiert in einer installierten Leistung von 0,30 GW im Jahr 2030 (MMS: 2,5 GW) und 0,44 GW im Jahr 2040 (MMS: 5,0 GW). Für die Großwärmepumpen reduziert sich die Fernwärmeerzeugung auf 1,3 bzw. 2,6 TWh in den Jahren 2030 und 2040 (MMS: 4,9 und 9,8 TWh).

Die Bewertung zeigt, dass die CO₂-Emissionen ohne die Maßnahme Förderung der KWK in den Jahren 2021 bis 2031 zunächst zwischen etwa 0,1 und 0,4 Mio. t pro Jahr niedriger liegen als im MMS. An dem Jahr 2033 kehrt sich dieses Ergebnis um und die Förderung der KWK führt zu Emissionsminderungen zwischen 0,1 und 0,3 Mio. t CO₂ pro Jahr (Tabelle 23). Über den Zeitraum 2021 bis 2040 ergibt sich eine kumulierte Emissionserhöhung von etwa einer Million Mio. t CO₂.

Hier überlagern sich mehrere Gründe. Bis Ende der 2020er-Jahre wird in der kontrafaktischen Rechnung ohne die KWK-Förderung weniger Erdgas für Fernwärme verwendet. Stattdessen kommt verstärkt Biogas und zum Teil Kohle zum Einsatz. Zudem sinkt die gesamte Stromerzeugung leicht, getrieben von einer geringeren Nachfrage von Wärmepumpen und Elektrodenkesseln. Insgesamt liegen die Emissionen ohne die Maßnahme unter denen vom MMS. In den 2030er-Jahren hingegen wird im kontrafaktischen Szenario ohne KWK-Förderung mehr Erdgas für die Fernwärmeerzeugung verwendet. Dies liegt an der geringen Rolle der Wärmepumpen und Elektrodenkessel, die im MMS relevanter werden. Somit liegen die Emissionen in den kontrafaktischen Modellrechnungen über denen des MMS. Vor allem die geringere Fernwärmeerzeugung aus *Power to Heat*, wofür im MMS zu großen Teilen erneuerbar erzeugter Strom verwendet wird, führt zu einer höheren Auslastung von Erdgas-Anlagen und mithin Emissionen.

5.2 Übrige Energiewirtschaft

5.2.1 Methodik

Neben der Stromerzeugung müssen für die Energiewirtschaft (bzw. dem Umwandlungssektor im Sinne der Energiebilanz) noch eine Reihe weiterer Verursacherbereiche berücksichtigt werden:

- a) Heizwerke der Fernwärmeversorgung (d.h. ungekoppelte Fernwärmeerzeugung)⁴²,
- b) (Mineralöl-) Raffinerien,

⁴¹ Der Zubau, der der Maßnahme Kohleverstromungsbeendigungsgesetz zugeordnet wird, bleibt bestehen.

⁴² Gekoppelte Fernwärmeerzeugung bezeichnet die Fernwärmeerzeugung in Heizkraftwerken bei gleichzeitiger Stromerzeugung. Ungekoppelte Fernwärmeerzeugung hingegen bezeichnet die Fernwärmeerzeugung ohne gleichzeitige Stromerzeugung, z. B. in Heizwerken.

- c) übrige Anlagen des Umwandlungssektors (Braunkohlengruben, Steinkohlenzechen, Brikettfabriken, Kokereien, andere Umwandlungs- und Veredelungsanlagen, Eigenverbrauch von Biogasanlagen),
- d) Erdgasverdichterstationen im Pipelinennetz⁴³.

Die Entwicklung der Verteilung der fossilen Brennstoffeinsätze (außer Erdgas) der Heizwerke orientiert sich an den Entwicklungen der Brennstoffeinsätze zur Wärmezeugung in öffentlichen Kraftwerken. In einzelnen Fällen werden Brennstoffeinsätze fortgeschrieben. Für einige erneuerbare Energieträgern und Technologien wurden explizit Annahmen zum Ausbau getroffen (siehe Abschnitt 5.2.2), während Einsätze übriger erneuerbarer Energieträger sowie von Abfall auf dem Niveau des Jahres 2018 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. Energieverbräuche, die nicht konkret zu individuellen Treibern zugeordnet werden können, werden als konstant fortgeschrieben. Bei den Erdgasverdichterstationen wird zusätzlich der Ausbau des Erdgastransportnetzes berücksichtigt.

5.2.2 Annahmen und Parameter

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.⁴⁴ 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. Da Solarthermie aktuell nur einen sehr kleinen Anteil an der Fernwärme hat, wurde bis 2030 ein exponentielles Wachstum angenommen, das nach 2030 in ein Wachstum von 0,2 GW pro Jahr übergeht. Die installierte Leistung an PtH-Anlagen steigt von 0,1 GW im Jahr 2020 bis 2030 um rund 0,2 GW pro Jahr; danach um 0,3 GW pro Jahr. Für Geothermie und Wärme-

⁴³ 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 und in der Zuordnung des Klimaschutzgesetzes zur Energiewirtschaft gehören. Diese Besonderheit wurde in der Modellierung bei der Berechnung von Primär- und Endenergie einerseits und der Zuordnung von Emissionen andererseits berücksichtigt.

⁴⁴ Grundsätzlich wirken sich Wärmenetze sowohl auf Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Strom und Wärme, Abschnitt 5.1), 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.

pumpen entsprechen die Annahmen dem KSPr 2030 (Januar 2020) aus Harthan et al. (2020). Darüber hinaus wurde berücksichtigt, dass in zunehmendem Maße Abwärme aus der Industrie zur Fernwärmeversorgung genutzt wird. Die resultierende kumulierte installierte und Leistung und Wärmebereitstellung durch neue EE-Wärmeerzeuger im MMS sind in Tabelle 25 und Tabelle 26 aufgeführt.

Tabelle 25: Installierte Leistung an neuen EE-Wärmeerzeugern, 2025-2040

Wärmeerzeuger (GW _{th})	2025	2030	2035	2040
Elektrodenkessel	1,3	2,5	3,8	5,0
Solarthermie	0,4	2,5	3,2	4,0
Summe	1,7	5,0	7,0	9,0

Anmerkung: Leistungen für Geothermie, Großwärmepumpen und Abwärme sind keine für die Modellierung relevanten Daten und werden entsprechend nicht in der Tabelle aufgeführt.

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Tabelle 26: Wärmebereitstellung durch neue EE-Wärmeerzeuger, 2025-2040

Wärmeerzeuger (PJ)	2025	2030	2035	2040
Solarthermie	2	12	16	19
Geothermie	3	4	4	5
Großwärmepumpen	9	18	27	35
Elektrodenkessel	0	1	2	4
Abwärme	1	3	4	5
Summe	14	38	41	116
Reduktion Wärmenetzverluste (ggü. fiktiver Referenzentwicklung)	6	14	19	19

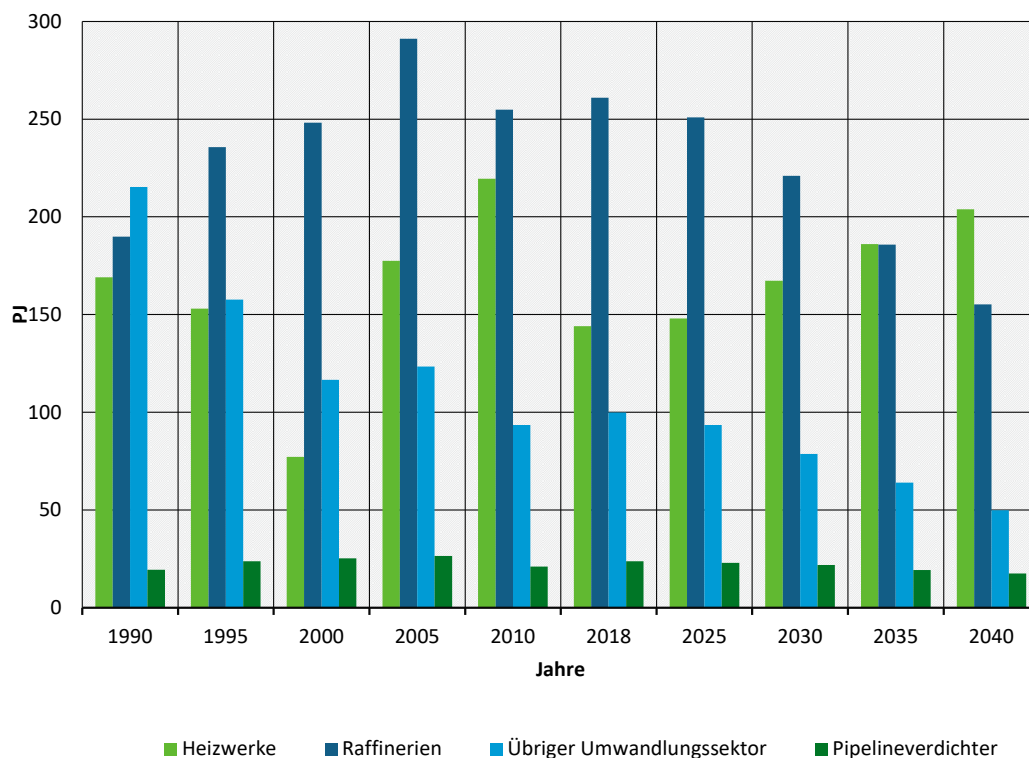
Quelle: Annahmen und Modellierung Öko-Institut

5.2.3 Ergebnisse

5.2.3.1 Entwicklung des Energieeinsatzes

Abbildung 16 zeigt die historische und zukünftige Entwicklung des Energieeinsatzes in den unterschiedlichen Bereichen der Energiewirtschaft (mit Ausnahme der Kraftwerke) im MMS. Zwischen 2018 und 2040 nimmt der Energieeinsatz bei den Raffinerien und im übrigen Umwandlungssektor ab.

Abbildung 16: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im MMS 1990-2040



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020a, 2020c), übrige Energieträger: (AG Energiebilanzen (AGEB) 2008-2020a, 2008-2020b), Modellrechnungen des Öko-Institut

Die Nachfrage nach netzgebundener Wärme (Fernwärme sowie industrielle KWK-Wärme) in den Endverbrauchssektoren steigt nach einem durch die COVID-19-Pandemie bedingten Rückgang 2020 in den Jahren 2021 bis 2023 zunächst an. In den Folgejahren sinkt die Nachfrage zunächst, vor allem durch Effizienzmaßnahmen in den Gebäuden und rückläufigen Verbräuchen in der Energiewirtschaft selbst. Die KWK-Wärmeerzeugung sinkt zwischen 2021 und 2025 zunächst langsam, danach unter anderem durch den Kohleausstieg schneller. Im Jahr 2030 liegt die KWK-Wärmeerzeugung um 14 % niedriger als im Jahr 2018 und 2040 sogar um 26 %. In Folge müssen die öffentlichen Heizwerke (einschließlich der hier bilanzierten ungekoppelten, erneuerbaren Wärmeerzeugung) einen größeren Anteil der Wärmenachfrage abdecken. Im Jahr 2030 liegt daher der Energieverbrauch der Heizwerke bereits um 16 % höher als 2018. In den Folgejahren gibt es hier aber ein deutliches Wachstum, sodass der Energieverbrauch 2040 um 42 % höher liegt als 2018. Der zusätzliche Energiebedarf wird vor allem durch neue Technologien wie Solarthermie, Geothermie, Wärmepumpen und Elektroheizer sowie Abwärme aus der Industrie gedeckt. Der Einsatz fossiler Energieträger ist rückläufig.

Bedingt durch einen Rückgang der Nachfrage nach flüssigen Kraft- und Brennstoffen über alle Sektoren hinweg (siehe dazu insbesondere die Entwicklung des Primärenergieverbrauch von Mineralöl in Tabelle 118) sinkt die Aktivität der Raffinerien. Somit zeigt sich ein Rückgang aller in Raffinerieunterfeuerungen eingesetzten fossilen Brennstoffe wie auch des Strombedarfs der Raffinerien und die Aktivität der (in Kapitel 5.1 enthaltenen) Raffineriekraftwerke. Insgesamt sinkt der Energieverbrauch der Raffinerien (ohne Raffineriekraftwerke) bis 2030 um 15 % und bis 2040 um 40 % gegenüber 2018.

Der Energieverbrauch des übrigen Umwandlungssektors sinkt bis 2030 um 21 % und bis 2040 um mehr als die Hälfte gegenüber 2018. Wesentliche Treiber sind hier zum einen der Kohleausstieg und Rückgang der Nachfrage nach Kohlebriketts, zum anderen ein sinkender Koksbedarf in der Stahlherstellung durch eine teilweise Umstellung von der Oxygenstahlroute auf alternative Herstellungsverfahren.

Der Energieverbrauch der Erdgasverdichterstationen ist rückläufig und sinkt aufgrund sinkender Nachfragen der Erdgasverbraucher bis 2030 um etwa 8 % und bis 2040 um etwa 26 % gegenüber dem Jahr 2018.

Insgesamt sinkt der Energieverbrauch der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im MMS bis 2030 um gut 8 % und bis 2040 um knapp 19 % gegenüber dem Jahr 2018.

Tabelle 27: Energieeinsatz in der übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2018-2040

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Heizwerke					
Braunkohlen	1	0	0	0	0
Steinkohlen	6	2	1	0	0
Öl	4	4	4	4	4
Erdgas	84	77	73	73	71
Abfall	19	19	19	19	19
Biogas	1	1	1	1	1
(Feste) Biomasse	25	25	25	25	25
Abwärme	0	1	4	4	5
Umweltwärme über Wärmepumpen	0	9	18	27	35
Geothermie	3	3	4	4	5
Solarthermie	0	2	12	16	19
Strom	0	4	8	13	18
Heizwerke gesamt	144	148	167	186	204
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>2,8 %</i>	<i>16,1 %</i>	<i>29,2 %</i>	<i>41,5 %</i>
Raffinerien					
Öl	63	61	54	45	38
Raffineriegas	124	119	105	88	74

Erdgas	47	45	40	34	28
Kokerei-/Stadtgas	1	1	1	1	1
Fern- und Nahwärme	4	4	3	3	2
Strom	22	21	18	16	13
Raffinerien gesamt	261	251	221	186	155
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,7 %</i>	<i>-15,3 %</i>	<i>-28,8 %</i>	<i>-40,5 %</i>
Übriger Umwandlungssektor					
Braunkohlen	7	5	3	1	0
Erdgas	6	5	4	2	0
Gichtgas	19	17	16	15	15
Kokerei-/Stadtgas	8	7	7	7	6
Biogas	20	27	25	22	17
(Feste) Biomasse	6	6	6	6	6
Fern- und Nahwärme	11	8	5	3	1
Strom	23	17	12	8	4
Übriger Umwandlungssektor gesamt	100	93	79	64	50
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-6,5 %</i>	<i>-21,2 %</i>	<i>-35,9 %</i>	<i>-50,0 %</i>
Pipelineverdichter					
Erdgas	24	23	22	19	18
Pipelineverdichter gesamt	22	23	22	19	18
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,5 %</i>	<i>-8,1 %</i>	<i>-18,8 %</i>	<i>-26,2 %</i>
Übrige Energiewirtschaft gesamt	529	515	489	455	427
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-2,5 %</i>	<i>-7,6 %</i>	<i>-13,9 %</i>	<i>-19,3 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020a, 2020c), übrige Energieträger: (AG Energiebilanzen (AGEB) 2008-2020a, 2008-2020b), Modellrechnungen des Öko-Institut

5.2.3.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Zwischen 1990 und 2018 sanken die Emissionen der Übrigen Energiewirtschaft lediglich um 16 % und somit deutlich geringer als die Gesamtemissionen. Während die Emissionen aus Heizwerken und dem übrigen Umwandlungssektor in diesem Zeitraum gesunken sind, sind die Emissionen aus Raffinerien und Erdgaspipelineverdichtern sogar gestiegen. Im MMS sinken die Emissionen über alle Teilbereiche hinweg und liegen dann 2030 knapp 30 % und 2040 gut 44 % unter dem Niveau von

1990. Da die Emissionen der Übrigen Energiewirtschaft zum überwiegenden Teil aus der Verbrennung fossiler Energieträger stammen, dominieren die CO₂-Emissionen mit einem Anteil von etwa 99 % über den gesamten Zeitraum von 1990 bis 2040. Bei den Anteilen der Methan- und Lachgasemissionen gibt es nur geringe Verschiebungen.

Tabelle 28: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im der Übrigen Energiewirtschaft (ohne Kraftwerke) zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
CO₂-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	38,0	35,1	31,7				
MMS				29,6	26,6	23,6	21,1
CH₄-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,1	0,1	0,2				
MMS				0,2	0,2	0,2	0,2
N₂O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,2	0,2	0,2				
MMS				0,2	0,2	0,1	0,1
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018	38,3	35,4	32,1				
MMS				30,0	27,0	23,9	21,3
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018		-7,4	-16,1				
MMS				-21,6	-29,5	-37,5	-44,2
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 2005 in %						
Entwicklung 1990 – 2018			-9,4				
MMS				-15,3	-23,8	-32,4	-39,7

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Anmerkungen: nur energiebedingte Emissionen in der Abgrenzung des NIR, ohne Kraftwerke der Raffinerien und des übrigen Umwandlungssektors; mit Erdgaspipelineverdichtern

5.3 Diffuse Emissionen aus Brennstoffen

5.3.1 Methodik

Die Modellierung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen erfolgt in enger Anlehnung an die Berechnungsmethoden des Nationalen Inventarberichts (Umweltbundesamt (UBA) 2020). 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 29 gibt einen Überblick über die verwendeten Aktivitätsraten.

Tabelle 29: 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 ⁴⁵	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

⁴⁵ Entgegen ihrer Bezeichnung enthält die Quellgruppe CRF 1.B.2.a.1 in Deutschland nicht nur die Exploration nach Erdöl, sondern auch nach Erdgas.

5.3.2 Annahmen und Parameter

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.
- b) Für die Förderung von Erdöl in Deutschland wurde auf die bis zum Jahr 2030 reichende Prognose im finalen Nationalen Energie- und Klimaplan (BMWi 2020) zurückgegriffen. Für die inländische Erdgasförderung wurden auf die bis zum Jahr 2030 reichende Prognose im Entwurf zum Netzentwicklungsplan Gas 2020 (Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas 2020) zurückgegriffen. Da beide Quellen nur bis 2030 reichen, wurde der jeweilige Trend bis zum Jahr 2040 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 2018 ausgegangen, wobei die im Entwurf zum Netzentwicklungsplan Gas 2020 (Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas 2020) 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.

5.3.3 Ergebnisse

Tabelle 30 zeigt die Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen. Im Zeitraum von 1990 bis 2018 sanken diese Emissionen um 77 % von 37,7 Mio. t CO₂-Äq auf 8,5 Mio. t CO₂-Äq. Durch weitere deutliche Emissionsminderungen verbleiben im Jahr 2030 noch 6,8 Mio. t CO₂-Äq, was einer Reduktion von 82 % gegenüber 1990 entspricht. Der weitere Emissionsrückgang ist dann deutlich langsamer, im Jahr 2040 verbleiben 6,0 Mio. t CO₂-Äq, 84 % niedriger als 1990.

Im Jahr 1990 war die bedeutendste Emissionsquelle der Kohlenbergbau mit 25,5 Mio. t CO₂-Äq, vor allem verursacht durch Methanemissionen. Bis zum Jahr 2018 sind diese Emissionen bereits um fast 94 % auf nur noch 1,6 Mio. t CO₂-Äq zurückgeführt worden. Aufgrund der kompletten Rückführung des deutschen Steinkohlenbergbaus bis zum Ende des Jahres 2018 betragen die Emissionen im Jahr 2030 nur noch 0,1 Mio. t CO₂-Äq, ein Rückgang um über 99 % gegenüber 1990. Die verbleibenden Emissionen aus den stillgelegten Zechen sinken nach 2030 nur noch kaum. Braunkohlentagebaue hingegen haben nur sehr geringe diffuse Emissionen. Die Emissionen aus der Koksproduktion von 1,9 Mio. t CO₂-Äq (1990) um 62 % auf 0,7 Mio. t CO₂-Äq (2018). Im Szenarioverlauf sinken diese Emissionen durch eine geringe Koksnachfrage in der Stahlproduktion auf 0,7 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2040 ab.

Die diffusen Emissionen aus der Förderung, Verarbeitung und Verteilung von Erdgas stiegen von 9,0 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 1990 zunächst auf 11,5 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 1993 an und fielen anschließend auf 5,4 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2018. Bis zum Jahr 2030 ändern sich diese Emissionen nur geringfügig, bis 2040 sinken sie aber leicht und liegen mit 4,8 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2040 um 46 % niedriger als 1990. Ursache für diese vergleichsweise konstanten Emissionen sind zwei gegenläufige Trends: 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 von 0,8 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 1990 auf 0,5 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2018 und werden auf 0,3 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2040 sinken. Ähnliches gilt für die Emissionen aus Abfackelung und Belüftung: Hier sanken die Emissionen von 0,5 Mio. t CO₂-Äq (1990) auf 0,3 Mio. t CO₂-Äq (2018) und werden leicht auf 0,2 Mio. t CO₂-Äq (2040) absinken.

Insgesamt zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Anteile der unterschiedlichen fossilen Brennstoffe an den diffusen Emissionen. Wurden 1990 noch 73 % der diffusen Emissionen durch Kohle und Koks verursacht, sank dieser Anteil bis 2018 auf 27 % und im Jahr 2040 wird er bei nur noch 11 % liegen. Erdgas steigerte seinen Anteil hingegen von 24 % im Jahr 1990 auf 64 % im Jahr 2018 und wird im Jahr 2040 mit einem Anteil von 81 % die diffusen Emissionen dominieren. Der Anteil von Öl an den diffusen Emissionen stieg von 2 % (1990) auf 6 % (2018) und wird mit einem Anteil von 5 % (2040) eine ähnlich untergeordnete Bedeutung behalten. Ähnlich stieg der Anteil von Abfackelung und Belüftung von 1 % (1990) auf 4 % (2018), bleiben aber bis zum Jahr 2040 in etwa bei diesem Anteil.

Tabelle 30: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MMS, 1990-2040

	1990	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq						
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	0,5	0,5	0,5
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
Gasförderung-, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	1,0	0,6	0,5	0,4	0,2	0,0
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
CO₂-Emissionen gesamt	3,8	2,0	1,8	1,5	1,2	1,0
CH₄-Emissionen						
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	25,5	1,6	0,2	0,1	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)	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
Gasförderung-, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	8,0	4,8	4,9	5,0	4,9	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	6,5	5,2	5,2	5,1	5,0
N₂O-Emissionen						

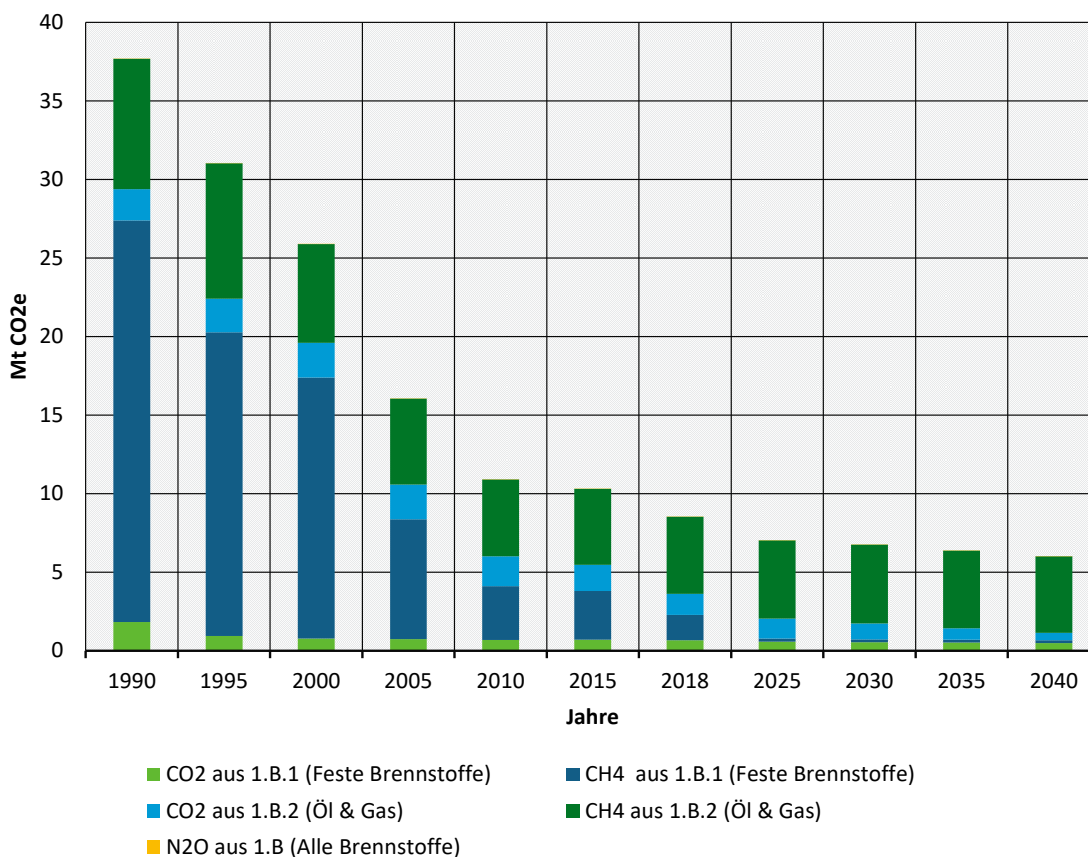
N₂O-Emissionen gesamt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen						
Diffuse Emissionen gesamt	37,7	8,5	7,0	6,8	6,4	6,0
<i>ggü. 2005</i>	<i>134,8 %</i>	<i>-46,9 %</i>	<i>-56,2 %</i>	<i>-57,9 %</i>	<i>-60,3 %</i>	<i>-62,5 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-77,4 %</i>	<i>-81,3 %</i>	<i>-82,1 %</i>	<i>-83,1 %</i>	<i>-84,0 %</i>

Anmerkung: Emissionen, die in der Tabelle als 0,0 Mio. t CO₂-Äq dargestellt sind, existieren, sind aber kleiner als 0,05 Mio. t CO₂-Äq.

Quelle: 1990 - 2018: (UBA 2020a); 2025 - 2040: Berechnungen des Öko-Instituts

Abbildung 17 fasst die historische und projizierte Entwicklung der diffusen Emissionen grafisch zusammen. Deutlich zu erkennen ist, dass der historische Rückgang der Emissionen vor allem aus einem 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 danach nur noch sehr langsam sinken.

Abbildung 17: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MMS, 1990-2040



Quelle: 1990 - 2018: (UBA 2020a); 2025 - 2040: Berechnungen des Öko-Instituts

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

- a) zur Weiterentwicklung der Erdgasinfrastruktur und
 b) zur zukünftigen Erdöl- und Erdgasförderung.

5.4 Gesamtergebnisse Energiewirtschaft

Bezogen auf die Treibhausgasemissionen stellt im Sektor Energiewirtschaft die öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung die größte Quellkategorie dar (Tabelle 31). Zwischen 2018 und 2030 nehmen die Treibhausgasemissionen aus der Energiewirtschaft um 39 % ab. Wesentliche Treiber sind hierbei der Rückgang der Kohleverstromung im Rahmen des Kohleverstromungsbeendigungsgesetzes sowie die Zunahme der Erneuerbaren Energien durch die Förderung im Rahmen des EEG, vor allem On- und Offshore-Windkraft und Photovoltaik. Weitere Treiber sind die CO₂-Bepreisung durch den EU-ETS sowie, zu geringeren Anteilen, die Förderung nachhaltiger Fernwärme durch das Modellvorhaben Wärmenetze 4.0. Neben den Elektrizitätswerken stellen auch die öffentlichen Heizwerke eine weitere Emissionsquelle dar. Dort ändern sich die Emissionen aber nur wenig.

In den restlichen Kategorien im Sektor Energiewirtschaft ändern sich die Emissionen zwischen 2020 und 2030 nur wenig. 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 Briketts. Die Emissionen der Erdgasverdichterstationen bleiben zwischen 2020 und 2030 auf ähnlichem Niveau.

Diffuse Emissionen entstehen in erster Linie in der Gasförderung und -verarbeitung und im Gastransport. Diese Emissionen bleiben zwischen 2020 und 2030 in etwa konstant.

Insgesamt sinken zwischen 1990 und 2030 die Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft um rund 59 % auf 193,2 Mio. t CO₂-Äq.

Tabelle 31: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS

Kategorie	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO ₂ -Äq										
Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung		241,9	236,0	228,3	220,9	207,9	208,2	205,0	195,8	181,9	162,2
Mineralölraffinerien	212,4	18,0	18,9	18,7	18,5	18,2	17,9	17,5	17,1	16,7	16,1
Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger		8,7	8,6	8,5	8,5	8,3	8,0	7,7	7,5	7,2	7,0
Erdgasverdichterstationen	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2
Diffuse Emissionen	7,0	6,9	7,0	7,0	7,1	7,1	7,0	6,9	6,8	6,8	6,8
Gesamt	220,5	276,8	271,7	263,8	256,2	242,8	242,3	238,4	228,5	213,8	193,2

Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	280	257								108
Abweichung vom Sektorziel*	-59,5	14,7								85,2

Quelle für die Jahre 2021-2030: Modellrechnungen Öko-Institut

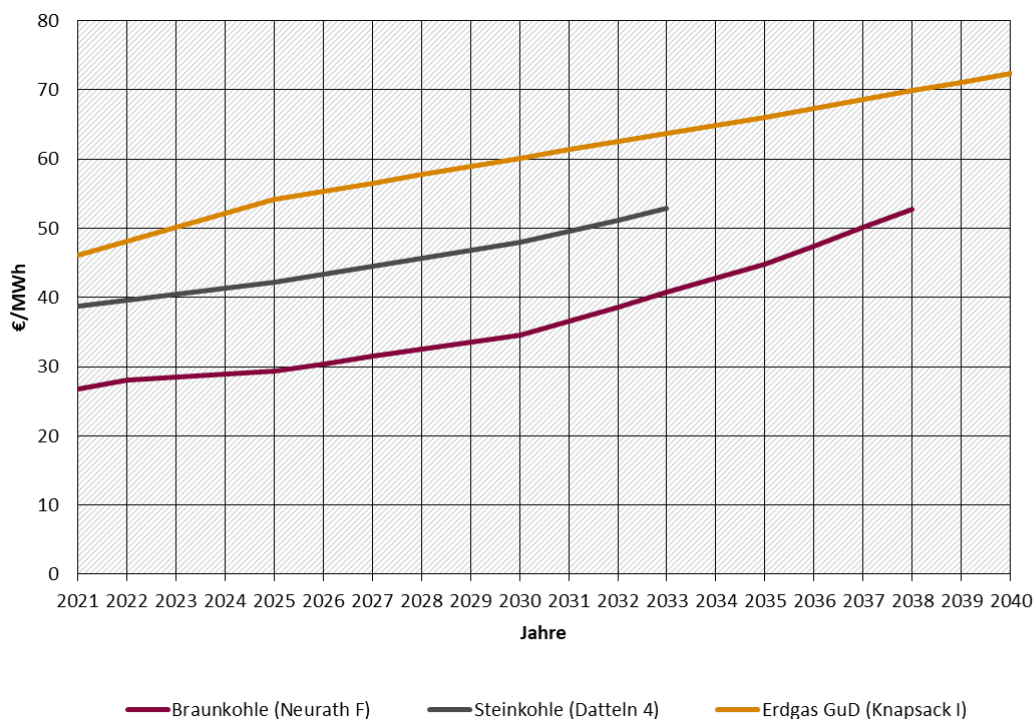
Anmerkung: Die Werte für das Jahr 2020 wurden der Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2021) entnommen.

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

Anmerkung: Die Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen sind in Anhang A.2 zu finden.

Die gesamten Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft sinken zwar bis 2030 auf 193,2 Mio. t CO₂-Äq. Dieser Wert liegt jedoch über dem Sektorziel von 108 Mio. t CO₂-Äq. Dies ist zum einen auf die relativ hohe Stromnachfrage aus der Sektorenkopplung und das Dargebot erneuerbarer Energien unterhalb des Zielniveaus zurückzuführen (vgl. Abschnitt 5.1.4). Zum anderen führen die relativ niedrigen Preise für CO₂-Zertifikate zusammen mit relativ hohen Erdgaspreisen nicht zu einem nennenswerten *Fuel Switch*. Die Grenzkosten pro MWh eines modernen Erdgaskraftwerks mit hohem Nutzungsgrad (Knapsack I) liegen im gesamten Projektionszeitraum über denen eines modernen Steinkohlekraftwerks (Datteln 4) und diese wiederum über denen eines effizienten Braunkohlekraftwerks (Neurath BoA F) (Abbildung 18).

Abbildung 18: Entwicklung der Grenzkosten effizienter Kraftwerke im MMS



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Tabelle 32 zeigt die CO₂-, CH₄-, N₂O- und Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft. Die CO₂-Emissionen nehmen mit rund 90 % im Jahr 2040 den Hauptteil der gesamten Treibhausgasemissionen ein. Die Gase CH₄ und N₂O, die sich vor allem aus technologiebedingten Verbrennungsbedingungen ergeben, machen nur einen kleinen Teil der Gesamtemissionen aus.

Tabelle 32: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
CO₂-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	428,8	380,3	293,4				
MMS				233,4	184,4	127,0	67,2
CH₄-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	34,1	14,0	9,2				
MMS				7,5	7,4	7,3	7,2
N₂O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	3,2	2,7	2,4				
MMS				1,9	1,4	1,1	0,5
Summe THG-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	466,2	396,9	305,1				
MMS				242,8	193,2	135,4	74,9
Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018		-14,8	-34,6				
MMS				-47,9	-58,5	-71,0	-83,9
Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 2005 in %						
Entwicklung 1990 – 2018			-23,1				
MMS				-38,5	-51,3	-65,9	-81,1

Quelle: (UBA 2020a), Modellrechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

6 Industrie

6.1 Energieverbrauch (ohne Industriekraftwerke)

6.1.1 Methodik

Für die Erstellung von Szenarien zur Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energiebedarf im Sektor Industrie, GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) sowie Haushaltsgeräte wird das Energienachfragemodell FORECAST⁴⁶ eingesetzt. Diese Plattform wird auch zur Berechnung der Energienachfrage in den Sektoren Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD; Abschnitt 7.4.1) sowie private Haushalte (Abschnitt 7.3.1) verwendet. Die Bewertung von Einzelmaßnahmen erfolgt je nach Datenlage und Maßnahmenausgestaltung ebenfalls mit dem Modell FORECAST oder über eine Bottom-up-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.

- ▶ 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).
- ▶ 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).

⁴⁶ Weitere Informationen siehe <http://www.forecast-model.eu/>

Im Folgenden wird das Sektormodul FORECAST-Industry beschrieben, während das Modul FORECAST-Tertiary in Abschnitt 7.4.1 und FORECAST-Residential in Abschnitt 7.3.1 beschrieben wird.

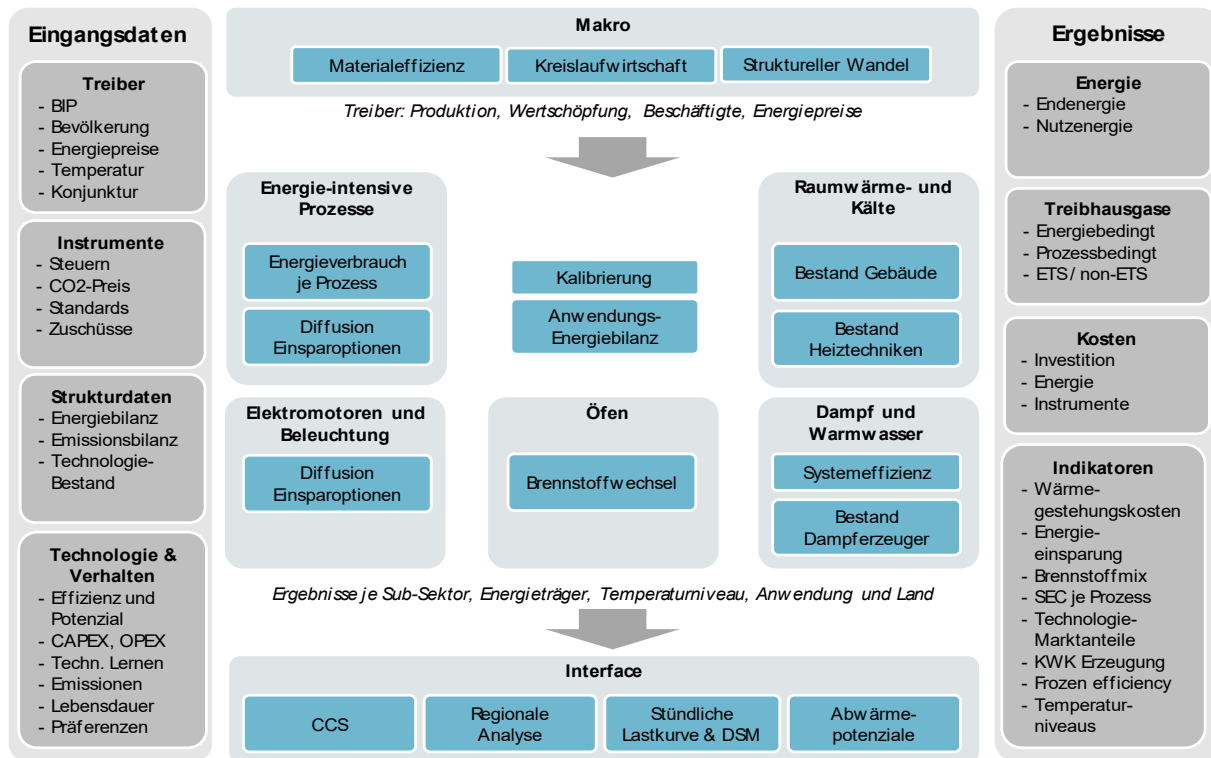
FORECAST-Industry ist hierarchisch aufgebaut und unterteilt die Industrie anhand der Energiebilanzen in einzelne Wirtschaftszweige bzw. Subsektoren. Diesen sind Prozesse zugeordnet, welche durch einen spezifischen Energieverbrauch und eine Aktivitätsgröße beschrieben werden.

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) und 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. (2013; 2012a) zusammengefasst.

- ▶ *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.
- ▶ 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).
- ▶ 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).
- ▶ *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 (siehe z. B. Jaccard (2005)). 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 33) 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 33: 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

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: Darstellung Fraunhofer ISI

Für eine weitergehende Modellbeschreibung wird auf 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 besonders für eher diffuser wirkende Maßnahmen (z. B. Energieberatung oder Energiemanagement) nicht genutzt werden. 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 2040 zu berechnen. Somit wird sichergestellt, dass die resultierende Technologieentwicklung einem möglichst realitätsnahen Rahmen folgt, selbst wenn viele Maßnahmen über Einzelbewertungen quantifiziert werden.

Tabelle 34 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 Überschneidungen mit anderen Maßnahmen und Mitnahmeeffekte und ähnliche Effekte wie Übertragungseffekte berücksichtigt wurden. Für Maßnahmen, die mit FORECAST bewertet wurden, werden entsprechende Effekte in den Modellrechnungen auch berücksichtigt, können jedoch nicht separat ausgewiesen werden, da sie bereits im Rahmen einer integrierten Modellierung erfasst werden. Auch bei einigen bottom-up bewerteten Maßnahmen wurden diese Effekte bereits implizit berücksichtigt. Mitnahmeeffekte berücksichtigen, dass z. B. Effizienzinvestitionen auch ohne Förderprogramm durchgeführt worden wären. Übertragungseffekte wirken in die umgekehrte Richtung und liegen vor, wenn das geförderte Vorhaben bei anderen Akteuren oder für weitere Aktivitäten Wirkungen entfalten, die nicht direkt im Zentrum der Förderung stehen⁴⁷. Überschneidungen berücksichtigen die vielen (häufig gewollten) Überschneidungen und 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 anteilig zugerechnet). Die angegebenen Prozentwerte für Überschneidungen und Mitnahmeeffekte reduzieren entsprechend die Brutto-Wirkung 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. Einige der in genannten Maßnahmen entfalten auch Wirkung im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) oder werden in zwei Fällen nur dort quantifiziert (siehe Abschnitt 7.4).

⁴⁷ Zur genauen Definition und möglichen Ermittlung dieser Effekte siehe Fraunhofer ISI et al. 2020 (Abschnitt 9.3).

Tabelle 34: Übersicht der Maßnahmen in den Sektoren Industrie (IND) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD): Methodik und Annahmen zu Überschneidungs- und Mitnahme- bzw. Übertragungseffekten

Szenario	Nr.	Maßnahme	Sektor	Methode	Überschneidung	Mitnahme/ Übertragungseffekte
MMS	a)	EU-Emissionshandel	IND	FORECAST	n.v.*	n.v.*
MMS	b)	Energie- und Stromsteuer	IND, GHD	FORECAST	n.v.*	n.v.*
MMS	c)	CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme	IND	FORECAST	n.v.*	n.v.*
MMS	d)	EEG-Umlagesenkung	IND, GHD	FORECAST	n.v.*	n.v.*
MMS	e)	Spitzenausgleich im Rahmen des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG)	IND	Einzelbewertung	20 %	10 %
MMS	f)	Besondere Ausgleichsregelung (BesAR) des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)	IND	Einzelbewertung	20 %	10 %
MMS	g)	Energieberatung im Mittelstand	IND, GHD	Einzelbewertung	40 %	37 %
MMS	h)	Mittelstandinitiative Energiewende und Klimaschutz	IND, GHD	Einzelbewertung	n.v.**	n.v.**
MMS	i)	Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie	IND, GHD	FORECAST	n.v.*	n.v.*
MMS	j)	Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit	IND, GHD	Einzelbewertung	5 %	30 %
MMS	k)	NKI: Kälte-Klima-Richtlinie	GHD	Einzelbewertung	5 %	5 %

Szenario	Nr.	Maßnahme	Sektor	Methode	Überschneidung	Mitnahme/ Übertragungseffekte
MMS	l)	Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke	IND, GHD	Einzelbewertung	n.v.**	n.v.**
MMS	m)	Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft - Förderwettbewerb	IND, GHD	Einzelbewertung	5 %	10 %
MMS	n)	Pilotprogramm Einsparzähler	IND, GHD	Einzelbewertung	n.v.**	n.v.**
MMS	o)	Energieauditpflicht für Nicht-KMU (Umsetzung Art. 8 EED)	IND, GHD	Einzelbewertung	30 %	10 %
MMS	p)	KfW-Energieeffizienzprogramm	IND, GHD	Einzelbewertung	30 %	30 %
MMS	q)	NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen	GHD	Einzelbewertung	n.v.**	n.v.**
MMS	r)	Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie	IND	FORECAST	n.v.	n.v.
MMS	s)	Programm CO ₂ -Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien	IND	FORECAST	n.v.	n.v.
MMS	t)	EU-ETS-Innovationsfonds: Weiterentwicklung des NER300-Programms	IND	FORECAST	n.v.	n.v.
MMS	u)	Nationale Wasserstoffstrategie: Pilot CO ₂ -Differenzverträge	IND	FORECAST	n.v.	n.v.
MMS	v)	Nationale Wasserstoffstrategie: IPCEI	IND	FORECAST	n.v.	n.v.

* Im Rahmen der integrierten Modellierung erfasst.

** Implizit bei Bottom-up-Bewertung berücksichtigt.

Quelle: (BMW i 2020) (Mitteilung zur Durchführung von Artikel 7 EED, S. 217ff.); Annahmen Fraunhofer ISI

6.1.2 Rahmendaten

Zentrale Aktivitätsgröße für den Sektor Industrie ist die Entwicklung der realen Bruttowertschöpfung je Wirtschaftszweig (Tabelle 35). Für die energieintensiven Branchen der Industrie sind vor allem die physischen Produktionsmengen relevante Bestimmungsfaktoren des Energieverbrauchs, die sich wiederum zum Teil von der Bruttowertschöpfung ableiten lassen.

Die Entwicklung der Bruttowertschöpfung (BWS) orientiert sich dabei an der hinterlegten BIP-Entwicklung (Abschnitt 3.1.2) 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 35 zeigt die entsprechenden Annahmen. Statistische Daten sind auf Ebene der Wirtschaftszweige bis 2018 verfügbar, während die BWS des gesamten Verarbeitenden Gewerbes bereits für das Jahr 2020 verfügbar ist. Entsprechend wird im Jahr 2020 von einem Rückgang um etwa 10 % ggü. dem Vorjahr ausgegangen. Dies ist relativ gemessen ein deutlich stärkerer Einbruch als beim BIP (5 %). Da für die einzelnen Wirtschaftszweige für das Jahr 2020 noch keine statistischen Daten verfügbar sind, wurde dieser Rückgang der BWS gleichmäßig auf die Wirtschaftszweige verteilt. Lediglich die Branche "Verarbeitung Steine Erden" stellt eine Ausnahme dar. Aufgrund der auch 2020 sehr hohen Konjunkturdaten für die Bauwirtschaft wird davon ausgegangen, dass auch die Branche "Verarbeitung Steine Erden" keinen merklichen Rückgang im Jahr 2020 verzeichnet hat. Entsprechend der BIP-Entwicklung wird auch für die BWS in allen Wirtschaftszweigen davon ausgegangen, dass diese bis 2025 wieder auf dem ursprünglichen Wachstumspfad ist, auf dem sie vor dem Corona-bedingten Rückgang im Jahr 2020 war.

Tabelle 35: Entwicklung der Bruttowertschöpfung der Industrie je Wirtschaftszweig (Mrd. €₂₀₁₅)

Wirtschaftszweig der Industrie	2015	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Gew. v. Steinen und Erden, sonst. Bergbau	2	2	2	2	2	2	2
Ernährung und Tabak	49	51	44	54	55	57	59
Papiergewerbe	10	11	9	12	12	12	12
Grundstoffchemie	26	26	21	25	25	26	26
Sonstige chemische Industrie	31	32	28	34	35	37	38
Gummi- u. Kunststoffwaren	25	27	23	28	28	28	29
Glas u. Keramik	6	7	6	7	7	7	7

Verarbeitung v. Steine u. Erden	8	9	9	9	9	9	9
Metallerzeugung	6	8	6	8	7	8	8
NE-Metalle, -gießereien	10	10	9	11	11	11	11
Metallbearbeitung	44	49	42	50	50	50	51
Maschinenbau	82	92	81	100	104	109	115
Fahrzeugbau	108	115	100	123	128	134	141
Sonstiges Verarbeitendes Gewerbe	98	107	94	113	115	118	122
Industrie Summe	504	546	473	574	588	605	630

Quelle: (StBA) für 2020, eigene Fortschreibung

In Tabelle 36 sind die Annahmen zur Entwicklung der jährlichen Produktionsmengen dargestellt. Während die Produktionsmengen für die Jahre 2015 und 2018 (Stahl auch 2020) aus verschiedenen Statistiken der Verbände sowie vom Statistischen Bundesamt stammen, stellt die Fortschreibung eine Annahme dar, die sich an die Erwartungen der Branchen sowie der Bruttowertschöpfung orientiert. Die Entwicklung der Wertschöpfung in der übergeordneten Statistischen Einheit, dem NACE-2-Steller (nach europäischer Aktivitätsklassifizierung), muss jedoch nicht notwendigerweise parallel zur physischen Produktion verlaufen, da sich die Wertschöpfung zum großen Teil an der Produktion der höherwertigen weniger energieintensiven Zwischenprodukte orientiert und weniger an der Produktion energieintensiver Grundstoffe. Entsprechend ist das jährliche Wachstum der Produktionsmenge häufig niedriger als das Wachstum der Wertschöpfung der jeweiligen Branche. Weiterhin wurde für die Fortschreibung der Produktionsmengen die gleiche Methode wie für vorhergehende Projektionsberichte genutzt, wodurch eine hohe Vergleichbarkeit gewährleistet wird. Hinsichtlich des wirtschaftlichen Rückgangs im Jahr 2020 zeigt sich bei den Produktionsmengen eine ähnliche Entwicklung wie bei der BWS: Bei vielen Produkten ist im Jahr 2020 ein deutlicher Rückgang zu beobachten, der aber bis 2025 wieder kompensiert wurde. Ausnahme ist auch hier die Zementproduktion, die aufgrund einer hohen Nachfrage aus der Baubranche auf hohem Niveau bleibt.

Weiterhin ist festzuhalten, dass denkbare Rückwirkungen der modellierten Maßnahmen und der Änderungen im Energiesystem, die sich auf die Produktionsmengen auswirken, nicht endogen berücksichtigt werden können. Die hier dargestellten Produktionsmengen sind exogene Annahmen für die folgende Modellrechnung und ändern sich nicht mehr.

Tabelle 36: Produktionsmengen energieintensiver Grundstoffe

Prozess/Produkt	Einheit	2015	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Rohstahl	Mio. t	42,7	42,4	35,0	42,3	42,9	44,1	45,7
Zement	Mio. t	31,2	33,7	33,9	34,5	34,2	34,2	34,6
Papier	Mio. t	22,6	22,7	22,4	23,4	23,5	23,5	23,6
Glas	Mio. t	6,4	6,6	5,8	6,9	6,9	6,9	7,1
Kalk	Mio. t	6,5	6,6	5,2	6,2	6,3	6,4	6,6
Ethylen	Mio. t	5,1	4,8	3,8	4,6	4,6	4,7	4,9
Chlor	Mio. t	4,8	4,4	4,6	4,8	4,8	4,7	4,6
Ammoniak	Mio. t	2,4	2,6	2,1	2,5	2,5	2,5	2,6
Aluminium	Mio. t	1,2	1,3	1,1	1,3	1,3	1,3	1,3

Quelle: Fortschreibung ist Annahme von Fraunhofer ISI, bis 2018 statistische Daten von Verbänden

6.1.3 Maßnahmen

6.1.3.1 Quantifizierte Instrumente

a) EU-Emissionshandel*

In der Industrie betrifft der Emissionshandel vorwiegend die energieintensiven Branchen wie Raffinerien, Metallerzeugung und -bearbeitung, Zement- und Kalkherstellung sowie die Glas-, Keramik- und Papierproduktion. Seit 2013 ist der Geltungsbereich um zusätzliche Branchen (vorwiegend aus der chemischen Industrie und der Nicht-Eisen-Metallindustrie) sowie in einigen Fällen (z. B. Adipin- und Salpetersäureherstellung) um das Treibhausgas N₂O sowie für die Aluminiumherstellung um perfluorierte Kohlenwasserstoffe erweitert worden.

b) Energie- und Stromsteuer*

Die Energie- und Stromsteuer wird entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 4.1 berücksichtigt.

c) CO₂-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme*

Die CO₂-Bepreisung wird entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 4.1 berücksichtigt. Die Modellierung erfolgt über Annahmen zum sektorübergreifend definierten CO₂-Preisfad. Die Wirkung wird endogen berechnet und zeigt sich über eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen sowie eine Erhöhung der Kosten von fossilen Prozesswärmetechniken ggü. erneuerbaren Wärmeerzeugern. Der CO₂-Preis wirkt nur auf den Nicht-ETS-Sektor, welcher im Modell prozessscharf definiert werden kann.

d) EEG-Umlagesenkung*

Die EEG-Umlagesenkung wird entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 4.1 berücksichtigt.

e) Spitzenausgleich im Rahmen des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG)

Unter dem so genannten "Spitzenausgleich" werden Steuerentlastungen für Unternehmen des produzierenden Gewerbes festgelegt. Im Jahr 2013 ist das derzeit geltende Gesetz zur Änderung des

Energiesteuer- und des Stromsteuergesetzes sowie zur Änderung des Luftverkehrsteuergesetzes in Kraft getreten. Mit diesem Gesetz wurde der "Spitzenausgleich" neu justiert und über das Jahr 2012 hinaus für weitere zehn Jahre fortgeführt. Für die Gewährung des Spitzenausgleichs müssen demnach zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

- ▶ Das antragstellende Unternehmen muss nachweisen, dass es spätestens bis Ende eines Antragsjahres ein Energiemanagementsystem nach DIN EN ISO 50001 oder ein Umweltmanagementsystem nach EMAS eingeführt hat und dieses auch betreibt (KMU können alternative Systeme zur Verbesserung der Energieeffizienz im Sinne der Spitzenausgleich-Effizienzsystemverordnung (SpaEfV) einführen und betreiben, die mit geringeren Anforderungen verbunden sind).
- ▶ Die Energieintensität des Produzierenden Gewerbes muss in Deutschland insgesamt um einen gesetzlich festgelegten Zielwert abnehmen. Dieser Zielwert beträgt für die Bezugsjahre 2013 bis 2015 (Antragsjahre 2015 bis 2017) 1,3 % jährlich und für die Bezugsjahre ab 2016 (Antragsjahre 2018 bis 2022) 1,35 % jährlich. Die Neuregelung des Spitzenausgleichs ist für einen Zeitraum von 10 Jahren angelegt.

f) Besondere Ausgleichsregelung (BesAR) des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)

Im Rahmen der BesAR werden Unternehmen in strom- und handelsintensiven Branchen mit hohem Stromverbrauch Begünstigungen bei der Zahlung der EEG-Umlage gewährt. Ziel der BesAR ist u. a. der Schutz der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der begünstigten Unternehmen und der dortigen Arbeitsplätze durch eine Begrenzung der EEG-Umlage für Strom. Bei Antragsstellung wird überprüft, ob die jeweiligen Unternehmen strom- und handelsintensiven Branchen angehören. Sie müssen außerdem nachweisen, dass ihre Stromkosten einen hohen Anteil an der Bruttowertschöpfung betragen. Weiterhin müssen antragstellende Unternehmen, um entsprechende Begünstigungen zu erlangen, einen Verbrauchs-Schwellenwert von 1 GWh/a überschreiten sowie ein zertifiziertes Energie- oder Umweltmanagementsystem nachweisen. Unternehmen mit einem Jahresstromverbrauch von mehr als 5 GWh müssen den Betrieb eines Energie- oder Umweltmanagementsystems (ISO 50001 oder EMAS) nachweisen, Unternehmen mit einem Jahresstromverbrauch von weniger als 5 GWh können auch einen Nachweis des Betriebes eines alternativen Systems zur Verbesserung der Energieeffizienz im Sinne der Spitzenausgleich-Effizienzsystemverordnung (SpaEfV) nachweisen.

g) Energieberatung im Mittelstand

Kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) wird im Rahmen des BMWi-Programms „Energieberatung Mittelstand“ (Richtlinie über die Förderung von Energieberatungen im Mittelstand vom 11.10.2017, BAnz AT 07.11.2017 B1, (EBM)) die Förderung einer qualifizierten Energieberatung angeboten. Qualifizierte Energieberater identifizieren Potenziale zur Energieeinsparung und erstellen konkrete Maßnahmenvorschläge für das jeweilige Unternehmen. Mit den Maßnahmenvorschlägen können z. B. Konzepte zur Abwärmenutzung erstellt werden. Die Richtlinie entspricht den EU-Anforderungen für Energie-Audits laut EU-Energieeffizienzrichtlinie (2012/27/EU). Das Programm wird beim BAFA administriert. Die maximale Förderhöhe beträgt pro Maßnahmenkonzept bis zu 6.000 €.

Materialeffizienz hat ein sehr hohes Potenzial, den Energieverbrauch durch industrielle Prozesse in Unternehmen und entlang der Wertschöpfungskette zu verringern. Die verstärkte Förderung von Beratungsleistungen im Bereich Materialeffizienz mit dem Ziel der Energieeinsparung in industriellen Prozessen wird daher angestrebt. Entsprechende Fortbildungen zum Themenbereich Energieeinsparung durch Material- bzw. Ressourceneffizienz werden im Rahmen des Fortbildungskataloges zur Energieeffizienz-Experten-Liste für Förderprogramme des Bundes für die Energieberatungsprogramme anerkannt. Diese Aktivitäten dienen auch der Umsetzung der Maßnahme 29 des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms III. Diese Maßnahme enthält als Ziel u. a. die bessere inhaltliche und strukturelle Abstimmung von Beratungsangeboten zur Material- und Energieeffizienz sowie die Vermeidung von Doppelberatungen.

Die Quantifizierung der Wirkung dieser Maßnahme erfolgt auf Basis der jährlichen Fördermittel, die auch für die Zukunft fortgeschrieben werden. Dabei wird auch auf Kennwerte zur Einsparwirkung aus der externen Evaluierung des Programms zurückgegriffen.

Die „Energieberatung für Nichtwohngebäude von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen“ wurde mit der „Energieberatung im Mittelstand“ und der Contracting-Orientierungsberatung zu Januar 2021 im Förderprogramm „Energieberatung für Nichtwohngebäude, Anlagen und Systeme“ (EBN) zusammengelegt. Die Förderung umfasst weiterhin u. a. die Beratung zur DIN 16247 sowie zur DIN 18599 bei einer maximalen Zuschusshöhe von 80 %.

h) Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz (MIE)

Die Mittelstandsinitiative ist ein Gemeinschaftsprojekt von BMWi, BMU, DIHK und ZdH. Die erste Förderperiode lief zum 31.12.2015 aus. Die zweite Phase der Mittelstandsinitiative wurde am 1. Januar 2016 gestartet und lief bis zum 31.12.2018. Sieben Umweltzentren des Handwerks, die in ihren Kammerbezirken regionale Entwicklungswerkstätten betreuen, wurden einbezogen. Bundesweit wurden darüber hinaus rund 10.000 Betriebskontakte zur Sensibilisierung für das Thema Energieeffizienz hergestellt und 375 Betriebe direkt besucht. Zum 1. Januar 2019 wurde eine weitere Periode der Mittelstandsinitiative gestartet, mit der die begonnenen Projekte weitergeführt und neue Maßnahmen, wie die Digitalisierung des elektronischen Energiebuchs, die Erarbeitung eines Betriebsentwicklungsfahrplans für KMU, das Thema Mobilität und die gezielte Integration des Themas Energieeffizienz in die handwerkliche Fort- und Weiterbildung konzipiert wurden. Die Umsetzung der Maßnahmen erfolgt auf Basis jeweils mit den Umweltzentren und dem ZdH abgestimmter Maßnahmenpläne, die Bestandteil der Bewilligungen sind.

Die Wirkungsabschätzung basiert auf der in der Evaluation der Maßnahme im Rahmen der Evaluierung des Energieeffizienzfonds⁴⁸ ermittelten Fördereffizienz und der für die Maßnahme eingestellten Haushaltsmittel in Höhe von rund 800 Tsd. € (Wert für die Jahre 2019-2021), die für die Folgejahre fortgeschrieben werden.

i) Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie*

Die Mindeststandards unter der EU Ökodesign-Richtlinie und den jeweiligen EU-Durchführungsverordnungen werden entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 4.2 berücksichtigt. Einige der beschlossenen Durchführungsmaßnahmen adressieren speziell den Strom- und Energiebedarf von Produkten, die in den Sektoren Industrie und GHD verwendet werden. Darunter fallen z. B. die Maßnahmen zu Elektromotoren, Ventilatoren, Wasserpumpen oder gewerblichen Kühlgeräten.

⁴⁸ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/evaluierung-und-weiterentwicklung-des-energieeffizienzfonds.html>

j) Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit

Das Programm stellt eine Neuorganisation einer Reihe früherer Fördermaßnahmen dar. Die Programme Förderung von hocheffizienten Querschnittstechnologien, die Abwärmerichtlinie, die Förderung energieeffizienter und klimaschonender Produktionsprozesse, die Förderung von Energiemanagementsystemen sowie die Förderung von erneuerbarer Prozesswärme im Marktanreizprogramm sind spätestens zum Dezember 2018 ausgelaufen und wurden mit angepassten Förderbedingungen und Fördersätzen zum Januar 2019 als gemeinsames Förderpaket neu gestartet. Dabei wurden die Programme in Form von vier Modulen gebündelt und in ihrem Antragsverfahren vereinheitlicht. Ziel der Umstrukturierung ist es, ein ganzheitliches Energieeffizienz-Förderangebot für die Wirtschaft anzubieten, Hemmnisse bei der Antragstellung abzubauen und Überschneidungen verschiedener Maßnahmen zu eliminieren.

In dem neuen Förderprogramm „Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft“ ist eine Förderung in vier wählbaren und kombinierbaren Modulen möglich:

- ▶ Modul 1: Querschnittstechnologien
- ▶ Modul 2: Prozesswärme aus erneuerbaren Energien
- ▶ Modul 3: MSR, Sensorik und Energiemanagement-Software
- ▶ Modul 4: Energiebezogene Optimierung von Anlagen und Prozessen.

Materialeffizienz kann einen wichtigen Beitrag leisten, um Energieeinsparungen zu erreichen. Es wird geprüft, inwieweit auch Technologien und Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz in den Modulen 1, 3 und 4 verstärkt gefördert werden können, sofern sie nachweisbar die Erreichung der entsprechenden Förderziele unterstützen. Diese Aktivitäten dienen auch der Umsetzung der Maßnahme 23 des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms III (Material- und energieeffiziente Produktionsverfahren fördern).

Die Quantifizierung dieser Maßnahme erfolgt bottom-up, basierend auf Parametern aus der Evaluation der Vorläuferprogramme und den vorgesehenen Fördermitteln. Es wird angenommen, dass die für das Jahr 2020 angesetzten Haushaltsmittel für das Programm in Höhe von 300 Mio. € auch für die Folgejahre Gültigkeit haben.

k) Kälte-Klima-Richtlinie

Die im Rahmen der NKI geförderte Maßnahme zielt im Kern neben der Reduktion klimaschädlicher F-Gase auch auf eine Effizienzsteigerung der geförderten Anlagen gegenüber dem Marktdurchschnitt. Dabei ist insbesondere die Wirkung der geförderten Abwärmenutzung für die erzielten Energieeinsparungen relevant. Die Quantifizierung dieser Maßnahme erfolgt bottom-up, basierend auf Parametern aus der Evaluation im Rahmen der NKI-Evaluierung und den vorgesehenen Fördermitteln. Es wird angenommen, dass die im Zeitraum von 2015-2017 ausbezahlten Fördermittel in Höhe von 50 Mio. €, d.h. rund 16,7 Mio. € pro Jahr, in den Folgejahren auf rund 22,5 Mio. € pro Jahr steigen.

l) Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke (IEEKN)

In Energieeffizienznetzwerken (EEN) schließen sich Unternehmen zusammen, die sich gemeinsame Energieeffizienz- und CO₂-Minderungsziele setzen und voneinander lernen wollen. Nach einer erfolgreichen Pilotphase des EEN-Konzepts (u. a. das LEEN (Lernende Energieeffizienz-Netzwerke)-Projekt) hat die Bundesregierung 2014 beschlossen, EEN als eine Hauptsäule des NAPE umzusetzen. Bis

2020 sollten bis zu 500 neue Netzwerke etabliert werden. Hierzu wurde 2014 eine freiwillige Vereinbarung "Initiative Energieeffizienz-Netzwerke" über die Einführung von EEN zwischen der Bundesregierung (BMWi und BMU) und mittlerweile 22 Wirtschaftsverbänden und -organisationen unterzeichnet. Insgesamt sollen dadurch 75 PJ Primärenergie eingespart und 5 Mio. t CO₂-Äq Emissionen vermieden werden. Bis zum Jahr 2025 sollen auf Basis der im September 2020 verlängerten Vereinbarung 300-350 zusätzliche Netzwerke entstehen, die 9-11 TWh Endenergie und weitere 5-6 Mio. t CO₂-Äq einsparen sollen.

Die Netzwerke sollen Mindestanforderungen erfüllen. Dazu gehören die Durchführung eines Energieaudits auf Unternehmensebene sowie das Setzen eines Einsparziels auf Netzwerk-Ebene auf Basis individueller Unternehmensziele sowie das Heben der identifizierten Einsparpotenziale gemäß Netzwerkziel. Die Netzwerke werden dabei durch einen qualifizierten Energieberater unterstützt. Die umgesetzten Maßnahmen werden im Rahmen eines jährlichen Monitorings erfasst. Zum 31.12.2019 waren 250 Netzwerke registriert (zum 9.10.2020: 282 Netzwerke), die avisierte Einsparmenge wird nach Angaben der Initiative voraussichtlich erreicht. Die Quantifizierung dieser Maßnahme erfolgt bottom-up, basierend auf Parametern aus dem Monitoring der Netzwerke sowie Anzahl und Größe der Netzwerke.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) haben am 14. September 2020 gemeinsam mit 21 Verbänden und Organisationen der Wirtschaft die Fortsetzung und Weiterentwicklung der Initiative Energieeffizienz-Netzwerke vereinbart⁴⁹. Die zu einer Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke weiterentwickelte Initiative startet ab Januar 2021.

m) Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft - Förderwettbewerb

Im Rahmen des Programms wird in einem wettbewerblichen Verfahren die akteurs-, sektor- und technologieoffene Umsetzung von Energieeffizienzprojekten in Unternehmen gefördert. Gefördert werden investive Maßnahmen zur energetischen Optimierung von industriellen und gewerblichen Anlagen und Prozessen, die zur Erhöhung der Energieeffizienz beziehungsweise zur Senkung des fossilen Energieverbrauchs in Unternehmen beitragen. Dazu zählen auch Maßnahmen zur Prozesswärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien. Darüber hinaus sind Kosten für die Erstellung eines Einsparkonzepts sowie die Umsetzungsbegleitung der geförderten Investitionsmaßnahme durch externe Sachverständige förderfähig. Bei diesem Programm handelt es sich um eine Weiterentwicklung des 2016 eingeführten Förderprogramms „Förderung von Stromeinsparungen im Rahmen wettbewerblicher Ausschreibungen: Stromeffizienzpotentiale nutzen – STEP up!“. Die Quantifizierung dieser Maßnahme erfolgt bottom-up, basierend auf Parametern aus der Evaluation des Vorläuferprogramms und den vorgesehenen Fördermitteln. Für 2020 wird von einem Förderbudget in Höhe von 35 Mio. € ausgegangen, das für die Folgejahre zunächst fortgeschrieben wird.

n) Pilotprogramm Einsparzähler*

Das sektorübergreifende Pilotprogramm Einsparzähler wird entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 4.1 zu übergreifenden Maßnahmen in den Sektoren Industrie und GHD berücksichtigt.

o) Energieauditpflicht für Nicht-KMU (Umsetzung Art. 8 EED)

Betrachtet wird hier die aus Artikel 8, Absatz 4-7, der EU-Energieeffizienzrichtlinie (2012/27/EU; EED) resultierende Verpflichtung für „Nicht-KMU“, Energieaudits durchzuführen. Die Energieaudits in den betroffenen Unternehmen sollen durch qualifizierte und/oder akkreditierte Experten durchgeführt werden. Die Richtlinie verlangt, dass das erste Energieaudit bis spätestens 5. Dezember 2015

⁴⁹ <https://www.oeffizienznetzwerke.org/esgehtweiter/>

durchgeführt wurde. Zur Umsetzung dieser Vorgaben ist das Energiedienstleistungsgesetz (EDL-G) mit Wirkung zum 22.4.2015 entsprechend geändert worden. Danach sind große Unternehmen (Nicht-KMU, d.h. Unternehmen, die nicht unter die KMU-Definition der Europäischen Kommission fallen (< 250 Mitarbeiter bzw. Umsatz < 50 Mio. € oder Jahresbilanzsumme < 43 Mio. €)) verpflichtet, bis zum 5. Dezember 2015 ein Energieaudit nach DIN EN 16247-1 durchgeführt zu haben und danach mindestens alle vier Jahre ein weiteres Audit. Unternehmen, die über ein nach DIN EN ISO 50001 zertifiziertes Energiemanagementsystem oder ein EMAS-Umweltmanagementsystem verfügen, sind von der Pflicht zur Durchführung von Energieaudits freigestellt.

Im Rahmen der Novellierung im Jahr 2019 wurde eine Bagatellschwelle von 500 MWh Gesamtenergieverbrauch eingeführt. Unterhalb dieser Schwelle kann ein vereinfachtes Energieaudit durch eine Erklärung zu Energieverbrauch und Energiekosten an das BAFA durchgeführt werden. Weiterhin wurde eine Online-Energieauditerklärung eingeführt. Diese umfasst Angaben zum Unternehmen, zum Energieauditor, zum Energieverbrauch, zu den vorgeschlagenen Energieeffizienz-Maßnahmen und den Kosten eines Energieaudits.

Für die Wirkungsabschätzung der Maßnahme wird auf die Evaluierung der Auditpflicht nach dem Energiedienstleistungs-Gesetz (EDL-G) (adelphi und IREES 2017) zurückgegriffen. Im Rahmen dieser Evaluierung wurde eine Stichprobe der nach EDL-G verpflichteten Unternehmen befragt. Dabei wurden sowohl die im Rahmen der Audits und EMS ermittelten Potenziale als auch die umgesetzten Maßnahmen abgefragt. Die hier abgeschätzte Maßnahmenwirkung adressiert dabei ausschließlich die bisher nicht umgesetzten Maßnahmen, die im Rahmen der Audits oder EMS identifiziert wurden. Die Wirkung der EMS wird den Maßnahmen "Spitzenausgleich" und "Besondere Ausgleichsregelung" zugerechnet.

p) KfW-Energieeffizienzprogramm

Mit dem KfW-Energieeffizienzprogramm vergibt die KfW zinsvergünstigte Darlehen an gewerbliche Unternehmen für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen. Das Programm fördert energieeffiziente Produktionsanlagen/-prozesse inkl. Querschnittstechnologien mit dem relativ höchsten Energieeinsparpotenzial. Mit der Fortentwicklung des Programms wurde sowohl ein neuer Einstiegsstandard (10 % Einsparung) als auch ein neuer Premiumstandard (30 % Einsparung) eingeführt. Damit wird die Förderintensität an der Höhe der Energieeinsparung ausgerichtet, unabhängig von der Unternehmensgröße. Projekte mit Premiumstandard erhalten besonders günstige Konditionen. Die verbesserten Förderbedingungen wurden im Juli 2015 wirksam. Im Jahr 2019 wurden 219 Zusagen mit einem Fördermittelvolumen von 974 Mio. € erteilt. Die Finanzierung des Programms erfolgt aus Eigenmitteln der KfW. Die Quantifizierung des Programms orientiert sich an der Anzahl der Förderfälle und der vergebenen Fördermittel der letzten Jahre. Diese werden für die kommenden Jahre fortgeschrieben.

q) NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen*

Die Kommunalrichtlinie fördert eine große Bandbreite an Klimaschutzmaßnahmen im kommunalen Umfeld, die aufgrund ihrer Vielfalt und im Fall der strategischen Förderschwerpunkte eher indirekten Wirkung nicht quantifiziert werden (z. B. Klimaschutzkonzepte und Klimaschutzmanager). Eine Ausnahme sind die investiven Maßnahmen: Hier stellt die Kommunalrichtlinie Kommunen und Akteuren im kommunalen Umfeld finanzielle Zuschüsse für investive Klimaschutzmaßnahmen zur Verfügung. Diese liegen u. a. in den Bereichen Beleuchtung, Raumbelüftung oder Rechenzentren. Diese Förderschwerpunkte werden aktuell mit Regelförderquoten von 30 bis 60 % (erhöhte Förderquoten gelten für u. a. für finanzschwache Kommunen, Sportstätten und Antragsteller aus Braunkohlerevieren) der Investition als Zuschuss gefördert. Die Quantifizierung der Kommunalrichtlinie konzentriert sich entsprechend auf den Teil der investiven Maßnahmen. Die Quantifizierung dieser Maßnahme

erfolgt bottom-up, basierend auf Parametern aus der Evaluation im Rahmen der NKI-Evaluierung und den vorgesehenen Fördermitteln. Für die hier betrachteten investiven Maßnahmen wird angenommen, dass die im Zeitraum von 2017-2019 durchschnittlich ausgezahlten Fördermittel in Höhe von rund 37 Mio. € pro Jahr auch für die Folgejahre fortgeschrieben werden können.

r) Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie

Diese Maßnahme aus dem Klimaschutzprogramm 2030 (Kap. 3.4.4.8 des Klimaschutzprogramms 2030) ist ein Förderprogramm im Bereich der Entwicklung, Demonstration und Markteinführung innovativer Klimaschutztechnologien in der Industrie. Für eine möglichst weitgehende Emissionsminderung im Industriesektor ist es nötig, gerade auch prozessbedingte Treibhausgasemissionen, die nach heutigem Stand der Technik nicht oder nur schwer vermeidbar sind, weitgehend oder ganz zu reduzieren. Zu diesem Zweck sollen zentrale Projekte im Bereich der emissionsintensiven Industrien mit prozessbedingten Emissionen gefördert werden. Diese sollen sowohl der anwendungsorientierten F&E als auch der Erprobung in industriellem Maßstab und breiten Markteinführung ausgereifter oder neuer Technologien dienen. Das Förderprogramm zur Dekarbonisierung in der Industrie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit ist zum 1. Januar 2021 in Kraft getreten. Umgesetzt wird das Förderprogramm vom Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI) mit Sitz in Cottbus. Für das Förderprogramm stehen bis 2024 rund 1,89 Mrd. aus dem Energie- und Klimafonds zur Verfügung.

s) Programm CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien

Der Schwerpunkt dieses im Klimaschutzprogramm 2030 enthaltenen Programms ist die Emissionsreduktion in der Grundstoffindustrie. Hauptziel ist es, zentrale Bausteine der Prozesskette im Bereich CO₂-Abscheidung, Speicherung und -Nutzung (Carbon Capture and Storage – CCS sowie Carbon Capture and Utilisation – CCU) in Richtung Marktreife weiter zu entwickeln und damit die notwendigen technischen Voraussetzungen zur dauerhaften Reduktion von prozessbedingten Treibhausgasemissionen industrieseitig zu schaffen. Das Programm befindet sich derzeit in Vorbereitung. Im EKF sind zwischen 2020 und 2024 Mittel in Höhe von rd. 500 Mio. € für das Förderprogramm vorgesehen.

t) EU-ETS-Innovationsfonds: Weiterentwicklung des NER300-Programms

Im Rahmen des EU-ETS besteht seit 2011 das sogenannte NER300-Programm, das Investitionen in innovative CO₂-arme Demonstrationsprojekte in der Energiewirtschaft fördert. Der Schwerpunkt der Förderung im NER300-Programm liegt auf innovativen Erneuerbare-Energien-Technologien sowie der Carbon Capture and Storage Technologie (CCS). Das bisherige Programm wurde nun weiterentwickelt und soll künftig auch – unter der Bezeichnung „Innovationsfonds“ – den Sektor Industrie umfassen. Der Innovationsfonds wird ab 2021 Teil des EU-ETS sein. Die Förderung soll von 2020 bis 2030 auch innovative CO₂-arme Produktionsprozesse mit Demonstrationscharakter in der Industrie inkl. umweltverträglicher Carbon Capture and Utilisation (CCU), die maßgeblich zur Eindämmung des Klimawandels beiträgt, innerhalb der EU anreizen. Die erste Ausschreibung des EU-Innovationsfonds wurde am 3. Juli 2020 von der Europäischen Kommission veröffentlicht. Diese Ausschreibung adressiert große Projekte mit einem Investitionsvolumen von mehr als 7,5 Mio. €.⁵⁰

u) Nationale Wasserstoffstrategie: CCfDs

Im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie (siehe Abschnitt 4.1) wurde u. a. ein Pilotprogramm für Carbon Contracts for Difference (CCfD) beschlossen, das sich zunächst auf die Stahl-, Ammoniak-,

⁵⁰ https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/innovfund/wp-call/wp_innovfund-2020_en.pdf

Zement- und Kalkindustrie mit prozessbedingten Emissionen beziehen soll. Mit den Klimaschutzverträgen sollen die höheren Betriebskosten von innovativen Klimaschutztechnologien über die Differenz zum CO₂-Preis abgesichert werden. Für das Pilotprogramm stehen von 2022 bis 2024 Mittel in Höhe von 550 Mio. € zur Verfügung. Dessen Wirkung wird im Sektor Industrie quantifiziert.

v) Nationale Wasserstoffstrategie: IPCEI

In der Nationalen Wasserstoffstrategie (siehe Abschnitt 4.1) ist u. a. die Schaffung eines neuen „Important Project of Common European Interest (IPCEI)“ für den Bereich Wasserstofftechnologien und -systeme enthalten. Dessen Wirkung wird im Sektor Industrie quantifiziert.

6.1.3.2 Flankierende Instrumente

Als flankierende Instrumente werden zum einen die in Abschnitt 4.4 beschriebenen begleitenden Maßnahmen berücksichtigt, soweit sie für die Sektoren Industrie und GHD – Strom relevant sind.

Dazu gehören von den dem MMS zugeordneten Maßnahmen insbesondere

- ▶ die LED-Leitmarktinitiative,
- ▶ die freiwillige Produktkennzeichnung für energierelevante Produkte sowie
- ▶ die Förderung von Contracting sowie
- ▶ Die Verbesserung der Rahmenbedingungen für Energiedienstleistungen.

Folgende sektorspezifische Instrumente werden ebenfalls als flankierend eingestuft:

w) Systematisches Klimamanagement in Unternehmen auf Grundlage von EMAS

Die Klimaziele der EU und das gestiegene Klimabewusstsein unterstreichen die Notwendigkeit eines Klimamanagements in Unternehmen, mit denen der Klimaschutz und die Klimarisiken systematisch in die Zuständigkeiten, Verfahren und Entscheidungen innerhalb der Unternehmen berücksichtigt werden können. Um sicherzustellen, dass ein solches Klimamanagement einen wirksamen Beitrag zu den Klimazielen leistet, eignet sich ein von Unternehmen und sonstigen Organisationen anwendbares und prüffähiges System, das die Mindestanforderungen an ein Klimamanagement festschreibt und auf den Prüf- und Registrierungsstrukturen von EMAS beruht, ohne ein vollständiges Umweltmanagementsystem vorauszusetzen. Ein solches prüffähiges Klimamanagement verbessert die Transparenz und Glaubwürdigkeit von Klimamaßnahmen von Unternehmen und fördert darüber hinaus die Voraussetzungen, um die Potenziale zur Treibhausgasminderung im Sektor Industrie und Gewerbe zu erschließen.

x) Öffentliche Beschaffung energieeffizienter Produkte

Die Bundesregierung hat im Rahmen ihrer Beschlüsse zur Energiewende vom 6. Juni 2011 die bereits im Energiekonzept vom 28. September 2010 enthaltene Ankündigung bestätigt, für die öffentliche Beschaffung hohe Energieeffizienzkriterien als ein wichtiges Kriterium bei der Vergabe öffentlicher Aufträge rechtlich verbindlich zu verankern. Dementsprechend wurde im Rahmen der Reform des Vergaberechts im April 2016 in die Vergabeverordnung mit § 67 eine Regelung aufgenommen, nach der grundsätzlich Produkte und Dienstleistungen beschafft werden, die im Hinblick auf ihre Energieeffizienz die höchsten Leistungsniveaus haben und zur höchsten Effizienzklasse gehören. Eine entsprechende Regelung findet sich seitdem auch in der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen. Ergänzt werden diese Regelungen durch die Allgemeinen Vorschriften zur Beschaffung energieeffizienter Leistungen (AVV EnEff), die für die öffentliche Beschaffung durch Dienststellen des Bundes noch weitere Vorgaben und Konkretisierungen enthalten.

y) KfW-Umweltprogramm, BMU-Umweltinnovationsprogramm zur Förderung von Demonstrationsvorhaben

Das KfW-Umweltprogramm bietet gewerblichen Unternehmen Kredite mit günstigem Zins für Investitionen in Umweltschutz und Nachhaltigkeit. Verschiedene Investitionen werden gefördert, darunter zählen zum Beispiel Maßnahmen in den Bereichen Material- und Ressourceneinsparung oder Abfallvermeidung, -behandlung und -verwertung. Mit dem Umweltinnovationsprogramm (UIP) des BMU werden Demonstrationsvorhaben durch Zuschüsse oder zinsverbilligte Kredite gefördert, die innovative, Umwelt entlastende Verfahren oder Verfahrenskombinationen in Deutschland erstmalig großtechnisch umsetzen. Ziel ist es, den Stand der Technik im Umweltschutz fortzuschreiben und eine möglichst große Multiplikatorwirkung zu erzielen.

z) Stärkung der Forschung für energieeffiziente und ressourcenschonende Industrieprozesse

Die Bundesregierung hat seit 2012 mehr als 215 Mio. € für die Projektförderung im Bereich Energieeffizienz in Industrie, Gewerbe, Handel und bei Dienstleistungen bereitgestellt. Vorhaben und Initiativen zu Forschung, Entwicklung und Demonstration für energieeffiziente und ressourcenschonende Anwendungen in der Industrie wie das Kopernikus-Projekt „SynErgie“ oder das Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe stärken die Position Deutschlands im internationalen Wettbewerb und tragen zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele bei. Eine Übersicht über die Forschungsförderung gibt der Bundesbericht Energieforschung.⁵¹

aa) Ressourceneffizienz und -substitution

Bei dieser Maßnahme aus dem Klimaschutzprogramm 2030 (Kap. 3.4.4.3) handelt es sich um eine flankierende Verankerung von Materialeffizienzthemen und nicht um eine dezidiert neue Maßnahme. Die Maßnahme baut auf den im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm genannten Handlungsansätzen auf. 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. Prioritäre Zielgruppe sind KMU. Im Energie- und Klimafonds sind zwischen 2020 und 2024 Mittel in Höhe von rd. 0,2 Mrd. € vorgesehen, die auch für die Folgejahre fortgeschrieben werden.

Die Maßnahme wird im Technologietransfer-Programm Leichtbau des BMWi (TTP LB) umgesetzt. Dort werden insbesondere FuE-Projekte mit Leichtbau-Bezug in folgenden Bereichen gefördert:

- ▶ Verfahren zur Einsparung von Ressourcen möglichst schon beim Design
- ▶ Entwicklung von Verfahren zur vermehrten Nutzung bionischer Strukturen
- ▶ die mehrmalige Verwendung von Ressourcen
- ▶ die Substitution treibhausgasintensiver Ressourcen

Für solche Projekte werden Haushaltsmittel in Höhe von 39 Mio. € p. a. aus dem EKF zur Verfügung gestellt. Das TTP LB ist im April 2020 gut an den Start gegangen. Aus dem ersten Skizzenstichtag am 1. Mai 2020 werden 19 Verbundprojekte mit mehr als 107 Projektbeteiligten zeitnah an den Start gehen. Es werden damit Fördermittel von insgesamt 31,6 Mio. € verteilt über die nächsten 3 Jahre abgerufen. Der nächste Stichtag zum 1. Oktober 2020 ist ähnlich gut nachgefragt.

⁵¹ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bundesbericht-energieforschung-2020.html>

bb) Neue Konstruktionstechniken und Werkstoffe für eine emissionsarme Industrie

Ziel der Maßnahme ist es, materialbezogene Treibhausgasminderungsoptionen zu erschließen und zu fördern. Die Maßnahme ist sehr breit angelegt und betrifft sowohl Materialeffizienz, Materialsubstitution als auch Produktdesign im Hinblick auf neue Konstruktionstechniken. Im Energie- und Klimafonds sind zwischen 2020 und 2024 Mittel in Höhe von rd. 150 Mio. € vorgesehen, die auch für die Folgejahre fortgeschrieben werden.

Die Maßnahme wird u. a. im Technologietransfer-Programm Leichtbau des BMWi (TTP LB) umgesetzt. Dort werden insbesondere FuE-Projekte mit Leichtbau-Bezug zu neuen Konstruktionstechniken und -verfahren und zu neuen Materialien gefördert. Dazu werden Haushaltsmittel in Höhe von 20 Mio. € im Jahr 2020 und in Höhe von 30 Mio. € ab 2021 aus dem EKF zur Verfügung gestellt. Aus dem ersten Skizzen-Stichtag am 1. Mai 2020 werden 24 Verbundprojekte mit mehr als 137 Projektbeteiligten zeitnah an den Start gehen. Es werden damit Fördermittel von insgesamt 49 Mio. € verteilt über die nächsten 3 Jahre abgerufen. Der nächste Stichtag zum 1. Oktober 2020 ist ähnlich gut nachgefragt.

cc) Verabschiedung Verpackungsgesetz und Novellierung Gewerbeabfallverordnung

2017 wurde das neue Verpackungsgesetz verabschiedet und die Gewerbeabfallverordnung novelliert. Beide Rechtsetzungsvorhaben sollen das Recycling weiter stärken.

Mit dem Verpackungsgesetz werden strengere Quotenvorgaben und ein konsequentes Konzept zu deren Überwachung und Weiterentwicklung eingeführt, was zu Steigerungen der Recyclingmengen an Kunststoffen und Metallen führen wird.

Ähnliche Effekte wird die neue Gewerbeabfallverordnung durch Vorgaben für eine striktere Getrennterfassung und die Sortierung und Verwertung von gemischten Gewerbeabfällen bewirken. Mehrere Studien zeigen, dass damit etwa eine Mio. t CO₂-Äq mehr eingespart werden können als bei der heutigen Praxis. Unterstützt wird diese Reduktion durch Maßnahmen zur Abfallvermeidung und Ressourcenschutz (z. B. Steigerung der Wiederverwendung), wie im nationalen Abfallvermeidungsprogramm und im Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) beschrieben.

Durch die Steigerung des Kunststoffrecyclings, werden außerdem die Treibhausgasemissionen aus Müllverbrennungsanlagen reduziert.

dd) Aufbau und Betrieb von kommunalen Energieeffizienznetzwerken

ee) Mit diesem Programm wird die Gewinnung von Teilnehmern an Energieeffizienznetzwerken von Kommunen, der Aufbau und Betrieb dieser Netzwerke unterstützt und begleitet sowie die Qualitätssicherung gewährleistet. Auf Erkenntnissen aus bereits durchgeführten Energieberatungen oder vorliegenden Klimaschutzplänen, wie sie im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative gefördert werden, kann bei der Durchführung der Netzwerke aufgebaut werden. Die zu Grunde liegende Richtlinie „Energieberatung und Energieeffizienz-Netzwerke für Kommunen und gemeinnützige Organisationen“ des BMWi wurde ab dem 1. Januar 2017 für die beiden Module umgesetzt. Energieeffizienz-Netzwerke von Kommunen und Energieanalysen für öffentliche Abwasseranlagen vom BMU übernommen und als „Kommunale Netzwerke Richtlinie“ im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative fortgeführt. Zudem wurde die Richtlinie um das Thema Ressourceneffizienz erweitert. Die „Kommunale Netzwerke Richtlinie“ wurde mittlerweile in die „Kommunalrichtlinie“ integriert.

ff) Förderung von „Energieeffizienzmanagern“ zur Hebung von Potenzialen z. B. in Gewerbegebieten

Die oben genannten Maßnahmen zielen vorrangig auf einzelne Betriebe ab. Überbetriebliche Synergieeffekte bleiben dabei ungenutzt. Durch eine Förderung von Energieeffizienzmanagern sollen ein-

zelbetriebliche sowie überbetriebliche Energieeffizienzpotenziale, beispielsweise in Gewerbegebieten, aufgedeckt und gemeinsam mit den beteiligten Betrieben gehoben werden. Energieeffizienzmanager sollen dazu die energieverbrauchsrelevanten Datengrundlagen der beteiligten Betriebe analysieren, zu nutzbaren Förderprogrammen beraten und wirtschaftliche Effizienzansätze aufzeigen sowie die konkrete Umsetzung von Maßnahmen unterstützen und begleiten. Eine Förderung solcher Energieeffizienzmanager ist im Rahmen der Kommunalrichtlinie (s.o.) als „Klimaschutzmanager“ sowie im Rahmen der Energetischen Stadtsanierung als „Sanierungsmanager“ (siehe Abschnitte 6.1.3.1 und 7.2.2.3) möglich.

gg) Initiativen zur Förderung der Ressourceneffizienz

Die VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE) hat die Aufgabe, Informationen zu Umwelttechnologien und material- und energieeffizienten Prozessen allgemeinverständlich aufzubereiten. Ziel ist es, vor allem kleine und mittlere Unternehmen bei der Steigerung ihrer Ressourceneffizienz zu unterstützen. Die Instrumente des VDI ZRE zur Bewertung und Darstellung von Ressourceneffizienzpotenzialen werden im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit erstellt. Das Netzwerk Ressourceneffizienz (NeRess) bündelt fachübergreifend und praxisorientiert Know-how und Erfahrungen zu ressourcenschonender Produktion, Produkten und Management und dient der gegenseitigen Information und Vernetzung unterschiedlichster Akteure aus Wirtschaft, Zivilgesellschaft, Politik und Verwaltung. Ein wesentlicher Treiber für Ressourceneffizienz ist die Schlüsseltechnologie Leichtbau. Sie basiert auf dem Prinzip der Gewichtseinsparung bei gleichzeitiger Verringerung des Energieeinsatzes und Senkung der Emissionen sowie Verbesserung der Funktionalität. Der Leichtbau ist ein wesentlicher Game Changer in energieintensiven Industrien und beim Ausbau der E-Mobilität. Durch die Gewichtsreduzierung von Baugruppen können die CO₂-Emissionen signifikant gesenkt und die Reichweite des Elektroautos erhöht werden. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie hat daher die Initiative Leichtbau ins Leben gerufen, die sich speziell mit Fragen des Leichtbaus beschäftigt und fördert mit dem Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB) konkrete marktnahe FuE-Vorhaben. Im Fokus stehen hier Leichtbauprojekte in den Bereichen Technologieentwicklung, CO₂-Einsparung und CO₂-Bindung durch neue Konstruktionstechniken und -materialien und durch Ressourceneffizienz und -substitution im Leichtbau.

hh) Flankierende Maßnahmen aus der EffSTRA

Im NAPE 2.0 werden folgende Maßnahmen zur Förderung der Energieeffizienz in Industrie und GHD genannt:

- ▶ Weiterentwicklung der Energieeffizienz-Netzwerke
- ▶ Effizienzanalyse-Tools für Energieaudits
- ▶ Förderung der Prozesswärmeeffizienz und der Nutzung von Abwärmepotenzialen

Qualifikationsoffensive für Energieberater beim effizienten Einsatz erneuerbarer Energien zur Prozesswärmebereitstellung

ii) r FONA - Forschung Für Nachhaltigkeit - Strategie des BMBF

Förderrichtlinie "r+ Impulse für industrielle Ressourceneffizienz": Im Rahmen des FONA 3 Programms wurden über diese Richtlinie 26 Forschungsprojekte mit einem Volumen von etwa 22 Millionen € gefördert, mit dem Ziel die Ressourceneffizienz in der industriellen Wertschöpfungskette zu verbessern.

„Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“

Carbon2Chem

Vermeidung von klimarelevanten Prozessemissionen in der Industrie" (Klim-Pro-Industrie)

6.1.4 Annahmen und Parameter

Im Folgenden sind je Instrument die wichtigsten Annahmen der Quantifizierung zusammengefasst. Die Quantifizierung der Instrumente r) bis v) erfolgt als Maßnahmenbündel und wird nicht instrumentenscharf ausgewiesen. Entsprechend werden für diese Maßnahmen auch Annahmen und Parameter für das gesamte Bündel dargestellt.

a) EU-ETS

Für die Quantifizierung der Wirkungen des EU-ETS stellen die Zertifikatspreise die zentrale Annahme dar (2020: 23 €/t CO₂, 2025: 25, 2030: 30, 2035: 40, 2040: 53, siehe Abschnitt 3.3). Die Preise verbessern im Modell die Wirtschaftlichkeit energieeffizienter Technologien und CO₂-armer Energieträger. Entsprechend gewinnen diese höheren Marktanteile und verbreiten sich schneller im Anlagenbestand.

Das Modell FORECAST ermöglicht aufgrund der prozessspezifischen Struktur die Berücksichtigung der Preise der Emissionszertifikate nur für Prozesse, die tatsächlich dem EU-ETS unterworfen sind. Eine Schwierigkeit bei der Modellierung ist dennoch die Abgrenzung der Unternehmen, die am EU-ETS teilnehmen. Die energieintensiven Prozesse wurden entsprechend Tabelle 37 dem Emissionshandel zugeordnet. Ausnahmeregeln, wie z. B. der Ausschluss von Papier- und Kartonfabriken mit einer jährlichen Kapazität unter 7.300 Tonnen Papier, können nicht berücksichtigt werden. Diese kleinen Anlagen fallen aufgrund des niedrigen Beitrags zu den gesamten Treibhausgasemissionen der Branche allerdings kaum ins Gewicht.

Tabelle 37: Zuordnung der energieintensiven Industrieprozesse und -produkte des Energiesystemmodells FORECAST zum Emissionshandel nach Sektoren

Prozess
Roheisen und Stahl
Direkte Reduktion, Elektrostahl – EAF, Oxygenstahl – Hochofen, Schmelzreduktion, Walzstahl
Zementklinker und Kalk
Gips, Kalkbrennen, Klinker Brennen (halbtrocken), Klinker Brennen (trocken), Ziegel
Nichteisenmetalle
Aluminium Gießereien, Aluminium Walzen, Aluminium primär, Aluminium sekundär, Aluminium Strangpressen, Kupfer primär, Kupfer sekundär, Kupferbearbeitung, Primärzink, Sekundärzink
Keramische Erzeugnisse durch Brennen
Feuerfestkeramik, Fliesen, Platten, Andere, Haushaltswaren, Sanitärkeramik, Technische Keramik
Glas einschließlich Glasfasern
Behälterglas, Flachglas, Glasfasern, Übriges Glas
Zellstoff, Papier und Pappe
Altpapierstoff, Holzstoff – Verfahren, Papier, Zellstoff – Verfahren

Chemische Produkte

Adipinsäure, Ammoniak, Ethylen, Industrieruß, Methanol, Polycarbonat, Polyethylen, Polypropylen, Salpetersäure, Soda

Andere

Zucker

Quelle: Fraunhofer ISI

Während einige industrielle Prozesse explizit dem EU-ETS unterworfen sind, werden andere Anlagen nur über die Gruppe der „Verbrennungsanlagen“ berücksichtigt. Diese umfasst sämtliche Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von mindestens 20 MW, unabhängig von der sektoralen Zugehörigkeit. Entsprechend wird im Modell FORECAST bei der industriellen Dampferzeugung der EU-ETS nur für Anlagen größer 20 MW berücksichtigt.

Der Einfluss des CO₂-Zertifikatspreises auf die Investitionsentscheidung der Unternehmen folgt somit einem Simulationsansatz, bei dem die Unternehmen nicht zwangsläufig optimieren, sondern stattdessen nach Amortisationszeit entscheiden oder aufgrund nicht monetärer Faktoren bei einer Ersatzinvestition wieder das gleiche System beschaffen. Es wird angenommen, dass Unternehmen den zukünftigen Preispfad nicht kennen und stattdessen bei der Investitionsbewertung von konstanten CO₂-Preisen ausgehen. Das bedeutet, eine Investition, die im Jahr 2030 getätigt wird, wird mit einem CO₂-Preis von 30 €/t CO₂ bewertet, entsprechend des CO₂-Preises im Jahr 2030 (siehe Abschnitt 3.3).

Mögliche Rückwirkungen des Zertifikatspreises auf Produktionsmengen, erhöhte Strompreise sowie dynamische Innovationseffekte werden in der Modellierung nicht berücksichtigt. Die ausgewiesene Wirkung basiert allein auf dem Einfluss des CO₂-Zertifikatspreises auf die Investitionsentscheidung der Unternehmen.

b) Energie- und Stromsteuer

Die Modellierung der im Rahmen der ökologischen Steuerreform eingeführten Strom- und erhöhten Energiebesteuerung erfolgt über eine Anpassung der im Modell hinterlegten Energiepreise. Dieser Ansatz ähnelt der oben beschriebenen Modellierung des EU-ETS.

Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass für bestimmte Industriezweige und Unternehmen im Rahmen der ökologischen Steuerreform Steuerbegünstigungen vorgesehen wurden bzw. diese in der Vergangenheit einen ermäßigten Steuersatz bezahlten. Diese Steuerbegünstigungen werden derzeit u. a. auf ihre Wirkung und Zielsetzung sowie Notwendigkeit evaluiert. Dennoch wird für die Modellierung mangels anderweitiger Informationen angenommen, dass die mittleren Steuersätze bis zum Jahr 2040 konstant bleiben.

Neben den im Folgenden beschriebenen Vergünstigungen durch den so genannten Spitzenausgleich und die allgemeine Vergünstigung der Stromsteuer, sind die in Tabelle 38 aufgeführten Prozesse direkt von der Energie- und Stromsteuer ausgenommen.

Die in Tabelle 43 und Tabelle 44 aufgeführte Wirkung enthält nicht die Effekte durch den so genannten Spitzenausgleich, welche wie im Folgenden beschrieben, separat quantifiziert werden.

Tabelle 38: Von der Strom- bzw. Energiesteuer vollständig entlastete Produktionsprozesse

Prozess	Stromsteuer	Energiesteuer
Thermische Abfall- oder Abluftbehandlung		x
Verwendung gleichzeitig zu Heizzwecken und zu anderen Zwecken als Heiz- oder Kraftstoff		x
Elektrolyse	x	
Herstellung von:		
Glas und Glaswaren	x	x
Keramischen Erzeugnissen	x	x
Keramischen Wand- und Bodenfliesen und -platten	x	x
Ziegeln	x	x
Sonstiger Baukeramik	x	x
Zement	x	x
Kalk	x	x
Gebanntem Gips	x	x
Erzeugnissen aus Beton, Zement und Gips	x	x
Keramisch gebundenen Schleifkörpern	x	x
Mineralischen Isoliermaterialien	x	x
Erzeugnissen aus mineralischen Isoliermaterialien	x	x
Katalysatorträgern aus mineralischen Stoffen	x	x
Waren aus Asphalt und bituminösen Erzeugnissen	x	x
Waren aus Graphit oder anderen Kohlenstoffen	x	x
Erzeugnissen aus Porenbetonherstellung	x	x
Prozesse der vorgenannten Erzeugnisse und Vorprodukte		
Trocknen	x	x
Kalzinieren	x	x
Brennen	x	x

Schmelzen	x	x
Erwärmen	x	x
Warmhalten	x	x
Entspannen	x	x
Tempern	x	x
Sintern	x	x
Metallerzeugung und -bearbeitung (nur Wärmestrom bzw. Energieerzeugnisse zum Verheizen)	x	x
Im Rahmen der Herstellung von Metall- zeugnissen für die:		
Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh-, und Stanzteilen	x	x
Gewalzten Ringen	x	x
Pulvermetallurgischen Erzeugnissen	x	x
Oberflächenveredlung und Wärmebe- handlung	x	x
Chemische Reduktionsverfahren	x	x

Quelle: Darstellung Fraunhofer ISI

c) CO₂-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme

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 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 Mengengrenzung gehandelt. Nach der Übergangsphase bis 2026, in dem ein Preiskorridor gilt Abschnitt 3.4), wird grundsätzlich von einer freien Preisbildung ausgegangen⁵².

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 Preisfad bis 2025. 2026 wird das obere Ende der Preisspanne angenommen. Bis 2040 steigt der Zertifikatepreis linear auf 275 €/t (nominal). Die nomi-

⁵² Der Vorbehalt eines über 2026 verlängerten Preiskorridors ist politisch vorgesehen.

nal angegebenen Werte werden für die Modellierung zum Inflationsausgleich an reale Preise angepasst. Es ergibt sich somit folgender Preispfad: 2021: 24, 2025:50, 2030: 109 2035: 165, 2040: 219 €₂₀₁₆/t CO₂ abgezinst.

- ▶ Anwendungsbereich: Entsprechend dem Ziel, Überschneidungen mit dem EU-ETS zu vermeiden, werden mit dem nEHS 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 vertreten⁵³. Dies betrifft 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 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 Kippbereiche 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

⁵³ 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.

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 bei Investitionen vom jeweiligen CO₂-Preis im Jahr der Investition ausgehen und nicht den zukünftigen Preis antizipieren (kein “perfect foresight” unterstellt). 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. Daher 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.

d) EEG-Umlagesenkung

Die Senkung der EEG-Umlage durch die Verwendung von Mitteln aus dem BEHG sowie durch die kurzfristige Deckelung für die Jahre 2020 und 2021 wird über die Preissensitivität des Energieverbrauchs quantifiziert. Dabei wird berücksichtigt, dass viele Industrieunternehmen bereits im MMS nur eine sehr niedrige EEG-Umlage bezahlen mussten und die mittlere EEG-Umlage des Industriesektors deutlich unterhalb der Regelumlage lag.

- e) Spitzenausgleich im Rahmen des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG) und Besondere Ausgleichsregelung (BesAR) des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)

Zur Quantifizierung der Einsparungen durch die verpflichtende Einführung von Energiemanagementsystemen (EMS) im Rahmen der Energie- und Stromsteuergesetze sowie der BesAR des EEG wird angenommen, dass die eingeführten Energiemanagementsysteme eine entsprechende Wirkung entfalten wie für vergleichbare Systeme in der Vergangenheit beobachtet wurde.⁵⁴

Tabelle 39 zeigt eine Übersicht der Voraussetzungen für Vergünstigungen nach BesAR und Spitzenausgleich. Wenngleich diese Tabelle viele Details nicht enthalten kann, so genügt sie, um die oben erwähnte Überschneidung beider Instrumente hinsichtlich des Geltungsbereichs zu illustrieren: Viele der stromintensiven Unternehmen erhalten sowohl den Spitzenausgleich als auch die anteilige Befreiung von der EEG-Umlage, wenn sie ein Energiemanagementsystem (EMS) einführen.

⁵⁴ Für den Projektionsbericht 2015 wurde für die Quantifizierung ein Ansatz gewählt, welcher auch das Effizienzziel des gesamten produzierenden Gewerbes einbezieht. In den aktuellen Berechnungen wird hingegen lediglich die Wirkung der Einführung der Energiemanagementsysteme berechnet, unabhängig vom Effizienzziel des gesamten produzierenden Gewerbes.

Da sich die eingeführten Managementsysteme aber nicht auf den betroffenen Energieverbrauch innerhalb des Unternehmens beschränkt, wird das EMS sobald ein Unternehmen von einer der Vergünstigungen profitiert, für das gesamte Unternehmen wirksam. Daher wirkt auch die BesAR nicht nur im Strom- sondern ebenfalls im Brennstoffbereich.

Tabelle 39: Überschneidungen bei der Wirkung der BesAR sowie des Spitzenausgleichs (grün: Entlastung gekoppelt an EMS; blau: Entlastung ohne Anforderung; orange: keine Entlastung; grau: keine Belastung); Mengenangaben für 2017

Segment ^[1]		Besondere Ausgleichsregelung der EEG-Umlage (BesAR)		Spitzenausgleich im EnergieStG und StromStG ^[4]
Strom >5 GWh/a	Prozesse ^[2]	Entlastung, wenn EMS und SKI > 14/17/20 % ^[3]	(102 TWh) ^[5]	Ausgenommen (~39 TWh)
	Keine Prozesse			Entlastung bis 90 %, wenn min. 1000 €/ a Stromsteuer und Netto-RV-Einsparung negativ sowie EMS eingeführt
Strom 1-5 GWh/a		Entlastung, wenn AS und SKI > 14/17/20 % ^[3]		
Strom < 1 GWh/a		Keine Privilegierung		123 TWh bekommen Spitzenausgleich
Brennstoffe	Keine Prozesse	-		88 TWh bekommen Spitzenausgleich
	Prozesse ^[2]	-		Ausgenommen (~102 TWh)

Anmerkung: EMS: Energiemanagementsystem oder EMAS; AS: Alternative Systeme; RV: Rentenversicherung; SKI: Stromkostenintensität

[1] Neben dem Produzierenden Gewerbe betreffen das EnergieStG und das StromStG auch die Land- und Forstwirtschaft und die BesAR auch den Stromverbrauch für Fahrtstrom von Schienenbahnen. Beides ist hier nicht berücksichtigt.

[2] Es ist theoretisch auch möglich, dass die Ausnahmen auf Basis einzelner Prozesse in Unternehmen mit weniger als 5 GWh jährlichem Stromverbrauch gewährt werden. Jedoch ist dieser Anteil vermutlich gering.

[3] Bei der Stromkostenintensität gelten nach EEG 2017 unterschiedliche Grenzwerte von 14 %, 17 % und 20 %

[4] Betroffener Energieverbrauch berechnet über Steuermindereinnahmen laut Subventionsbericht (BMF 2015);

[5] Privilegierter Letztverbrauch stromintensiver Unternehmen (§§64 und §§103 EEG 2017) (Klingler et al. 2018)

Für die Wirkungsabschätzung der Maßnahme wird auf die Evaluierung der Auditpflicht nach dem Energiedienstleistungs-Gesetz (EDL-G) (adelphi 2018) zurückgegriffen. Im Rahmen dieser Evaluierung wurde eine Stichprobe der nach EDL-G verpflichteten Unternehmen befragt.

Dabei wurden sowohl die im Rahmen der Audits und EMS ermittelten Potenziale als auch die umgesetzten Maßnahmen abgefragt. Die Einsparungen durch die Audits werden dabei dem EDL-G bzw. die Einsparungen durch die EMS dem Spitzenausgleich bzw. der BesAR zugerechnet.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass einige Unternehmen auch ohne Spitzenausgleich ein EMS eingeführt hätten. Die Wirkung des Spitzenausgleichs darf diese ohnehin umgesetzten EMS nicht berücksichtigen, wenngleich nicht bekannt ist, auf wie viele Unternehmen dies zutrifft. Für die Hochrechnung wurde davon ausgegangen, dass 10 % der Unternehmen, die ein EMS umgesetzt haben, dies auch ohne Spitzenausgleich gemacht hätten. Relativ gut schätzen lässt sich der Anteil des Produzierenden Gewerbes, der vom Spitzenausgleich profitiert. Laut Subventionsbericht (BMF 2015) der

Bundesregierung sind für das Jahr 2016 1,8 Mrd. € Steuermindereinnahmen aufgrund des Spitzenausgleichs zu verzeichnen, wovon 1,6 Mrd. auf den Stromverbrauch (§ 10 StromStG) und 0,2 Mrd. auf die Energieerzeugnisse entfallen (§ 55 EnergieStG). Die stromverbrauchenden Unternehmen erhalten im Mittel eine Vergünstigung von 14 € je MWh Strom.

Bei Berücksichtigung weiterer Überschneidungen mit Programmen zur Investitionsförderung sowie "sowieso"-Effekten durch Unternehmen, die auch ohne Spitzenausgleich ein EMS eingeführt hätten, ergibt sich eine Reduktion der Wirkung um etwa 28 % (20 % Überschneidungen andere Programme, 10 % Mitnahmeeffekte).⁵⁵

f) Energieberatung im Mittelstand

Die Modellierung des Instruments baut auf den beiden veröffentlichten Evaluationen des Programms auf (IREES und Fraunhofer ISI 2010, 2014; PWC 2018). Diese bieten eine umfassende empirische Grundlage für die Berechnung der Programmwirkung. Die getätigten Annahmen werden in diesem Abschnitt mit den Ergebnissen der neuen Evaluation verglichen.

Für die Projektion wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der Beratungen bei jährlich 1.500 konstant bleibt (Vergleich Projektionsbericht 2017: 6.000). Der angenommene Wert ist mit der in PWC (2018) angegebenen Anzahl abgeschlossener Förderungen in 2015 (1.407), 2016 (1.725) und 2017 (1.049) stimmig.

Bei der Einsparwirkung der Beratung werden die Mittelwerte der beiden Evaluationen fortgeschrieben. Die Stromeinsparung je Beratung beläuft sich demnach auf etwa 50 MWh/a und die Brennstoffeinsparung auf etwa 160 MWh/a. Es wird von einer mittleren Lebensdauer der umgesetzten Maßnahmen von 12 Jahren ausgegangen. Laut PWC (2018) liegen die mittleren jährlichen Einsparungen je Unternehmen zwischen 120 MWh/a (2017) und 170 MWh/a (2016), was etwas niedriger als die angenommenen Werte ist, jedoch insgesamt noch konsistent scheint.

Es wird weiterhin angenommen, dass die Wirkung des Programms gemessen in eingesparten Energiemengen zu 85 % auf die Industrie und zu 15 % auf den Sektor GHD entfällt. Bei Betrachtung der Anzahl der Unternehmen zeigt sich laut PWC (2018), dass der Großteil der Teilnehmer (46 %) im produzierenden Gewerbe tätig ist und dieser Anteil über die Jahre ansteigt. Da die Unternehmen des produzierenden Gewerbes einen um ein Vielfaches höheren Energiebedarf (und Energieeinsparungen) als Unternehmen aus Handel, Gastgewerbe und Dienstleistungen aufweisen, scheint die Annahme, dass 85 % der energetischen Wirkung auf die Industrie entfällt, realistisch.

Ein weiteres Kriterium, das langfristig die Wirkung des Beratungsprogramms eingrenzt, ist die Beschränkung auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Laut einer Auswertung des Statistischen Bundesamtes (Kless und Veldues 2008) machen KMU zwar ca. 97 % der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes aus. Sie stellen jedoch nur 45 % der Beschäftigten und erwirtschaften lediglich 23 % des Umsatzes. Betrachtet man die Anzahl der Beschäftigten bzw. den Umsatz als groben Indikator für den Anteil der KMU am industriellen Energieverbrauch, so können mit der Energieberatung Mittelstand maximal 23-45 % des gesamten Einsparpotenzials im Verarbeitenden Gewerbe erschlossen werden. Die „Energieberatung für Nichtwohngebäude von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen“ wurde mit der „Energieberatung im Mittelstand“ und der Contracting-Orientierungsberatung zu Januar 2021 im Förderprogramm „Energieberatung für Nichtwohngebäude, Anlagen und Systeme“ (EBN) zusammengelegt.

g) Mittelstandinitiative Energiewende und Klimaschutz

⁵⁵ Die einzelnen Reduktionsfaktoren sind dabei multiplikativ zu berücksichtigen (Summe Wechselwirkungen = 1-0,9*0,8).

Für die Wirkungsabschätzung der Maßnahme wird auf deren Evaluierung zurückgegriffen, die im Rahmen der Evaluierung des Energieeffizienzfonds erfolgte (Fraunhofer ISI et al. 2019). Diese Evaluierung stützt sich auf die Auswertung vorliegenden Materials von BMWi, BAFA, ZDH und den sieben beteiligten Handelskammern. Für die Quantifizierung der Einsparwirkungen mittels eines Bottom-up-Bewertungsansatzes wird außerdem auf Informationen zum Energieverbrauch in den von der MIE adressierten Branchen aus der Erhebung zum Energieverbrauch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) (Fraunhofer ISI et al. 2015) sowie zur mittleren Energieeinsparung bei verschiedenen Energieeffizienzmaßnahmen aus der Evaluierung eines vergleichbaren Programms (IREES und Fraunhofer ISI 2014) zurückgegriffen. Das Ergebnis der Evaluierung sind dieser Maßnahme zugeschriebene jährliche Energieeinsparungen, die je zur Hälfte auf Strom und Brennstoffe entfallen. Für die Abschätzung der Gesamtwirkung der Initiative wird angenommen, dass die Fördereffizienz für den vom BMU geförderten Teil der Mittelstandsinitiative derjenigen entspricht, die in der Evaluierung für den BMWi-Teil ermittelt wurde. Bei den in der Evaluierung ermittelten Einsparungen handelt es sich dabei grundsätzlich bereits um Nettoeinsparungen. Denn bei der Bottom-up Ermittlung der Einsparungen wurden bereits Überschneidungseffekte mit anderen Maßnahmen berücksichtigt. Mitnahme- und Vorzieheffekte wurden im Rahmen der Evaluierung nicht explizit untersucht, da keine direkte Befragung der Fördernehmer vorgenommen wurde. Sie spielen jedoch wegen der ausschließlichen Beratungsfunktion des Programms auch keine signifikante Rolle.

h) Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie

Für die Quantifizierung der Wirkung werden die folgenden Annahmen getroffen. Die EU-Ökodesign-Richtlinie fördert vorwiegend produktbezogene Effizienzverbesserungen und lässt Verbesserungen des Gesamtsystems außer Acht. So gibt eine Mindestanforderung zum Wirkungsgrad von Pumpen keine Anreize zu Verbesserungen des Gesamtsystems, in das die Pumpe eingebunden ist. Es wird für die Berechnung davon ausgegangen, dass die Anforderungen befolgt werden. Die Anforderungen werden auf Ebene der einzelnen Produktgruppen quantifiziert.

Die Modellierung im MMS richtet sich nach den umgesetzten Durchführungsmaßnahmen der Lose (bzw. den Verordnungen). Es werden demnach nur Lose modelliert, für die zum Stichtag 30.9.2020 bereits Verordnungen in Kraft getreten sind. Für die Industrie sind die folgenden Lose betroffen:

- ▶ Los 1: Boiler und Kombiboiler (Verordnung VO 813/2013)
- ▶ Los 8: Bürobeleuchtung (Verordnung VO 245/2009, Änderung 347/2010)
- ▶ Los 9: Straßenbeleuchtung (Verordnung VO 245/2009, Änderung 347/2010)
- ▶ Los 11: Elektromotoren (Verordnung VO 640/2009, Änderung 4/2014)
- ▶ Los 11: Umwälzpumpen (Verordnung VO 641/2009, Änderung 622/2012)
- ▶ Los 11: Ventilatoren (Verordnung VO 327/2011)
- ▶ Los 11: Wasserpumpen (Verordnung VO 547/2012)
- ▶ ENTR Los 1 Kühl- und Gefriergeräte
- ▶ Los 6 (ENTR) Klima- und Lüftungsanlagen > 12 kW (VO 1253/2014)

Von diesen Losen ist zu erwarten, dass sie deutliche Auswirkungen auf den industriellen Energieverbrauch haben werden. Darüber hinaus sind weitere Verordnungen in Kraft getreten, die zwar den Industriesektor nicht explizit ausschließen, jedoch in ihrer Wirkung vorwiegend auf den GHD-Sektor oder die Haushalte abzielen und in der Industrie vermutlich nur eine marginale Wirkung haben werden. Diese Lose werden hier nicht berücksichtigt. Für eine umfassende Beschreibung der Methodik wird auf Fleiter et al. (2015) verwiesen.

i) Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit

Die Wirkungsabschätzung bezieht sich auf Maßnahmen, die ab 2021 bis 2030 implementiert werden und bezieht Maßnahmen aus den Vorgängerprogrammen nicht mit ein. Die Prognose basiert auf den Bottom-up Evaluationen der Vorgängerprogramme, aus denen dieses Programm hervorgegangen ist. Sie wurden im Rahmen der Evaluierung des Energieeffizienzfonds (Fraunhofer ISI et al. 2019) bis zum Jahr 2017 evaluiert. Für die beiden Vorgängerprogramme Querschnittstechnologien und Abwärme wurde zudem eine Bottom-up Quantifizierung für das Jahr 2018 durchgeführt. Weiterhin wurden die Evaluationen der Förderung von erneuerbarer Prozesswärme im Marktanreizprogramm aus den Jahren 2015 bis 2017 von Fichtner et al. (2019) für dieses Fördermodul zugrunde gelegt.

Neben einer Fortschreibung der Evaluationsergebnisse aus den Bottom-up Evaluationen der Vorgängerprogramme wird in der Wirkungsabschätzung ein Wachstumseffekt in Höhe von 10 % durch den Abbau von Hemmnissen durch die besser geordnete Förderlandschaft einberechnet. Dies ergibt sich aus Hemmnisanalysen verschiedener früherer Evaluationen. Neben diesem Effekt auf Programmgesamtebene ist ein Wachstum des Programms zu erwarten, da Fördersätze (größtenteils nach oben) angepasst wurden und die Fördermodule zu Synergieeffekten miteinander führen. Entsprechende Anpassungen der erwarteten Einsparungen wurden fördergegenstandsspezifisch eingerechnet. Das Abwärmeprogramm hat zum Programmende ein sehr starkes Wachstum erfahren. Dieser Effekt fließt ebenso in die Berechnung ein.

j) Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke

Im Jahr 2020 wurde die bisherige Vereinbarung für die Energieeffizienznetzwerke verlängert und der Fokus auf Klimaschutz erweitert.

Basis der Wirkungsabschätzung ist das Monitoring der Initiative Energieeffizienznetzwerke in dessen Rahmen jährlich die umgesetzten Maßnahmen bei den abgeschlossenen Netzwerken erhoben werden. Es handelt sich dabei um ein Monitoring, bei dem keine weiteren Informationen erhoben werden, die auf Mitnahme und Überschneidungseffekte schließen lassen.

Eine Bereinigung der Bruttowerte und damit eine Darstellung derjenigen Einsparungen, für die das Programm ursächlich ist (Nettowerte) erfolgt auf Basis der Evaluation eines Vorläuferprogramms zur Initiative Energieeffizienznetzwerke, den 30 Pilot-Netzwerken⁵⁶. Ein wesentliches Ergebnis der Evaluation ist, dass die Netzwerkunternehmen im Pilotprogramm ihren Effizienzfortschritt gegenüber dem Durchschnitt der Unternehmen verdoppeln konnten. Daraus lässt sich umgekehrt ableiten, dass die Hälfte der in den Unternehmen durchgeführten Effizienzmaßnahmen auch ohne Teilnahme an der Initiative erfolgt wäre. Die zusätzliche Wirkung der Netzwerke wird daher mit knapp 50 % der im Monitoring beobachteten Wirkung angesetzt. Dieser Wert beinhaltet sowohl Mitnahmeeffekte als auch Wechselwirkungen mit anderen Instrumenten, da diese auch in der Vergleichsgruppe (dem Industriedurchschnitt) bereits berücksichtigt sind.

⁵⁶ <http://www.30pilot-netzwerke.de/archiv/nw-de/content/Materialien/index.html>

Für die Einsparwirkungen wird davon ausgegangen, dass 70 % der erzielten Endenergieeinsparungen Brennstoffeinsparungen sind und die verbleibenden 30 % Stromeinsparungen. Die Lebensdauer der Maßnahmen wird basierend auf dem Mix der in der bisherigen Initiative durchgeführten Maßnahmen mit 8 Jahren angenommen⁵⁷.

k) Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft - Förderwettbewerb

Die Wirkungsabschätzung basiert auf der Evaluation der Vorgängerrichtlinie sowie Programmen mit vergleichbaren Förderzwecken.

Hinsichtlich der durch das neue Programm umgesetzten Maßnahmen wird davon ausgegangen, dass systemische Lösungen den größten Anteil ausmachen (50 % der Investitionen), gefolgt von Prozesswärme/-kälte (jeweils 15 %) sowie elektrischen Antrieben (Motoren, Druckluft und Pumpenantriebe) und Informations- und Kommunikationstechnik (je 5 %).

l) Pilotprogramm Einsparzähler

Die Bewertung erfolgt anhand einer Fördereffizienz verknüpft mit den geplanten Fördervolumina. Die Förderhöhe wird durch das Programm vorgegeben. Für zusätzliche Maßnahmen kann dieser Betrag erhöht werden. Die Abschätzung der Einsparwirkung basiert darauf aufbauend auf einem angenommenen Maßnahmenmix strombasierter Maßnahmen (bspw. Weiße Ware, Beleuchtung, Lüftung, Motorsysteme etc.).

m) Energieauditpflicht für Nicht-KMU (Umsetzung Art. 8 EED)

Die Berechnung der Wirkung einer Energieauditpflicht für Nicht-KMU setzt zunächst voraus, dass die unter diese Regelung fallenden Unternehmen identifiziert werden können und ihr Energieverbrauch geschätzt werden kann. Dies stellt eine große Herausforderung dar, da die Energiebilanz zum einen keinerlei Informationen zu den Größenklassen der Unternehmen aufweist und zum anderen vielfältige Überschneidungen mit anderen Programmen berücksichtigt werden müssen. So sind Unternehmen, welche bereits ein Energiemanagementsystem umgesetzt haben, von dieser Regelung ausgenommen (dies kann im Rahmen des Spitzenausgleichs oder der Besonderen Ausgleichsregelung geschehen sein).

Die Projektion der Maßnahmenwirkung beruht auf den zur Ausarbeitung des *NAPE* (Fraunhofer ISI et al. 2014), des *Aktionsprogramms Klimaschutz 2020* (Öko-Institut und ISI 2018) sowie der Evaluation (IREES und adelphi 2017) getroffenen Annahmen. Demnach sind in Deutschland etwa 50.000 Unternehmen betroffen, was bei einem Vierjahreszyklus für die Audits bedeutet, dass jedes Jahr 12.500 Audits durchgeführt werden müssen. Wengleich die Audits nicht gleichmäßig über die vier Jahre verteilt durchgeführt werden, so wird dies in dem genutzten vereinfachten Modell dennoch unterstellt. In Fraunhofer ISI et al. (2014) wird davon ausgegangen, dass ein Audit etwa 1,5 % des Energieverbrauchs eines Unternehmens einspart, wenn alle Maßnahmen umgesetzt würden. In IREES und adelphi (2017) wird eine mittlere Einsparung durch Audits von etwa 4 % des Energieverbrauchs aller Unternehmen angegeben (inkl. Dienstleistungssektor). Zum Vergleich, für die Energieberatung Mittelstand wurde eine Einsparung von 5 % je Audit berechnet (Fleiter et al. 2012b). Diese gilt für KMU und bei Berücksichtigung von Maßnahmen, die für die spätere Umsetzung zurückgestellt wurden. Ohne diese Maßnahmen läge die Einsparung bei lediglich 3 %. Geht man davon aus, dass einzelne Audits in Großunternehmen typischerweise nur einen Teil des Energieverbrauchs adressieren, scheinen 1,5 % Einsparungen durchaus realistisch.

⁵⁷ Die Netzwerke selbst bestehen in der Regel nur zwei bis drei Jahre, während die Lebensdauer der während der aktiven Netzwerkphase durchgeführten Maßnahmen deutlich darüber hinaus geht und nach den bisherigen Erfahrungen bei durchschnittlich rund 8 Jahren liegt.

Diese Brutto-Wirkung wird um Mitnahmeeffekte sowie Überschneidungseffekte mit anderen Programmen korrigiert. Laut Evaluation (IREES und adelphi 2017) hätten 6 % der Unternehmen auch ohne Pflicht einen Audit durchgeführt und 17 % mit Einschränkungen. Es wird entsprechend im Mittel davon ausgegangen, dass 10 % der Audits auch ohne Pflicht durchgeführt worden wären. Weiterhin wird die Brutto-Wirkung um 30 % reduziert, um Überschneidungen mit anderen Programmen zu korrigieren, wie z. B. den Anreizen zur Einführung eines EMS im Rahmen von Spitzenausgleich und BesAr.

Laut Fraunhofer ISI et al. (2014) entfallen etwa 1.500 PJ Endenergieverbrauch auf Unternehmen, welche verpflichtet sind, ein regelmäßiges Audit durchzuführen. Hiervon entfallen 30 % auf den Sektor GHD und 70 % auf die Industrie.

n) KfW-Energieeffizienzprogramm

Die genutzten Kennwerte beruhen auf einer entsprechenden Evaluation (Prognos 2014). Es wird nur der Bereich der nicht-gebäudebezogenen Investitionen berücksichtigt. Dies sind z. B. Investitionen in Maschinenpark und Querschnittstechniken. Ausgehend von einer Darlehenssumme von etwa 1 Mrd. € in 2012 (für diesen Bereich) wird von einem Anstieg auf 2,5 Mrd. € bis 2019 und danach von einem konstanten Verlauf ausgegangen. Für die Fördereffizienz wird eine jährliche Energieeinsparung von 0,0022 PJ/€ unterstellt. Ein Großteil der Investitionen adressiert den Brennstoffbedarf (~80 %) und es wird eine Lebensdauer von 13 Jahren unterstellt.

Es wird von erheblichen Überschneidungen mit anderen Programmen wie der Energieberatung Mittelstand ausgegangen (~30 %). Des Weiteren werden die Einsparungen um weitere 30 % reduziert, um mögliche Mitnahmeeffekte zu berücksichtigen. Hierzu sind allerdings keine empirischen Informationen verfügbar.

o) Maßnahmenbündel: Markteinführung CO₂-armer Verfahren

Maßnahmen, welche die Markteinführung sowie Forschung und Entwicklung CO₂-armer Verfahren fördern werden aufgrund ihrer starken Überschneidungen hinsichtlich der geförderten Technologien als Maßnahmenbündel quantifiziert. D.h. die Wirkung der Maßnahmen wird für das gesamte Bündel ausgewiesen, aber nicht für einzelne Maßnahmen. Das Maßnahmenbündel besteht aus den folgenden Programmen:

- ▶ r) EU-ETS-Innovationsfonds: Weiterentwicklung des NER300-Programms
- ▶ s) Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie
- ▶ t) Programm CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien
- ▶ u) Wasserstoffstrategie: Pilotprogramm Klimaschutzverträge nach CCfD
- ▶ v) Wasserstoffstrategie: IPCEI

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 für nicht vermeidbare Emissionen förderfähig. Die Maßnahmen der Wasserstoffstrategie sind besonders auf den Umbau und Betrieb von CO₂-neutralen Herstellungsverfahren ausgerichtet, die Wasserstoff als Rohstoff oder Energieträger nutzen.

Das angenommene verfügbare Förderbudget der Maßnahmen sind in Tabelle 40 zusammengefasst. Da der Modellierungszeitraum bis zum Jahr 2040 deutlich über die aktuell beschlossenen Budgets hinausgeht, mussten entsprechende Annahmen getroffen werden. Für alle Maßnahmen wird davon ausgegangen, dass diese über den gesamten Modellierungszeitraum bis zum Jahr 2040 weitergeführt werden. Die jährlichen Budgets werden nach der Anlaufphase auf einem konstanten Niveau festgelegt. Entsprechend dieser Annahmen sind in Summe jährlich etwa 1,2 Mrd. € verfügbar. Diese summieren sich bis zum Jahr 2030 auf knapp 12 Mrd. €. Im Einzelnen sind folgende Annahmen für die verfügbaren Förderbudgets der einzelnen Maßnahmen getroffen.

- ▶ Für das **Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie** wird ab 2022 von jährlich 500 Mio. € verfügbaren Mitteln ausgegangen. Diese Werte sind mit dem BMU abgestimmt und entsprechen in der Größenordnung der Finanzplanung des Energie- und Klimaschutzfonds. Wenngleich das Programm nach derzeitigem Stand eine Laufzeit bis zum Jahr 2030 haben soll, wird für die Quantifizierung von einer Fortschreibung bis 2040 ausgegangen, um Vergleichbarkeit mit anderen Instrumenten herzustellen.
- ▶ Für das "**Programm CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien**" sind im Energie- und Klimafonds bis zum Jahr 2025 etwa 500 Mio. € vorgesehen. Diese Summe wurde in Absprache mit dem BMWi auf die einzelnen Jahre verteilt. Wenngleich das Programm nach derzeitigem Stand lediglich bis zum Jahr 2025 laufen soll, wird für die Quantifizierung von einer Fortschreibung bis 2040 ausgegangen, um Vergleichbarkeit mit anderen Instrumenten herzustellen.
- ▶ Beim **EU-ETS Innovationsfonds** wird von insgesamt 11 Mrd. € Fördermittel ausgegangen. Auf Deutschland entfallen hiervon (anteilig anhand der Bevölkerung) 16 % (1,76 Mrd. €). Ferner wird davon ausgegangen, dass etwa die Hälfte der geförderten Projekte den Industriesektor adressieren. Verteilt bis 2030 ergibt sich daraus ein jährliches Budget von 80 Mio. € (ab 2021). Entsprechend EUA-Preis und in Deutschland umgesetzten Projekten kann das Förderbudget natürlich abweichen.
- ▶ Für das **Pilotprogramm CCfDs im Rahmen der Wasserstoffstrategie** sind laut mehrjähriger Finanzplanung bisher folgende Zahlen zugrunde gelegt. 2022: 150 Mio. €, 2023: 200 Mio. €, 2024: 200 Mio. €). Ein Aufwuchs dieser Mittel ist vorgesehen. Vor dem Hintergrund der großen Unsicherheiten bei der Fortschreibung der verfügbaren Mittel bis zum Jahr 2040 und der Mittelverwendung wird von einem Budget von 550 Mio. € bis 2023 für die Berechnung des Maßnahmenbündels als realistische Größenordnung ausgegangen. In den Folgejahren wird das jährliche Budget auf konstantem Niveau gehalten.
- ▶ Die Förderung des **IPCEI im Rahmen der Wasserstoffstrategie** sind bis zum Jahr 2026 etwa 1,5 Mrd. € für die Finanzierung von Projekten im Industriesektor vorgesehen. Diese werden gleichmäßig auf die einzelnen Jahre verteilt.

Tabelle 40: Annahmen zur Budget-Fortschreibung der Programme zur Förderung der Markteinführung CO₂-armer Herstellungsverfahren (Mio. €₂₀₂₀)

Programm	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030	Summe 2020- 2030	2040	Summe 2020- 2040
Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie	80	310	500	500	500	500	500	4.890	500	9.890
CO ₂ -Vermeidung und -Nutzung	-	120	120	100	80	80	80	900	80	1.700
Innovationsfonds (EU ETS)	-	80	80	80	80	80	80	800	80	1.600
Wasserstoffstrategie: Pilot CCfDs	-	-	250	300	300	300	300	2.650	300	5.650
Wasserstoffstrategie: IPCEI	-	250	250	250	250	250	250	2.500	250	5.000
Summe	80	760	1.200	1.230	1.210	1.210	1.210	11.740	1.210	23.840

Quelle: Annahmen Fraunhofer ISI in Abstimmung mit BMU und BMWi

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 nicht ausgeschöpft.

Im Folgenden wird beschrieben, wie die mögliche Vermeidungswirkung des Maßnahmenbündels bei den oben gegebenen Förderbudgets berechnet wird. Im Grundsatz folgt der Ansatz der Quantifizierung des Klimaschutzprogramms 2030 (Öko-Institut et al. 2020), enthält jedoch Aktualisierungen entsprechend neuer verfügbarer Informationen. 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 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 Treibhausgasminde- rungspotenzial. 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. Aufbauend auf diesen Annahmen wurde dann im Modell FORECAST die Auswirkung auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen berechnet.

In FORECAST wird dieses Maßnahmenbündel durch die Einführung CO₂-armer Produktionsverfahren für Methanol (wasserstoffbasiert), Glasschmelze (vollelektrisch), direktreduziertes Eisen (wasserstoffbasiert) sowie CCS und CCU bei Zement und Kalk 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 41 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. Für die Investitionen wird von 350 €/t Kapazität⁵⁸ ausgegangen (davon etwa 150 €/t Kapazität Differenz zu konventionellen Technologien). Die für die CCU-Anwendung notwendige Senke (Verwender) von CO₂ ist in diesem Szenario die wasserstoffbasierte Methanolerzeugung (1. Zeile in Tabelle 41)⁵⁹.

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 sehr eingeschränkt der Fall. Wirtschaftliche Konzepte für den Betrieb von CCU stehen also zunächst weiterhin vor einer Herausforderung nachhaltiger Nutzungsoptionen. 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 potenziell die Rekarbonisierung von CO₂ im Zement/Beton. Für die Übergangszeit kann auch die inländische Herstellung von PtG/PtL eine relevante Verwendung für das abgeschiedene CO₂ sein, solange es mit PtL noch möglich ist fossile Brennstoffe zu ersetzen bzw. langfristig, falls der CO₂-Kreislauf geschlossen werden kann. In einer zukünftig CO₂-neutralen Wirtschaft kann CCU aus fossilem CO₂ nur zu einer CO₂-Reduktion führen, wenn der CO₂-Kreislauf geschlossen wird oder die Lebensdauer der Produkte, in denen das CO₂ gebunden ist, sehr lang ist (z. B. CO₂-Bindung im Beton).

Bei allen Verfahren wird für die Berechnung der nötigen Investitionssummen davon ausgegangen, dass die Vollkosten⁶⁰ der Anlagen zu tragen sind. Es wird ferner angenommen, dass etwa 50 % der Investitionskosten gefördert werden. D.h. zusätzlich zum bereitgestellten Budget der öffentlichen Hand wird die gleiche Summe aus anderen Quellen zur Verfügung gestellt. Dieser Fördersatz entspricht möglicherweise nicht der tatsächlichen Ausgestaltung der einzelnen 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 Bezuschussung von bis zu 60 % der förderfähigen Kosten (sowohl Kapital- als auch Betriebskosten; siehe Agora Energiewende und Wuppertal

⁵⁸ Kuramochi et al. 2012, CEMCAP 2018.

⁵⁹ Aus einer Tonne CO₂ können, stöchiometrisch auf Basis des Kohlenstoffgehaltes gerechnet, 0,73 Tonnen Methanol hergestellt werden.

⁶⁰ 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.

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 (siehe Tabelle 41) getroffen⁶¹. Inbegriffen sind dabei notwendige Investitionen in Nebenanlagen (allerdings nicht Elektrolyseure zur Wasserstofferzeugung; deren Investitionen sind im Wasserstoffpreis berücksichtigt). Nicht berücksichtigt sind zu vermutende zusätzliche Investitionen in Strom- und Wasserstoffinfrastruktur sowie etwaige Infrastruktur für Transport und Speicherung von CO₂⁶². Daraus ergeben sich bis zum Jahr 2030 kumulierte Kosten von 3,4 Mrd. € für Investitionen und 4,1 Mrd. € für laufende Kosten. Bis zum Jahr 2040 nimmt die Bedeutung der laufenden Kosten im Vergleich zu den Investitionen deutlich zu und steigt auf 18,9 Mrd. € (ggü. 6,7 Mrd. € für Investitionen). Bei Annahme einer Förderquote von im Mittel 40% für Investitionen (dies wurde unterschiedlich je Programm angenommen), ist die unterstellte Entwicklung mit den Programmbudgets umsetzbar. Sie verlangt allerdings eine Umverteilung auf die Förderung von laufenden Kosten und geht besonders zum Ende des Zeitraums von einer nahezu vollständigen Ausschöpfung aus.

Tabelle 41: Kennwerte für die Quantifizierung des Programmbündels für die Markteinführung CO₂-armer Verfahren

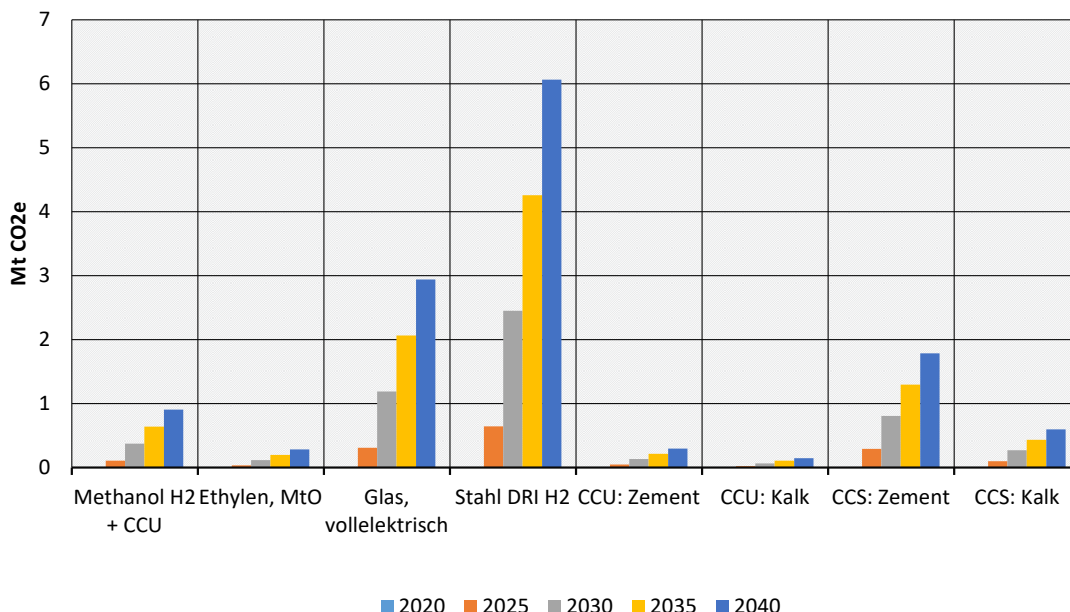
Referenzprozess	CO ₂ -armer Prozess	Spez. Investition (€/t Kap.)	Quellen	Kapazität 2030 (Mio. t)	Kapazität 2040 (Mio. t)	Investitionssumme 2020-2030 (Mrd. €)	laufende Kosten (Differenz) Summe 2020-2030 (Mrd. €)
Methanol erdgasbasiert	Methanol H ₂	470	[1]	0,37	0,9	0,25	0,76
Glasschmelze Gasbrenner	Voll-elektrisch,	571	[2]	1,19	2,94	0,98	0,06
Hochofen	DRI H ₂	415	[3]	2,45	6,01	1,47	2,58
Zementherstellung	CCS/CCU	350	[4]	0,94	2,08	0,45	0,12
Kalkherstellung	CCS/CCU	350	[4]	0,34	0,74	0,16	0,04
Ethylen, fossil	Ethylen,	300	[1]	0,12	0,28	0,05	0,57
Summe						3,36	4,11

⁶¹ Zwischen Mittelbereitstellung und Realisierung der Einsparung ist eine Verzögerung von 3 Jahren berücksichtigt, die den Verzug zwischen Projektbeginn und Inbetriebnahme abbilden soll.

⁶² 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.

- 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)

Abbildung 20: Resultierende Diffusion CO₂-armer Verfahren bis zum Jahr 2040



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

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-Zertifikatspreise des EU-ETS die Finanzierungslücke bei den Betriebskosten mindern. Im Zeitraum bis 2030 ist jedoch noch nicht davon auszugehen, dass der CO₂-Preis ausreichend hoch sein wird (Annahme hier: 30 €/t CO₂). Dies genügt für die meisten CO₂-armen Verfahren nicht, um die höheren Betriebskosten zu decken. Derzeit sind nur das Pilotprogramm zu den CO₂-Differenzverträgen im Rahmen der Wasserstoffstrategie sowie zum Teil der EU-Innovationsfonds auf die Förderung von laufenden Kosten ausgelegt. Für die Modellierung der Maßnahmen wurde die Trennung der Programmbudgets in Investition und Betrieb aufgehoben und die Mittel nach Bedarf (also stark auf Betriebskostenseite) zugeteilt.

Aus den Annahmen zu CO₂-Preis und Energieträgerpreisen⁶³ sowie den angenommenen Kapazitäten aller Verfahren ergibt sich eine Finanzierungslücke bei den Betriebskosten in der Größenordnung von 3 bis 4 Mrd. € bis 2030 und 18,9 Mrd. € bis 2040. 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

⁶³ Im Mittel 2020-2030 für Strom 11,1 €/GJ, für Kohle 4,2 €/GJ, für Erdgas 6 €/GJ und für grünen Wasserstoff 30 €/GJ (inklusive annuierte Investition des Elektrolyseurs). 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).

auszugehen, dass in industriellem Maßstab wirtschaftlich produziert werden kann. Insbesondere bedeutet die übliche lange Lebensdauer von Anlagen der Grundstoffindustrie, dass auch die bis 2030 modellierten Investitionen nur bei langfristiger Perspektive (nach 2030) zur Deckung der Betriebskosten plausibel erwartet werden können.

6.1.5 Ergebnisse

6.1.5.1 Bewertung der Einzelmaßnahmen

Die im Sektor Industrie quantifizierten Maßnahmen sind in Tabelle 42 aufgelistet und kurz beschrieben. Einige dieser Maßnahmen entfalten auch Wirkung im Sektor GHD. Sie werden daher dort wieder aufgegriffen (siehe Abschnitt 7.4). Maßnahmen, die nur im GHD-Sektor wirken, werden nur dort behandelt. Eine ausführliche Beschreibung der Maßnahmen in den Sektoren Industrie und GHD ist Abschnitt 6.1.3 zu entnehmen. Dort werden auch die flankierenden Instrumente beschrieben, die zwar Einfluss auf die Entwicklung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen haben, denen aber keine eigenständige Wirkung zugeschrieben werden kann.

Tabelle 42 Übersicht der Maßnahmen in den Sektoren Industrie (IND) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) im MMS

Maßnahme	Typ	Sektor	Beschreibung/Ziele (Wirkungsbereich)	Umsetzungsstand (Wirkungsbeginn)
EU-Emissionshandel	E	IND	Handel mit Emissionszertifikaten (Cap and trade). Betrifft energieintensive Industrie.	Wirkung berechnet ab 2010
Energie- und Stromsteuer	E	IND GHD	Steuer auf Strom und weitere Energieträger (viele Industrieprozesse sind ausgenommen bzw. erhalten Vergünstigungen)	Wirkung berechnet ab 2010
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme	E	IND	CO ₂ -Preis im Nicht-ETS Sektor	2021
EEG-Umlagesenkung	E	IND GHD	Senkung/Deckelung der EEG-Umlage mit den Mitteln aus dem nationalen Emissionshandel	2021
Spitzenausgleich im Rahmen des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG)	V	IND	Vergünstigungen bei der Strom- und Energiesteuer sind geknüpft an Energiemanagementsysteme und Selbstverpflichtung der Industrie zum Effizienzfortschritt.	Wirkung berechnet ab 2010
Besondere Ausgleichsregelung (BesAR) des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)	F	IND	Vergünstigungen bei der EEG-Umlage durch die Einführung von Energiemanagementsystemen	In Kraft seit 2008
Energieberatung im Mittelstand	F	IND GHD	Koppelung von bezuschusster Energieberatung mit zinsgünstigen Investitionskrediten für Maßnahmenumsetzung. Zielgruppe: KMU	In Kraft seit 2008

Mittelstandinitiative Energiewende und Klimaschutz	I	IND GHD	Unterstützung von kleinen und mittelständischen Unternehmen aus Handwerk und Industrie beim Thema Energieeffizienz und Klimaschutz	Seit 2013
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie	R	IND GHD	Mindeststandards für energieverbrauchende Produkte auf Basis der Durchführungsmaßnahme bzw. niedrigste Lebenszykluskosten	Umsetzung schrittweise 2010-2014
Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit	F	IND GHD	Förderung von Energieeffizienz- und Klimaschutztechnologien	In Kraft seit 2019 (Neuorganisation früherer Fördermaßnahmen)
Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke	V	IND GHD	Etablierung von Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerken	Seit 2014
Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft - Förderwettbewerb	E	IND GHD	Wettbewerbliches Verfahren zur aktors- und technologieoffenen Umsetzung von Energieeffizienzprojekten in Unternehmen.	Seit 2019 (Weiterentwicklung des 2016 eingeführten Programms „STEP up!“)
Pilotprogramm Einsparzähler	F	IND GHD	Förderung innovativer digitaler Systeme und darauf aufbauender Geschäftsmodelle für die Energiewende	2016
Energieauditpflicht für Nicht-KMU (Umsetzung Art. 8 EED)	R	IND GHD	Verpflichtende Energieaudits für Nicht-KMU (Umsetzung Artikel 8 Energieeffizienzrichtlinie)	In Kraft seit 2015
KfW-Energieeffizienzprogramm	F	IND GHD	Zinsgünstige Darlehen für die Investition in Energieeffizienzmaßnahmen	Wirkung berechnet ab 2012
Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie	F	IND	Förderung von Investitionen im Bereich der energieintensiven Industrien, die zum Ziel haben, Treibhausgasemissionen, die nach heutigem Stand der Technik nicht oder nur schwer vermeidbar sind, möglichst weitgehend und dauerhaft zu reduzieren.	2021
Programm CO ₂ -Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien	F	IND	Förderung von innovativen Projekten zur CO ₂ -Minderung in der Grundstoffindustrie mit Schwerpunkt CCS und CCU auf industriellem Niveau.	2021
EU-ETS-Innovationsfonds: Weiterentwicklung des NER300-Programms	F	IND	Weiterentwicklung des bestehenden NER300 Programms der EU. Umbenennung in Innovationsfonds und Förderfähigkeit nun auch für innovative CO ₂ -arme Herstellungsverfahren im Industriesektor	2021

Nationale Wasserstoffstrategie: Pilot CO ₂ -Differenzverträge	F	IND	CO ₂ -Differenzverträge (Carbon Contracts for Difference: CcFDs) ermöglichen die Markteinführung CO ₂ -armer Schlüsseltechniken, indem sie die Mehrkosten ggü. fossilen Verfahren kompensieren.	2022
Nationale Wasserstoffstrategie: IPCEI	F	IND	Investitionsförderung für den großskaligen Einsatz von Wasserstoff zur CO ₂ -neutralen industriellen Produktion	2021

Quelle: Darstellung 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 somit die Nettowirkung der Maßnahmen.

Die Stromeinsparungen im MMS (Tabelle 43) teilen sich auf insgesamt 18 Maßnahmen auf, von denen ein Teil als Bündel ausgewiesen wird. 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. Detaillierte 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 Energie- und Klimaschutznetzwerke und die Energieaudits zeigen bis 2040 eine deutliche Einsparwirkung.

Andere Maßnahmen führen zu einem erhöhten Stromverbrauch, indem sie durch Preise auf fossile Energieträger (EU-ETS und BEHG) oder die Förderung einzelner Technologien die Elektrifizierung der Prozesswärme und damit den Wechsel von fossilen Energien hin zu Strom beschleunigen.

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 43: Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im MMS - Stromeinsparungen

Maßnahme	Strom-Einsparungen					
	2015	2020	2025	2030	2035	2040
	TWh					
EU-ETS	0,0	0,0	-0,8	-1,3	-1,7	-2,1
Energie- und Stromsteuer		0,4	0,8	1,2	1,6	1,8
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme	0,0	0,0	-0,2	-0,6	-1,1	-1,6
EEG-Umlagen senkung	0,0	0,0	-0,8	-1,4	-1,7	-1,6
Spitzenausgleich und Besondere Ausgleichsregelung (BesAR)	2,1	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Energieberatung Mittelstand	0,9	1,2	0,7	0,7	0,7	0,7
Mittelstandinitiative Energiewende und Klimaschutz	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie	3,2	4,5	4,9	4,3	3,8	3,2
Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit	0,0	1,9	4,0	4,6	4,6	4,6
Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke	0,4	1,7	2,9	3,3	3,3	3,3
Bundesförderung für	0,0	0,2	0,5	0,7	0,7	0,7

Energieeffizienz in der Wirtschaft – Förderwettbewerb						
Pilotprogramm Einsparzähler		0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Energieauditpflicht für Nicht-KMU	0,2	1,4	2,5	2,7	2,7	2,7
KfW-Effizienzprogramm	0,2	0,8	1,4	1,8	1,8	1,8
Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie						
Programm CO ₂ -Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien						
EU-ETS-Innovationsfonds: Weiterentwicklung des NER300-Programms	0,0	0,0	-0,4	-2,2	-4,3	-6,3
Nationale Wasserstoffstrategie: Pilot CO ₂ -Differenzverträge						
Nationale Wasserstoffstrategie: IPCEI						
Summe	7,1	15,7	19,2	17,5	14,1	10,9

* 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.

Bei den Brennstoffeinsparungen zeigt sich ein heterogenes Bild (Tabelle 44). Hier entfällt ein Großteil der Wirkung auf die Maßnahmen Emissionshandel, Spitzenausgleich, Effizienz- und Klimaschutz-

netzwerke, Energieaudits und das KfW-Effizienzprogramm sowie die Programme zur Markteinführung CO₂-armer Verfahren. Bei den anderen Maßnahmen steht der Strombedarf im Mittelpunkt. Bei europäischem und nationalem Emissionshandel sowie den Programmen zur Markteinführung CO₂-armer Verfahren 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 44: Wirkung der Maßnahmen im Sektor Industrie im MMS – Einsparungen von Brennstoffen und CO₂-Emissionen

Maßnahme	Brennstoff-Einsparungen						Vermeidung von CO ₂ -Emissionen					
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2015	2020	2025	2030	2035	2040
	PJ/a						Mio. t CO ₂ -Äq./a					
EU-Emissionshandel	0,0	0,0	6,9	13,1	19,4	21,7	0,0	0,0	3,5	5,2	6,8	8,5
Energie- und Stromsteuer		1,5	2	2,7	3,1	3,5		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme	0,0	0,0	4,0	10,4	17,0	22,7	0,0	0,0	1,0	2,4	3,6	4,7
EEG-Umlagesenkung	0,0	0,0	0,9	0,5	0,8	0,6	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
Spitzenausgleich und Besondere Ausgleichsregelung (BesAR)	17,2	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	2,1	3,4	2,9	2,3	1,8	1,3
Energieberatung Mittelstand	10,3	13,4	8,1	7,6	7,6	7,6	1,2	1,6	0,8	0,6	0,5	0,3
Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz	0,2	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie	0,1	0,8	1,1	1,1	0,6	0,5	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
Bundesförderung für Energieeffizienz in der	-	10,6	37,6	59,3	59,3	59,3	-	1,3	3,8	4,8	3,8	2,7

Wirtschaft – Zu- schuss und Kre- dit												
Energieeffizienz- und Klima- schutznetzwerke	3,7	13,9	24,1	27,8	27,8	27,8	0,7	2,5	3,6	3,4	2,7	1,9
Bundesförde- rung für Energie- effizienz in der Wirtschaft – För- derwettbewerb	-	-	2,8	5,0	5,0	5,0	-	-	0,3	0,4	0,3	0,2
Energieaudit- pflicht für Nicht- KMU	1,7	10,0	18,3	19,9	19,9	19,9	0,2	1,2	1,8	1,6	1,3	0,9
KfW-Effizienz- programm	2,8	9,8	17,8	22,0	22,6	22,6	0,3	1,2	1,8	1,8	1,4	1,0
Förderpro- gramm Dekarbo- nisierung in der Industrie												
Programm CO ₂ - Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffin- dustrien												
EU-ETS-Innovati- onsfonds: Wei- terentwicklung des NER300-Pro- gramms	0,0	0,0	4,9	21,2	37,0	51,8	0,0	0,0	1,0	5,1	9,4	13,6
Nationale Was- serstoffstrategie: Pilot CO ₂ -Diffe- renzverträge												
Nationale Was- serstoffstrategie: IPCEI												
Summe	36,0	89,3	158,0	220,1	249,6	272,5	4,5	11,6	21,0	28,1	32,1	35,5

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

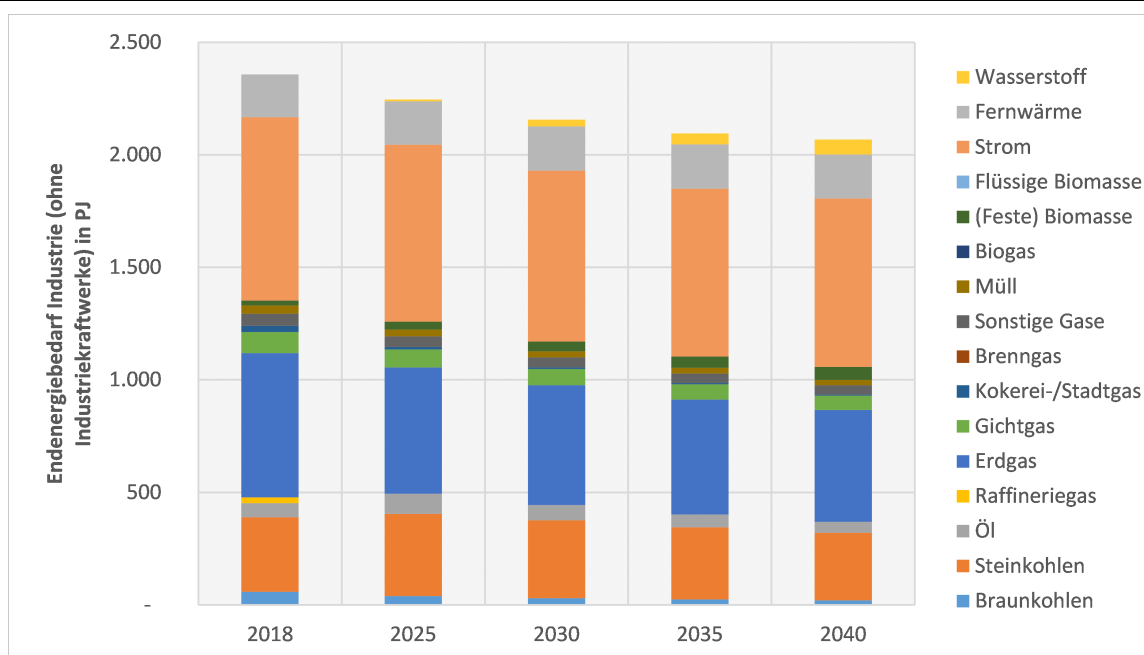
6.1.5.2 Entwicklung des Energieverbrauchs

Im Folgenden ist die Entwicklung des Energieeinsatzes im Industriesektor dargestellt, abzüglich des Energieeinsatzes in Industriekraftwerken (siehe hierzu Abschnitt 6.2). Diese Darstellung folgt der eingesetzten Modellstruktur, da Industriekraftwerke als Teil des Umwandlungssektors modelliert werden. Abbildung 21 und Tabelle 45 zeigen die resultierende Entwicklung des Energieeinsatz im Industriesektor ohne Industriekraftwerke. Die Entwicklung ist auf die Berichterstattung entsprechend ZSE im Jahr 2018 kalibriert.

Der Energieeinsatz sinkt relativ kontinuierlich von 2.360 PJ im Jahr 2018 auf 2.070 PJ im Jahr 2040. Dies entspricht einer Minderung um etwa 12 %. Dieser Rückgang ist vorwiegend auf eine Stagnation bei der Produktion energieintensiver Produkte bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung zurückzuführen. Die Auswirkungen des Corona-bedingten Wirtschaftseinbruches in 2020/2021 sind in der Darstellung der Stützjahre nicht sichtbar, da eine vollständige Erholung auf den "alten" Wachstumspfad angenommen wurde (siehe hierzu die Annahmen zur Wirtschaftsentwicklung in Abschnitt 3.1.2).

Auch bei der Entwicklung der einzelnen Energieträger zeigt sich ein eher kontinuierlicher Verlauf. Dennoch sind bestimmte Trends zu beobachten. Der Anteil von Erdgas nimmt leicht ab und sinkt bis 2030 von 27 % auf 24 %. Der Anteil von Strom am Energieeinsatz bleibt in etwa konstant bei gut 35 %. Hier wird eine leichte Elektrifizierung der Prozesswärme durch den Fortschritt bei der Energieeffizienz überkompensiert. Die Potenziale der Elektrifizierung werden bei weitem nicht ausgeschöpft, da der CO₂-Preis nicht genügt, um Strom gegenüber Erdgas als Energieträger für die Prozesswärme wettbewerbsfähig zu machen. Entsprechend findet Elektrifizierung nur dort statt, wo Förderprogramme ansetzen. Große Wachstumsraten, allerdings auf niedrigem Niveau, zeigen Biomasse und Wasserstoff. 2040 machen beide Energieträger jeweils 3 % des Energieeinsatzes aus. Wasserstoff wird größtenteils für die Stahlherstellung über das DRI-Verfahren genutzt und in kleineren Mengen auch stofflich für die Methanolherstellung. Insgesamt bleibt die Endenergienachfrage strukturell damit nahezu unverändert.

Abbildung 21: Einsatz von Energieträgern im Industriesektor (exkl. Industriekraftwerke), kalibriert auf die nationale Emissionsberichterstattung



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Tabelle 45: Einsatz von Energieträgern im Industriesektor (exkl. Industriekraftwerke), kalibriert auf die nationale Emissionsberichterstattung

Energieträger	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Braunkohlen	58	39	30	24	20
Steinkohlen	332	366	347	321	300
Öl	62	88	68	57	50
Raffineriegas	27	-	-	-	-
Erdgas	640	562	532	510	496
Gichtgas	94	80	73	68	64
Kokerei-/Stadtgas	27	11	6	5	5
Brenngas	-	-	-	-	-
Sonstige Gase	54	48	45	43	42
Abfall	37	30	27	25	23
Biogas	-	-	-	-	-
Feste Biomasse	22	35	43	50	58
Flüssige Biomasse	-	-	-	-	-
Strom	814	786	759	746	748
Fernwärme	191	193	198	196	195
Wasserstoff	-	8	29	48	67
Summe	2.358	2.246	2.156	2.095	2.069
<i>Änderung ggü. 2018</i>	0 %	-5 %	-9 %	-11 %	-12 %

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

6.1.5.3 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie ohne Industriekraftwerke/KWK sinken im MMS bis 2030 um 9,4 Mio. t CO₂-Äq gegenüber 2018. Maßgeblich hierfür sind sowohl in Verlauf als auch Größenordnung die CO₂-Emissionen. Diese Entwicklung wird durch einen verstärkten Biomasse-Einsatz und einer damit einhergehenden Minderung der Erdgasnutzung getrieben. In geringem Umfang wird auch Strom für Prozesswärme verstärkt eingesetzt.

Als große, vergleichsweise inflexible Emissionsblöcke bleiben die Nutzung von Kohlen (und kohlebaasierte Energieträger) in der Stahlherstellung auf vergleichbarem Niveau, wobei einem leichtem Koks- und Gichtgasrückgang ein Anstieg der Steinkohlenutzung gegenübersteht (hier besteht eine gewisse Flexibilität). Die unterstellte Einführung von wasserstoffbasierter Direktreduktion bis 2030

(~2,5 Mio. t CO₂-Äq, 2040: 6 Mio. t CO₂-Äq) führt in diesem Sektor zu einer Treibhausgasminderung, die mit etwa 4 Mio. t CO₂-Äq (2040: 10 Mio. t CO₂-Äq) abgeschätzt werden kann. Im Chemiesektor tragen die Einführung innovativer Verfahren der Methanol- und – darauf aufbauend – Olefinproduktion aufgrund ihrer geringen realisierten Marktdurchdringung nur geringfügig (2030: ~0,3 Mio. t CO₂-Äq, 2040: ~0,7 Mio. t CO₂-Äq) zur Minderung bei. In der Kalk- und Zementproduktion bewirken CCU (die wasserstoffbasierte Chemie unterstützend), maßgeblicher aber CCS-Projekte zur Minderung bei (2030: 0,2 Mio. t CO₂-Äq CCU, 0,8 Mio. t CO₂-Äq CCS; 2040: 0,4 Mio. t CO₂-Äq CCU, 1,9 Mio. t CO₂-Äq CCS).

In anderen Sektoren ist der Trend zur geringeren Nutzung von fossilen Brennstoffen über alle Energieträger hinweg deutlicher, was sich besonders auf den im Jahr 2018 maßgeblichen Energieträger Erdgas auswirkt (-18 % bis 2030, -28 % bis 2040). Die beobachteten Treibhausgasminderungen werden dort überwiegend durch die veränderte Bereitstellung von Prozesswärme (Dampferzeugung, Industrieöfen) realisiert. Dies wird durch CO₂-Bepreisung unterstützt, ergibt sich aber auch aus den angenommenen Preispfaden für Erdgas und Biomasse. Für Biomasse wurde keine Potentialgrenze angenommen, ihre Nutzung in der Industrie steigt deutlich gegenüber 2018 (22 PJ) in MMS bis 2040 (58 PJ).

In Summe tragen die Minderungen in dieser Teilmenge anteilig nicht genug zur Erreichung des Sektorziels der Industrie für 2030 (49 - 51 % Minderung gegenüber 1990) bei. Große verbleibende energiebedingte CO₂-Quellen sind Erdgas, Kohle und Gichtgas.

Tabelle 46: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie (ohne Industriekraftwerke) zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO₂-Äq						
CO₂-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	116,6	74,0	72,6				
MMS				69,3	63,2	58,1	54,2
CH₄-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,2	0,1	0,1				
MMS				0,1	0,1	0,1	0,1
N₂O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,8	0,4	0,4				
MMS				0,5	0,4	0,4	0,4
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018	117,6	74,6	73,1				
MMS				69,9	63,7	58,6	54,7
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018		-36,6	-37,8				
MMS				-40,6	-45,8	-50,2	-53,5

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Summe CO₂+CH₄+N₂O	Veränderung ab 2005 in %						
Entwicklung 1990 – 2018			-1,9				
MMS				-6,2	-14,5	-21,4	-26,6

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), 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

6.2 Industriekraftwerke

6.2.1 Methodik

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

- a) CRF 1.A.1.a Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung beinhaltet alle öffentlichen Kraftwerke,
- b) CRF 1.A.b Mineralölraffinerien beinhaltet Raffineriekraftwerke
- c) CRF 1.A.1.c Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger beinhaltet sonstige Kraftwerke der Energiewirtschaft
- d) 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. Die Aufteilung erfolgt dabei brennstoffscharf, sodass sich entsprechende Verschiebungen zwischen einzelnen Brennstoffen, wie beispielsweise ein Wechsel von Kohle auf Grund von höheren CO₂-Preisen hin zu Erdgas, nicht nur bei den öffentlichen Kraftwerken, sondern auch bei allen vier Kraftwerkskategorien entsprechend der Bedeutung der jeweiligen Brennstoffe auswirken können. Die entscheidende Nebenbedingung für die Industriekraftwerke ist, dass die im Industriemodell FORECAST berechnete Wärme-Eigenerzeugung aus KWK-Anlagen gedeckt wird.

6.2.2 Maßnahmen

Siehe die Maßnahmen für Stromerzeugung und gekoppelte Wärmeerzeugung in der Energiewirtschaft (Abschnitt 5.1.2).

6.2.3 Annahmen und Parameter

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. Für die Steigerung des Biomasseeinsatzes und Einsatzes von Abfall wurden entsprechende Parameter aus dem FORECAST abgeleitet. Des Weiteren wirken sich die Maßnahmen im Kraftwerkssektor (Abschnitt 5.1), auch auf die Brennstoffeinsätze der Industriekraftwerke aus.

Tabelle 47: Parameter der Industriekraftwerke im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2018-2040

	Einheit	2018	2025	2030	2035	2040
KWK-Wärmeerzeugung in IKW	PJ	332	297	275	265	264
Gichtgaseinsatz in IKW	PJ	72	67	63	60	58
<i>Zusätzlicher</i> Biomasseeinsatz Wärmescheibe KWK	PJ	0	10	20	26	35

Quelle: Modellierung Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Aufgrund des gewählten Modellierungsansatzes sind individuelle Kraftwerkskapazitäten der Industrie kein relevanter Parameter und sind daher hier nicht angegeben.

6.2.4 Ergebnisse

Die im Mit-Maßnahmen-Szenario projizierte Entwicklung der Brennstoffeinsätze der Industriekraftwerke ist in Tabelle 48 dargestellt. Der Rückgang der Brennstoffeinsätze um knapp 19 % bis 2030 und um 21 % bis 2040 ist im Wesentlichen durch eine rückläufige KWK-Wärmeerzeugung determiniert (Tabelle 48).

Tabelle 48: Brennstoffeinsatz in Industriekraftwerken im Mit-Maßnahmen-Szenario, 2018-2040

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Braunkohlen	27	18	9	7	0
Steinkohlen	52	34	23	0	0
Öl	33	22	15	12	13
Raffineriegas	11	10	9	8	6
Erdgas	379	339	302	303	349
Gichtgas	72	68	63	60	58
Kokerei-/Stadtgas	29	19	13	11	18
Sonstige Gase	10	10	10	10	10
Abfall (fossil)	50	47	41	36	32
Biogas	2	1	1	1	1
Feste Biomasse inkl. biogener Abfall	138	151	165	172	145
Flüssige Biomasse	1	1	0	0	0
Industriekraftwerke gesamt	802	720	653	619	631
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-10,2 %</i>	<i>-18,6 %</i>	<i>-22,8 %</i>	<i>-21,3 %</i>

Quelle: Brennstoffe: 2018: (UBA 2020a, 2020c), 2025-2040: Modellrechnungen des Öko-Institut

Der Kohleausstieg führt dazu, dass nach 2033 keine Steinkohle und nach 2038 keine Braunkohle mehr in Industriekraftwerken genutzt wird. Der Einsatz von Erdgas sinkt zunächst, erreicht aber Anfang der 2030er Jahre ein Plateau, um dann bis 2040 wieder deutlich anzusteigen. Der Einsatz fester Biomasse steigt bis 2035 an; 2040 liegt er knapp über dem Niveau von 2018. Ein wesentlicher Grund für den Anstieg bei Erdgas und Biomasse ist, dass der Rückgang von Kohlen, Sondergasen (Gichtgas, Kokereigas, sonstige Gase) und Abfall kompensiert werden muss. Biogas und flüssige Biomasse spielen nur eine sehr untergeordnete Rolle.

Zu den Emissionen der Industriekraftwerken siehe auch Tabelle 21 in Abschnitt 5.1.4.3.

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

6.3.1 Methodik

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

Die detaillierteste Berechnung von Prozessemissionen erfolgt im Bereich der Eisen- und Stahlindustrie mit einer besonderen Bedeutung der Primärstahlerzeugung über die Hochofenroute. Ausgehend von den Brennstoffeinsätzen in Hochöfen und den Produktionsmengen werden die gesamten entstehenden Emissionen in Anlehnung an die Methodik im Nationalen Treibhausgasinventar bestimmt, wobei sie in energiebedingte Emissionen (CRF 1.A.2) und prozessbedingte Emissionen (CRF 2.C.1) aufgeteilt werden.

Mit einem grundsätzlich vergleichbaren Ansatz werden die prozessbedingten Emissionen der chemischen und mineralischen Industrie berechnet. Die industriellen Prozesse zur Herstellung der dort relevanten Produkte (Zementklinker, Kalk, Flach-, Behälter- und sonstiges Glas, Keramikprodukte, Ammoniak, Salpeter- und Adipinsäure, Carbid, Industrieruß und Soda) werden endogen im Modell FORECAST mit aktuellen und fortgeschriebenen Produktionsmengen belegt. Über stöchiometrische oder literaturbasiert beobachtete Emissionsfaktoren werden absolute Emissionsmengen berechnet.

Für die meisten weiteren (sehr relevanten) Quellbereiche ist die Fortschreibung der Entwicklung über Annahmen zur Entwicklung der Produktionsniveaus entsprechend Tabelle 35 für eindeutig identifizierbare Produkte bzw. Produktgruppen unter der Annahme konstanter Emissionsfaktoren möglich. Für nicht in Tabelle 35 aufgeführte Prozesse wurden – sofern vorhanden – alternative Aktivitätsdaten verwendet.

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 Emissionsraten – in die Zukunft fortgeschrieben. Andernfalls wurden die Aktivitätsraten und die Emissionen in den Szenarien auf dem Niveau von 2018 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.

6.3.2 Maßnahmen

a) EU-Emissionshandel* (siehe auch Abschnitt 4.1 zu übergreifenden Instrumenten)

Der EU-ETS erfasst auch CO₂-Emissionen aus Industrieprozessen (z. B. Zement- oder Kalkherstellung). Anfang 2013 wurden die N₂O-Emissionen der Adipin- und Salpetersäureproduktion sowie der Herstellung von Glyoxal und Glyoxylsäure in den EU-Emissionshandel einbezogen.

b) Maßnahmen zur Markteinführung CO₂-armer Verfahren aus dem Klimaschutzprogramm 2030

Die folgenden, bereits für die Industrie beschriebenen Maßnahmen aus dem Klimaschutzprogramm 2030 haben auch Wirkung auf den Bereich der Industrieprozesse und Produktverwendung und werden daher auch hier berücksichtigt:

- ▶ EU-ETS Innovationsfonds
- ▶ Nationales Dekarbonisierungsprogramm

► Förderprogramm: CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien

Darüber hinaus gibt es keine weiteren Maßnahmen, die direkt auf die CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen aus Industrieprozessen abzielen.

6.3.3 Annahmen und Parameter

Für die Eisen- und Stahlindustrie gehen die Brennstoffeinsätze in Hochöfen (v.a. Steinkohle, aber auch Mineralölprodukte und Braunkohle) und die entstehenden Kuppelgase (Gichtgas) und andererseits die Produktionsmengen an Primärstahl in das Modell ein.

Für die prozessbedingten Emissionen der chemischen und mineralischen Industrie werden strukturelle Veränderungen der Produktion infolge der untersuchten Maßnahmen (hier insbesondere wasserstoffbasierte Ammoniakherstellung) abgebildet. Abweichungen der Modellergebnisse von historisch dokumentierten Werten im Nationalen Treibhausgasinventar werden auf das Jahr 2018 skaliert (Abweichungen betragen in Summe <4 %).

Die N₂O-Emissionen aus der Produktverwendung wurden auf dem Niveau des Jahres 2018 fortgeschrieben.

6.3.4 Ergebnisse

6.3.4.1 Emissionsentwicklung nach Quellgruppen

In der Vergangenheit sanken die Kohlendioxid-, Methan- und Lachgasemissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung bereits um rund 39 % von 81,4 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 1990 auf 49,9 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2018 (Tabelle 49). Bis 2040 werden diese Emissionen im MMS auf 40,3 Mio. t CO₂-Äq und somit um rund 51 % gegenüber dem Jahr 1990 sinken.

Die mineralische Industrie (CRF 2.A) konnte ihre Emissionen in der Vergangenheit um 17 % von 23,5 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 1990 auf 19,6 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2018 senken. Mit Abstand wichtigste Emissionsquelle ist hier die Zementklinkerproduktion (13,2 Mio. t CO₂-Äq) gefolgt von der Kalkherstellung (4,8 Mio. t CO₂-Äq). Glas- und Keramikherstellung haben im Vergleich dazu eine untergeordnete Bedeutung (1,5 Mio. t CO₂-Äq).

Bis zum Jahr 2040 verbleiben die Emissionen der Zementindustrie auf etwa gleichbleibendem Niveau (rund 13 Mio. t CO₂-Äq), was maßgeblich auf die Annahme einer relativ konstant bleibenden Produktionsmenge von Zementklinker zurückzuführen ist. Spezifische Reduktionen der Emissionsfaktoren, die einen Rückgang der prozessbedingten Emissionen aus dieser Quelle bedingen könnten, sind in diesem Szenario nicht aufgenommen. Dazu gehört die Nutzung neuer Bindemittel, die insbesondere die Nutzung des Rohstoffs Kalkstein reduzieren könnten. Aufgrund der geringen Verbreitung und Marktreife sowie verschiedener Markteintrittshürden, sind robuste Abschätzungen zur möglichen Diffusion und damit der Minderungswirkungen schwierig und daher hier nicht unternommen worden. Nachgelagerte Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz insbesondere im Bau-sektor können hier einen starken Einfluss haben (Le Don et al. 2020), sind aber im hier betrachteten Maßnahmenbündel nicht enthalten. Der Produktion in der Zement- und Kalkindustrie nachgelagert (als sekundäre Emissionsvermeidung) wirken die angenommenen CCU- und CCS-Techniken. Während der Einsatz von CCU (Bereitstellung von Kohlenstoff für die Produktion von wasserstoffbasiertem Methanol) die Emissionen der mineralischen Industrie nicht senkt – die Minderung wird in der Chemieindustrie verbucht und die mineralische Industrie weiterhin als Verursacher der Emissionen angenommen – reduziert die Nutzung von CCS die Emissionen 2030 um 0,82 Mio. t. Davon entfallen (nach den Annahmen in 6.1.4) zwei Drittel (0,55 Mio. t) auf Zement und ein Drittel (0,27 Mio. t) auf

Kalk. Bis 2040 erhöhen sich diese Mengen auf 1,30 Mio. t und 0,65 Mio. t. Diese Werte sind in Tabelle 49 bereits enthalten.

Für prozessbedingte Emissionen aus der Keramikherstellung sind ebenso keine Minderungshebel inkludiert. Optionen wären Rohstoffwechsel und Abscheidetechnologien, beide haben für diese Anwendung unklare Eigenschaften. Die Emissionen verbleiben damit bis 2040 auf dem Niveau von 2018 (0,6 Mio. t CO₂-Äq).

Die Glasherstellung wird in diesem Szenario teilweise auf elektrische Verfahren umgestellt, die allgemein Emissionen (Staub), zu geringem Anteil auch prozessbedingte Treibhausgasemissionen (durch gesteigerte Materialeffizienz und das Binden von F-Gasen) reduzieren können. Die Hauptwirkung besteht aber in der Substitution von Erdgas, was sich lediglich in den energiebedingten Emissionen niederschlägt. Damit verringern sich die modellierten Treibhausgasemissionen der Glasherstellung von 0,9 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2018 auf 0,8 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2040.

Im Jahr 1990 hatte die chemische Industrie (CRF 2.B) mit 29,8 Mio. t CO₂-Äq den größten Anteil an den CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung. Bis zum Jahr 2018 konnten diese Emissionen um 78 % auf 6,6 Mio. t CO₂-Äq reduziert werden. Besonders bedeutsam waren hier die Rückgänge der N₂O-Emissionen aus der Salpetersäure- und Adipinsäureproduktion. Im Modellierungszeitraum bis 2040 wird dieser Trend fortgesetzt, was impliziert, dass der Katalysatoreinsatz in diesen Prozessen weiter intensiviert und effektiver wird und so diese Prozesse keine Rolle mehr spielen (zusammen <0,1 kt CO₂-Äq). Betriebsbedingt mögliche Grenzen der Minderung wurden dabei allerdings nicht berücksichtigt.

Die größte Quelle prozessbedingter Emissionen in der chemischen Industrie ist aktuell die Ammoniakproduktion (4,2 Mio. t CO₂-Äq), genauer die Synthesegasherstellung aus Erdgas, die stöchiometrisch einen CO₂-Überschuss erzeugt. Ein Teil des CO₂ wird in der Harnstoffproduktion genutzt und erscheint so nicht mehr in dieser Quellkategorie. Dies wird auch für die Entwicklung bis 2040 Diffusion der Synthesegasherstellung für die Ammoniakproduktion aus Wasserstoff untersucht wurde, wurden hier andere innovative Verfahren (wasserstoffbasierte Methanolproduktion und darauf aufbauend Olefinherstellung) in der chemischen Industrie als Maßnahmen berücksichtigt. Dadurch verbleiben die prozessbedingten Emissionen auf dem Niveau von 2018. Die Herstellung von Ammoniak aus grünem Wasserstoff, durch den die prozessbedingten Emissionen reduziert werden könnten, ist ohne direkte Förderung nicht konkurrenzfähig (zu hohe Differenzkosten von Erdgas und Wasserstoff). Ihr werden in dieser Berechnung keine Fördermittel zugeteilt (stattdessen wasserstoffbasierter Methanolproduktion). Diese Zuordnung ist arbiträr, beide Prozesse werden mit vergleichbaren (sehr hohen) Vermeidungskosten angenommen. Beide Prozesse gleichzeitig zu nutzen, würde ihre jeweilige Produktionsmenge stark reduzieren (Methanol bereits in dieser Ausprägung bis 2030 nur 0,37 Mio. t) Hier wurde wasserstoffbasiertes Methanol gewählt, da es gleichzeitig eine Anwendungsmöglichkeit für CCU eröffnet. Dies ist bei wasserstoffbasiertem Ammoniak erst bei hohen Diffusionsgraden und der Berücksichtigung der Prozesskette (Harnstoffherstellung) gegeben: Bei vollständiger Diffusion der wasserstoffbasierten Ammoniakproduktion entfällt die CO₂-Quelle für die Harnstoffproduktion, was die Suche nach Alternativen notwendig macht.

Insgesamt bleiben die prozessbedingten Emissionen aus der chemischen Industrie annähernd konstant und erreichen 5,4 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2040. Im Bereich der prozessbedingten Emissionen ist die preisbasierte Lenkungswirkung durch den EU-ETS gering bzw. nur dann relevant, wenn er die Nutzung neuer Technologien oder Materialien anreizt (keine kontinuierliche, sondern stufenförmige Wirkung). Hierzu reicht das angenommene Preisniveau nicht aus.

Die zweitbedeutendste Branche in Bezug auf CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung im Jahr 1990 war die Metallproduktion (CRF 2.C) mit 25,1 Mio. t CO₂-Äq.

Hier sanken die Emissionen bis zum Jahr 2018 um 15 % auf 21,2 Mio. t CO₂-Äq. Dominiert wird dieser Bereich von den Emissionen aus der Eisen- und Stahlproduktion und dabei insbesondere durch die Oxygenstahlproduktion im Hochofen. Bei der Stahlproduktion zeigt sich zukünftig ein Absinken der Produktionsmengen an Oxygenstahl. Zum Teil wird diese durch die mit Förderprogrammen unterstützte Direktreduktion mit Wasserstoff ersetzt (2,5 Mio. t im Jahr 2030, 6 Mio. t im Jahr 2040, siehe Abschnitt 6.1.4). Zusätzlich steigt die Produktionsmenge in der Sekundärroute an. Beide Produktionsverfahren verursachen prozessbedingte Emissionen (im Elektrolichtbogenofen), diese sind aber deutlich geringer als jene der Hochofenroute. Bis zum Jahr 2040 sinken die Emissionen aus der Metallproduktion auf 14,1 Mio. t CO₂-Äq und damit um 44 % gegenüber 1990. Die Produktion anderer Metalle hat nur einen geringen Einfluss auf diese Emissionsänderung.

Die Emissionen aus der nichtenergetischen Verwendung von Brennstoffen und aus Lösemitteln (CRF 2.D) sanken von 3,0 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 1990 um 32 % auf 2,0 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2018. Ursache war hier vor allem ein deutlicher Rückgang der Emissionen aus Lösemittelverwendung. Nachdem diese Emissionen in den vergangenen Jahren ein Plateau erreicht haben, werden bei der Lösemittelverwendung keine bedeutenden Änderungen erwartet und die Emissionen aus nichtenergetischer Verwendung von Brennstoffen und Lösemitteln werden in etwa auf demselben Niveau verbleiben. Die CO₂-Emissionen aus der Nutzung von Harnstoff in SCR-Katalysatoren geht jedoch nach 2025 zurück, da Dieselmotoren an Bedeutung verlieren werden.

Die CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen aus sonstiger Produktherstellung und -verwendung (CRF 2.G) betragen im Jahr 2018 0,4 Mio. t CO₂-Äq. Dieser Wert ist höher als der im Inventar für das Jahr 1990 angegebene Wert, da die Daten für 1990 zum Teil vertraulich sind und deshalb nicht separat in der Kategorie 2.G ausgewiesen werden. Das Emissionsniveau von 2018 wurde bis 2040 fortgeschrieben. Wichtigste verbleibende Emissionsquelle in diesem Bereich ist das Lachgas in medizinischen Anwendungen.

Tabelle 49: Entwicklung der Treibhausgasemissionen für Industrieprozesse und Produktverwendung zwischen 1990 und 2040 im MMS nach Quellgruppen

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂ -Äq						
CO₂-Emissionen							
Mineralische Industrie (2.A)	23,5	20,1	19,6	19,4	18,7	18,1	17,9
<i>Zement (2.A.1)</i>	15,3	13,0	13,2	13,4	12,9	12,5	12,3
<i>Kalk (2.A.2)</i>	6,0	5,3	4,8	4,5	4,4	4,2	4,2
<i>Glas (2.A.3)</i>	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
<i>Keramik (2.A.4.a)</i>	1,1	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
<i>Sonstige Sodaverwendung (2.A.4.b)</i>	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Chemische Industrie (2.B)	8,1	8,7	5,5	5,3	5,3	5,3	5,4
<i>Ammoniak (2.B.1)</i>	6,0	7,2	4,2	4,0	4,0	4,1	4,2
<i>Carbid (2.B.5)</i>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Soda (2.B.7)</i>	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
<i>Industrieruß (2.B.8)</i>	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
Metallproduktion (2.C)	25,1	21,1	21,2	17,3	15,9	14,8	14,1
<i>Eisen & Stahl (2.C.1)</i>	22,8	19,6	20,1	16,2	14,8	13,7	12,9
<i>Ferrolegerungen (2.C.2)</i>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Aluminium (2.C.3)</i>	1,0	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<i>Blei (2.C.5)</i>	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Zink (2.C.6)</i>	0,7	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nichtenergetische Verwendung (2.D)	3,0	2,2	2,0	2,1	2,1	2,0	2,0
<i>Schmiermittel (2.D.1)</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Paraffinwache (2.D.2)</i>	0,2	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<i>Lösemittel (2.D.3.a)</i>	2,6	1,6	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
<i>AdBlue (2.D.3.d.1)</i>	NA	0,0	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2

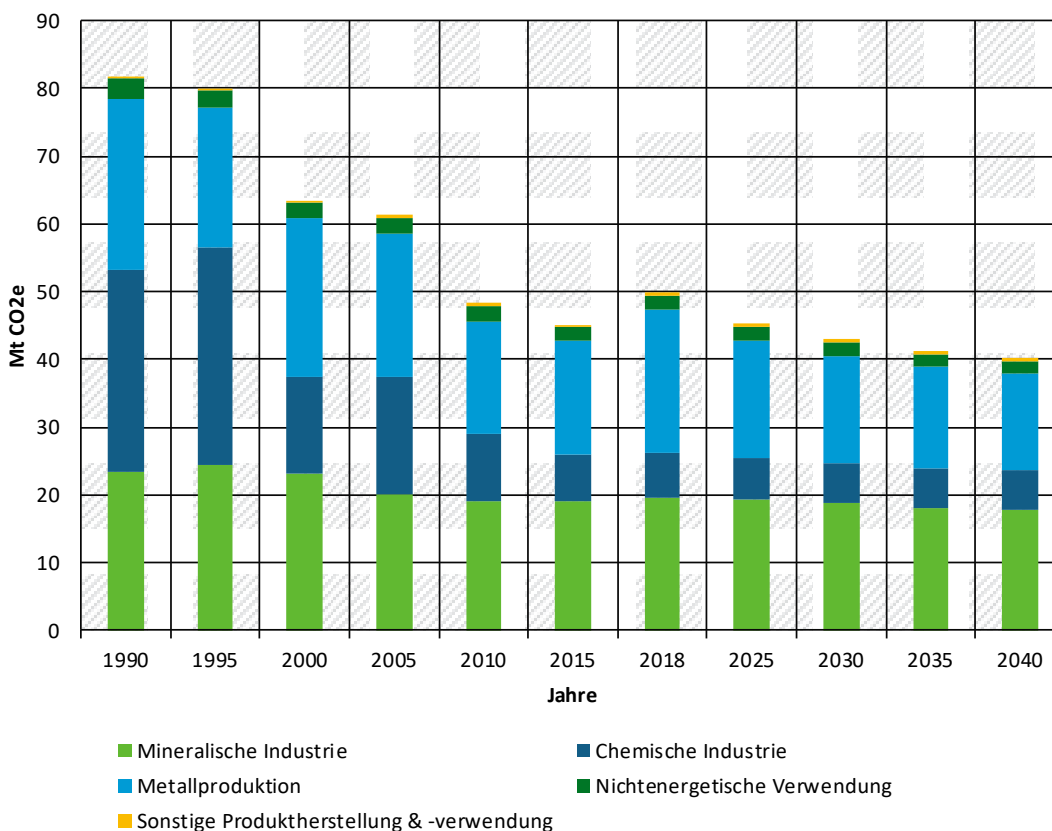
CO ₂ -Emissionen gesamt	59,7	52,2	48,3	44,1	42,0	40,3	39,3
CH₄-Emissionen							
CH ₄ -Emissionen gesamt	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
N₂O-Emissionen							
Chemische Indust- rie (2.B)	21,3	8,0	0,6	0,3	0,1	0,0	0,0
<i>Salpetersäure (2.B.2)</i>	3,3	4,9	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0
<i>Adipinsäure (2.B.3)</i>	18,1	3,1	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0
Metallproduktion (2.C)	0,0	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	0,0
Sonstige Pro- duktherstellung & -verwendung (2.G)	0,0	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
N ₂ O-Emissionen gesamt	21,4	8,6	1,1	0,7	0,6	0,5	0,5
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Industrieprozesse gesamt	81,4	61,5	49,9	45,3	43,1	41,3	40,3
<i>ggü. 2005</i>	<i>32,4%</i>	<i>0,0%</i>	<i>-18,7%</i>	<i>-26,2%</i>	<i>-30,0%</i>	<i>-32,8%</i>	<i>-34,5%</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0%</i>	<i>-24,5%</i>	<i>-38,6%</i>	<i>-44,3%</i>	<i>-47,1%</i>	<i>-49,3%</i>	<i>-50,5%</i>

Quelle: Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Abbildung 22 stellt diese Entwicklung grafisch dar und verdeutlicht, dass der größte Teil der historischen Minderung der CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen aus Industrieprozessen in der chemischen Industrie, gefolgt von der Metallproduktion, erzielt werden konnten. Für die Zukunft sind im Vergleich dazu deutlich niedrigere Emissionsänderungen projiziert.

Die Zunahme der Emissionen zwischen 2015 und 2018 ist durch erhöhte Prozessemissionen der Eisen- und Stahlindustrie bedingt. Dabei ist zu beachten, dass im Treibhausgasinventar jährliche Schwankungen zwischen Prozessemissionen und energiebedingten Emissionen auftreten; die Summe aller Treibhausgasemissionen der Eisen- und Stahlindustrie wies in den vergangenen Jahren nur geringe Schwankungen auf (UBA 2020a).

Abbildung 22: Entwicklung der Industrieprozessemissionen (CO₂, CH₄ und N₂O) im MMS nach Quellgruppen



Quelle: 2005 - 2018: (UBA 2020c); 2025 - 2040: Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut

6.3.4.2 Bewertung der Einzelmaßnahmen

Maßnahmen im Industriesektor wirken sowohl auf energiebedingte Emissionen als auch auf Prozessemissionen. Eine relevante Einzelmaßnahme, die direkt auf prozessbedingte Emissionen wirkt, ist im Bereich der chemischen Industrie der fortgesetzte Einsatz und Effektivitätssteigerung von Katalysatoren zur N₂O-Reduktion.

Hinzu kommen in der Metallproduktion die beginnende Diffusion von wasserstoffbasierter Direktreduktion, die (zusammen mit einem höheren Sekundärstahlanteil) die klassische Primärstahlproduktion in der Hochofenroute verdrängt. In der mineralischen Industrie bewirkt die Umstellung auf voll-elektrische Glasschmelze auch geringfügige Minderungen prozessbedingter Emissionen. Weitere Informationen zu den Maßnahmen im Industriesektor sind in Abschnitt 6.1.4 zu finden.

6.4 Industrieprozesse und Produktverwendung (Fluorierte Treibhausgase)

6.4.1 Maßnahmen

Für die Emissionen fluoriertener Treibhausgase (F-Gase) sind die folgenden Maßnahmen von Relevanz:

- ▶ Die **F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase** regelt eine EU-weite schrittweise Reduktion der bis 2030 neu auf den Markt gebrachten Mengen an HFKW („Phase-Down“) und enthält darüber hinaus zahlreiche Pflichten für Anlagenbetreiber sowie einige Verwendungsverbote.

Die F-Gas-Verordnung befindet sich seit Mitte 2020 im Revisionsprozess, für Ende 2021 ist ein Revisionsvorschlag der Europäischen Kommission zu erwarten, welcher notwendige Anpassungen an das Montrealer Protokoll (Kigali Amendment von 2016) und vor dem Hintergrund des Europäischen Green Deal auch weitergehende Maßnahmen enthalten könnte. Da der Revisionsprozess noch nicht abgeschlossen ist, wird für die Jahre nach 2030 im MMS eine Fortschreibung der für 2030 geltenden Mengenbeschränkung ohne Ambitionssteigerung angenommen.

- ▶ Die **Chemikalien-Klimaschutzverordnung** enthält unter anderem über die EU-F-Gase-Verordnung hinausgehende Grenzwerte für maximale Leckageraten an Anlagen, in denen HFKW verwendet werden.
- ▶ Die **MAC-Richtlinie 2006/40/EG** (Mobile air conditioning) begrenzt das maximale Treibhausgaspotenzial (GWP) von Kältemitteln, die in Klimaanlage neuer Fahrzeuge bzw. Fahrzeugtypen verwendet werden dürfen.
- ▶ Im **EU-ETS** sind die **FKW-Emissionen aus der Primär-Aluminium-Produktion** erfasst.
- ▶ In der **Selbstverpflichtung der SF₆-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln >1 kV** sind Emissionsbegrenzungsmaßnahmen für SF₆ festgelegt.

In der **Kälte-Klima-Richtlinie** (Investitionsförderprogramm im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative) in der Fassung vom 27.08.2020, in Kraft seit dem 1.12.2020, werden Anreize zur Investition in energieeffiziente Kälte- und Klimaanlage mit halogenfreien Kältemitteln gesetzt.

6.4.2 Methodik sowie Annahmen und Parameter

Die Projektionen der Emissionen fluorierter Treibhausgase (F-Gase) setzen auf dem aktuellen deutschen Emissionsinventar aus dem Jahr 2020 (UBA 2020a) auf, welches die Emissionen von 1990 bis 2018 umfasst. Die gemäß der 2006 IPCC Guidelines (IPCC 2006a) zu berücksichtigenden fluorierten Treibhausgase umfassen

- ▶ teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW, 19 verschiedene Substanzen);
- ▶ perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW, 9 verschiedene Substanzen);
- ▶ Schwefelhexafluorid (SF₆) sowie
- ▶ Stickstofftrifluorid (NF₃).

Um vertrauliche Daten zu schützen, kann in den Inventaren gemäß den IPCC Guidelines auch eine „nicht spezifizierte Mischung von HFKW und FKW“ berichtet werden⁶⁴. Für die Umrechnung der Emissionen der verschiedenen Substanzen in CO₂-Äquivalente werden Treibhausgaspotenziale (GWPs) aus dem 4. IPCC Assessment Report (AR4) verwendet (IPCC 2007).

Die Projektion für die **HFKW-Emissionen** beruht im Wesentlichen auf einer von Öko-Recherche und dem Öko-Institut durchgeführten Studie für das Umweltbundesamt (Gschrey et al. 2015). In dieser Studie wurden für Deutschland ein Referenzszenario und ein Minimalszenario für die Emissionsentwicklung von HFKW von 2010 bis 2030 berechnet. Zusätzlich wurde für 2030 die Emissionsminderungswirkung der Mengenbeschränkungen („Phase-down“) für das Inverkehrbringen von HFKW auf den EU-Markt gemäß Verordnung (EU) Nr. 517/2014 und deren Auswirkungen für die deutschen HFKW-Emissionen untersucht (Phase-down-Szenario).

⁶⁴ Im Fall des dieser Projektion zu Grunde liegenden deutschen Inventars von 2018 sind in dieser „nicht spezifizierten Mischung“ auch vertrauliche SF₆-Emissionen enthalten.

Zur Abschätzung der Wirkung des HFKW-Phase-down im MMS bis 2020 werden die Annahmen aus Öko-Institut (2014) übernommen. Zur Abschätzung der Emissionsentwicklung nach 2030 ist zu berücksichtigen, dass der HFKW-Phase-down laut Verordnung (EU) Nr. 517/2014 nur bis 2030 definiert ist. Andererseits beschlossen im Oktober 2016 in Kigali (Ruanda) die 197 Vertragsparteien des Montrealer Protokolls zum Schutz der Ozonschicht dessen Erweiterung um einen internationalen Phase-down für HFKW. Dies impliziert für die EU die Notwendigkeit, den EU-internen Phase-down für den Zeitraum nach 2030 anzupassen. Vor diesem Hintergrund wird im MMS für 2040 eine Extrapolation anhand des relativen Emissionstrends 2025–2030 im Referenzszenario aus UBA vorgenommen. (2015b)

Für die Effekte im MMS der MAC-Richtlinie, welche das GWP von Kältemitteln in Klimaanlage neuer Pkw-Modelle beschränkt, wird auf eine entsprechende Abschätzung in UBA (2011) zurückgegriffen.

Im Detail werden die F-Gas-Emissionen der einzelnen Inventarkategorien wie folgt modelliert:

Die HFKW-Emissionen aus *Kälte- und Klimaanlage, Schaumherstellung, Feuerlöschanlagen, Aerosolen und medizinischen Dosiersprays* werden basierend auf den in UBA (2015b) anwendungsspezifisch entwickelten Nachfrageszenarien und Vermeidungsoptionen modelliert. Dabei wird anwendungsspezifisch anhand der spezifischen Vermeidungskosten berücksichtigt, für welche Anlagenbetreiber angesichts der durch den EU-Phase-down induzierten Knappheit und Verteuerung des HFKW-Angebots ein Umstieg auf HFKW-freie Anlagen zu erwarten ist und in welchen Anwendungssektoren weiterhin eine Nachfrage nach HFKW – und damit zeitversetzt auch HFKW-Emissionen – zu erwarten sind. Außerdem wird gemäß Verordnung (EU) Nr. 517/2014 die Ausnahme vom HFKW-Phase-down für medizinische Dosiersprays ab 2018 sowie das Verbot für Feuerlöschanlagen mit HFKW-23 ab 2016 berücksichtigt. In *Kälte- und Klimaanlage* werden FKW nur in sehr geringem Umfang eingesetzt. Diese Emissionen werden konstant fortgeschrieben.

Für HFKW-Emissionen aus *ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle – die Haupteinsatzbereiche von ORC-Anlagen sind Geothermie-Anlagen und die Abwärmenutzung von (Heiz-)Kraftwerken und Biogas-Anlagen)* wird angesichts des angenommenen starken Zuwachses dieser Anlagen insbesondere im geothermischen Bereich bis 2020 ein starkes Wachstum an Emissionen angenommen, danach aber unter der Wirkung der HFKW-Angebotsverknappung unter dem EU-Phase-down ein vermehrter Umstieg auf HFKW-freie Alternativen und eine Stagnation der Emissionen bis 2040. FKW-Emissionen aus *ORC-Anlagen* werden wie in den letzten Inventarjahren nicht mehr angenommen.

HFKW-Emissionen aus der *Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen* liegen nicht im Anwendungsbereich des HFKW-Phase-down und werden wie auch entsprechende FKW- und SF₆-Emissionen konstant fortgeschrieben.

Die FKW-Emissionen aus der *Produktion von Primäraluminium* werden proportional zur angenommenen Produktionsentwicklung modelliert. Dabei werden die spezifischen Emissionen von 2018 konstant fortgeschrieben. Für SF₆-Emissionen aus *Magnesiumgießereien* werden angesichts des ab 2018 geltenden spezifischen Verwendungsverbots von SF₆ gemäß EU-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 ab 2020 keine Emissionen mehr angenommen. Ein zumindest teilweise zu erwartender

Ersatz von SF₆ (GWP 22.800) durch HFKW-134a (GWP 1.430) ist in der HFKW-Projektion berücksichtigt: Für die HFKW-Emissionen aus *Magnesium-Gießereien*⁶⁵ und die Anwendung von SF₆ als Reinigungsgas in Aluminiumgießereien wird hier in Anlehnung an UBA (2011) eine jährliche Produktions- und Emissionssteigerung von 1 % angenommen.

Die SF₆-Emissionen aus *elektrischen Anlagen*, aus *Tracergasanwendungen*, aus der Produktion von *optischen Glasfasern* und aus der *Photovoltaikproduktion* werden konstant von 2014 fortgeschrieben. Ebenfalls werden die SF₆-, FKW-, NF₃- und HFKW-Emissionen aus der *Halbleiterproduktion*⁶⁶ konstant fortgeschrieben, wie auch die FKW- und NF₃-Emissionen aus der Photovoltaik-Industrie.

Für Emission aus mit SF₆ befüllten *Autoreifen* wird angenommen, dass das seit 2007 geltende Verbot gemäß Verordnungen (EU) Nr. 842/2006 und Nr. 517/2014 vollständig umgesetzt wurde und deshalb ab 2015 keine Emissionen mehr entstehen. Eine Emissionsprojektion für SF₆ aus *Schallschutzfenstern* wurde aus UBA (2011) übernommen, der Effekt des in der EU-F-Gas-Verordnung erlassenen Verwendungsverbotes ab 2008 / 2009 wird auf Basis derselben Studie berechnet.

Die im Inventar aus Vertraulichkeitsgründen für eine „nicht spezifizierte Mischung“ von F-Gasen berichteten Emissionen beinhalten neben den Emissionen aus der Produktion von fluorierten Chemikalien auch HFKW- und FKW-Lösemittlemissionen und FKW- und SF₆-Emissionen aus Radaranlagen, Schweißen, optischen Glasfasern, medizinischen und kosmetischen Anwendungen sowie aus Sportschuhen. Diese Emissionen wurden konstant fortgeschrieben.

6.4.3 Ergebnisse

6.4.3.1 Bewertung der Einzelmaßnahmen

Die unter den oben dargestellten Annahmen errechneten Wirkungen der auf F-Gase orientierten Einzelmaßnahmen des MMS sind in Tabelle 50 zusammengefasst. Die erwarteten Wirkungen steigen in der Summe von ca. 11 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2025 auf etwa 17 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2040. Im Zeithorizont 2030/2040 tragen die EU-MAC-Richtlinie zu Pkw-Klimaanlagen, sowie der EU-HFKW-Phase-down und die EU-SF₆-Verbote unter der EU-F-Gase-Verordnung zu je etwa 4 bis 6 Mio. t CO₂-Äq pro Jahr bei.

⁶⁵ Hier dient das Gas HFKW-134a als emissionsmindernder Ersatz für das ca. 15-fach stärker treibhausgaswirksame Gas SF₆, welches laut Verordnung (EU) Nr. 517/2014 ab 2018 für diesen Anwendungsbereich verboten ist.

⁶⁶ Der Einsatz von HFKW in der Halbleiterproduktion ist gemäß Verordnung (EU) Nr. 517/2014 vom HFKW-Phase-down ausgenommen.

Tabelle 50: Emissionsminderungswirkung von F-Gase-orientierten Einzelmaßnahmen im MMS

Wirkung von Minderungsmaßnahmen im MMS	Instrumententyp	Wirkungsbeginn	2025	2030	2035	2040
			Mio. t CO ₂ -Äq			
Beschränkung von HFKW in Pkw-Klimaanlagen gemäß EU MAC-Richtlinie 2006/40/EG	R	2007	4,7	6,1	6,5	6,4
HFKW-Phase-down nach EU F-Gas-Verordnung 517/2014 (inkl. Chemikalien-Klimaschutz-Verordnung & NKI-Förderung)	E (inkl. R/F)	2010 / 2015	3,5	5,7	5,8	6,5
Berücksichtigung von FKW aus Primär-Aluminium im EU-Emissionshandel	E	2013	0,2	0,2	0,2	0,2
SF ₆ -Verbote gemäß EU F-Gas-Verordnung 517/2014 (inkl. Vorgänger-Verordnung 842/2006)	R	2006 / 2018	2,2	3,8	4,0	4,0
Summe der betrachteten Maßnahmen			10,6	15,7	16,5	17,1

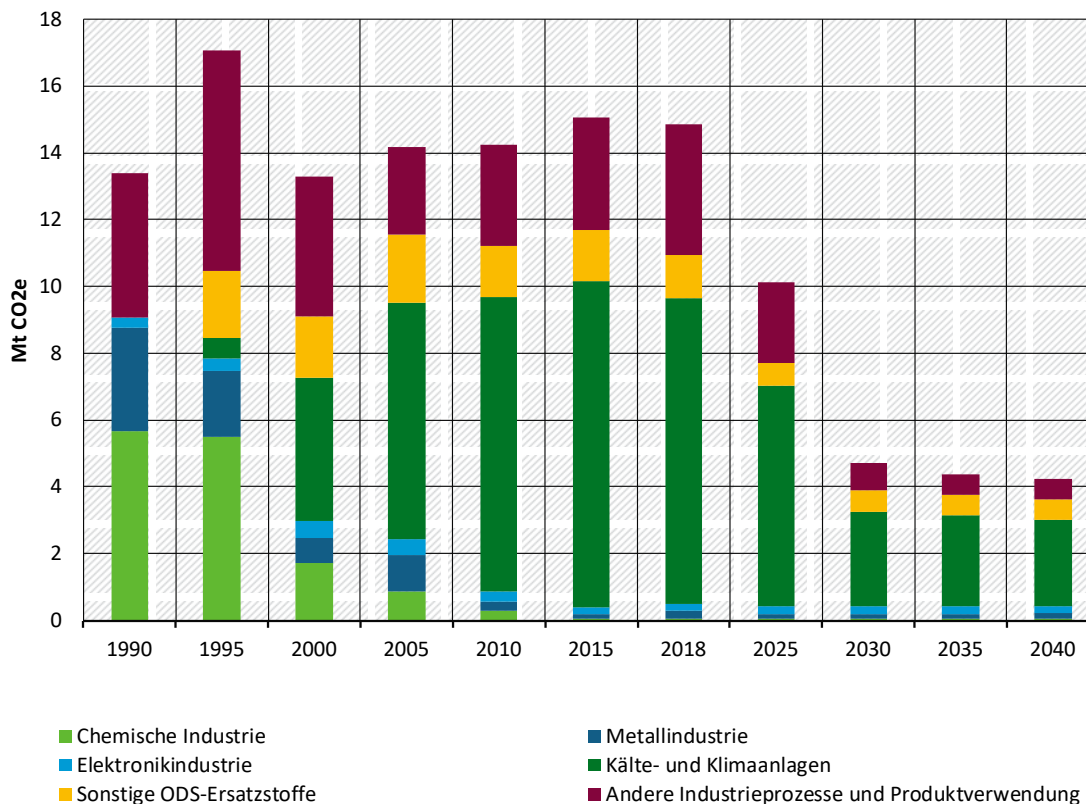
Quelle: Berechnung Öko-Institut

Anmerkung: Erklärung der Instrumententypen: Tabelle A 1 im Anhang A1

6.4.3.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Mit dem beschriebenen methodischen Ansatz ergibt sich für das MMS die in Abbildung 23 und Tabelle 51 gezeigte Emissionsentwicklung für fluorierte Treibhausgase (F-Gase).

Abbildung 23: Entwicklung der Emissionen von F-Gasen im MMS nach Quellgruppen



Anmerkungen: ODS: unter dem Montreal-Protokoll adressierte ozonabbauende Stoffe (ozone depleting substances)

Quelle: 1990 - 2018: UBA (2020c), UBA (2020a); 2025 - 2040: Berechnungen des Öko-Instituts

Die Summe der Emissionen der fluorierten Treibhausgase (F-Gase) ist seit 1990 nach einer zwischenzeitlichen Steigerung Mitte der 1990er Jahre bis 2017 auf 15 % über das Niveau von 1990 gestiegen, das entspricht 8 % über dem Niveau von 2005. Ursache waren stetig steigende HFKW-Emissionen von Kälte- und Klimaanlage sowie SF₆-Emissionen aus alten Schallschutzfenstern⁶⁷ bei sinkenden SF₆- und FKW-Emissionen aus der Produktion von fluorierten Chemikalien und der Metallindustrie (Magnesium und Aluminium) sowie sinkenden HFKW-Emissionen aus der Schaumproduktion⁶⁸. Von 2017 nach 2018 wurde zum ersten Mal seit Ende der 1990er Jahre ein Rückgang der F-Gas-Emissionen beobachtet, auf 5 % über das Niveau von 2005.

Im MMS fallen nach 2018 die F-Gas-Emissionen bis 2030 deutlich auf 33 % des Niveaus von 2005, bis 2040 wird eine weitere leichte Emissionsreduktion bis auf 30 % des Niveaus von 2005 erwartet. Ursachen dieser Emissionsreduktion sind vor allem die angesichts MAC-Richtlinie und EU-Phase-down stark sinkenden HFKW-Emissionen aus Kälte- und Klimaanlage sowie das Auslaufen der SF₆-

⁶⁷ SF₆-Emissionen aus Schallschutzfenstern sind bis 2025 der größte Anteil der in Abbildung 23 dargestellten ‚anderen Industrieprozesse und Produktverwendung‘.

⁶⁸ Schaumproduktion ist in Abbildung 23 neben Feuerlöschanlagen, medizinische Inhalationssprays und anderen Aerosolen bei den ‚sonstigen ODS-Ersatzstoffen‘ erfasst.

Emissionen aus in der Vergangenheit verbauten Schallschutzfenstern, deren Neuinstallation schon seit 2008 verboten ist.

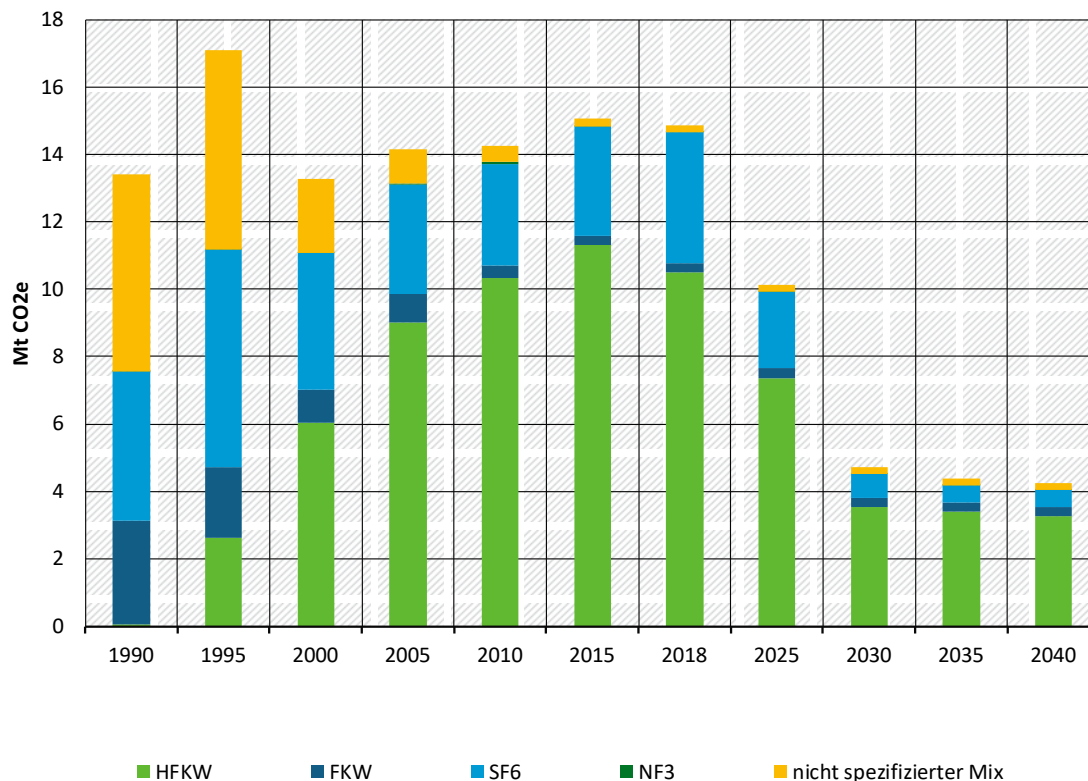
Tabelle 51: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (fluorierte Treibhausgase) im MMS, 1990-2040 nach Quellgruppen

Quellgruppe und Gase		1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
		Mio. t CO ₂ -Äq						
Chemische Industrie	HFKW, FKW und SF ₆ aus fluorchemischer Produktion	5,7	0,9	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	3,1	1,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
Elektronikindustrie	FKW, SF ₆ , NF ₃ und HFKW aus Halbleiter- und Photovoltaikproduktion	0,3	0,5	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	9,2	6,6	2,8	2,7	2,6
Sonstige ODS-Ersatzstoffe	HFKW aus Schaumherstellung, Feuerlöschern, Aerosolen und medizinischen Dosiersprays	-	2,0	1,3	0,7	0,6	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	4,3	2,6	3,9	2,4	0,8	0,6	0,6
Summe fluorierte Treibhausgase		13,4	14,2	14,8	10,1	4,7	4,4	4,2

Quelle: 1990 - 2018: (UBA 2020c), (UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018), (UBA 2018a); 2025 - 2040: Berechnungen des Öko-Instituts

Eine Darstellung der Emissionsentwicklung im MMS für fluorierte Treibhausgase differenziert nach Gasgruppen wird in Abbildung 24 und Tabelle 52 gezeigt.

Abbildung 24: Entwicklung der Emissionen von F-Gasen im MMS nach Gasgruppen



Quelle: 1990 - 2018: (UBA 2020c), (UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018), (UBA 2018a); 2025 - 2040: Berechnungen des Öko-Instituts

Die Zeit zwischen 1990 und 2017 war von einer starken Zunahme der HFKW-Verwendung und der HFKW-Emissionen bei gleichzeitigem Rückgang der Emissionen und FKW und SF₆ geprägt. Die in den 1990er Jahren in relevanten Mengen ausgewiesenen Emissionen des ‚nicht spezifizierten Mixes‘ waren laut UBA (2020a) im wesentlichen HFKW-Emissionen aus der fluorchemischen Industrie, die aus Vertraulichkeitsgründen nicht auf die einzelnen HFKW aufgeschlüsselt werden.

Bis 2040 sind vor allem für HFKW und SF₆ deutliche Emissionsreduktionen zu erwarten. NF₃-Emissionen spielen im Vergleich zu den anderen fluorierten Treibhausgasen quantitativ keine bedeutende Rolle. Die HFKW-Emissionen machen seit Anfang der 2000er Jahre den Großteil an den Gesamtemissionen aus, 2018 lag der Anteil bei 71 %, im Jahr 2040 liegt ihr Anteil im MMS bei 77 %.

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 52: Entwicklung der Treibhausgasemissionen (fluorierte Treibhausgase) aus Industrieprozessen und Produktverwendung im MMS zwischen 1990 und 2040 nach Gasgruppen

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
HFKW-Emissionen	0,1	9,0	10,5	7,4	3,5	3,4	3,2
FKW-Emissionen	3,1	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
SF ₆ -Emissionen	4,4	3,3	3,9	2,3	0,7	0,5	0,5
NF ₃ -Emissionen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nicht spezifizierter Mix	5,8	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Summe F-Gase	13,4	14,2	14,8	10,1	4,7	4,4	4,2
Veränderung ab 1990 in %							
Summe F-Gase		5,7	10,8	-24,5	-64,8	-67,4	-68,4
Veränderung ab 2005 in %							
Summe F-Gase			4,8	-28,6	-66,7	-69,2	-70,1

Quelle: 1990 - 2018: (UBA 2020c), (UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018)(UBA 2018), (UBA 2018a); 2025 - 2040: Berechnungen des Öko-Instituts

6.5 Industrieprozesse und Produktverwendung (Gesamt)

Die Treibhausgasemissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung sinken bis 2040 um rund 53 % gegenüber 1990 und gut 41 % gegenüber 2005. Auch hier ist CO₂ dominierend, wenn auch weniger als bei den verbrennungsbedingten Emissionen. Da für den Rückgang der Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung ab 2018 hauptsächlich die HFKW und SF₆ verantwortlich sind, steigt der Anteil des CO₂ an den Gesamtemissionen bis 2040 auf rund 88 %.

Historisch ist der stärkste Rückgang der CO₂-Emissionen aus Industrieprozessen im Bereich der chemischen Industrie zu verzeichnen, in Zukunft werden die CO₂-Emissionen vor allem bei der Stahlerzeugung zurückgehen – bedingt durch einen Rückgang der Produktion und zum Teil durch die Umstellung auf wasserstoffbasierte Rohstahlproduktion. HFKW und SF₆ sind nach CO₂ die größten Verursacher von Emissionen in diesem Sektor und tragen, wie erwähnt, auch hauptsächlich zur Minderung in diesem Bereich bei. NF₃ spielt nur eine marginale Rolle, und gering ist auch der Beitrag der FKW und des bei Industrieprozessen und Produktverwendung wenig bedeutenden Methans (CH₄).

Die N₂O-Emissionen sind bereits in der Vergangenheit stark zurückgegangen und werden bis 2040 durch Maßnahmen in der chemischen Industrie weiter reduziert. Verantwortlich sowohl für den bisherigen als auch den projizierten Rückgang der F-Gase sind vor allem die F-Gas-Regulierungen auf EU-Ebene.

Tabelle 53: Entwicklung der Treibhausgasemissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
CO₂-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	59,7	52,2	48,3				
MMS				44,1	42,0	40,3	39,3
CH₄-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,4	0,6	0,5				
MMS				0,5	0,5	0,5	0,5
N₂O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	21,4	8,6	1,1				
MMS				0,7	0,6	0,5	0,5
HFKW-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,1	9,0	10,5				
MMS				7,4	3,5	3,4	3,2
FKW-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	3,1	0,9	0,3				
MMS				0,3	0,3	0,3	0,3
SF₆-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	4,4	3,3	3,9				
MMS				2,3	0,7	0,5	0,5
NF₃-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,0	0,0	0,0				
MMS				0,0	0,0	0,0	0,0
Nicht spezifizierter Mix							
Entwicklung 1990 – 2018	5,8	1,0	0,2				
MMS				0,2	0,2	0,2	0,2

Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018	94,8	75,6	64,8				
MMS				55,5	47,8	45,7	
Summe CO₂+CH₄+N₂O	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018		-20,2	-31,7				
MMS				-41,5	-49,6	-51,8	-53,1
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018			-14,3				
MMS				-26,7	-36,9	-39,6	

Anmerkung: Emissionen, die in der Tabelle als 0,0 Mio. t CO₂-Äq dargestellt sind, existieren, sind aber kleiner als 0,05 Mio. t CO₂-Äq.

Quelle: (UBA 2020a), Modellrechnungen Öko-Institut

6.6 Gesamtergebnisse Industrie

Der Industriesektor umfasst verbrennungsbedingte Emissionen (Verarbeitendes Gewerbe (Industriekraftwerke und -kessel, Prozessfeuerungen) und bauwirtschaftlicher Verkehr) sowie Prozessemissionen und Emissionen aus der Produktnutzung (Tabelle 54).

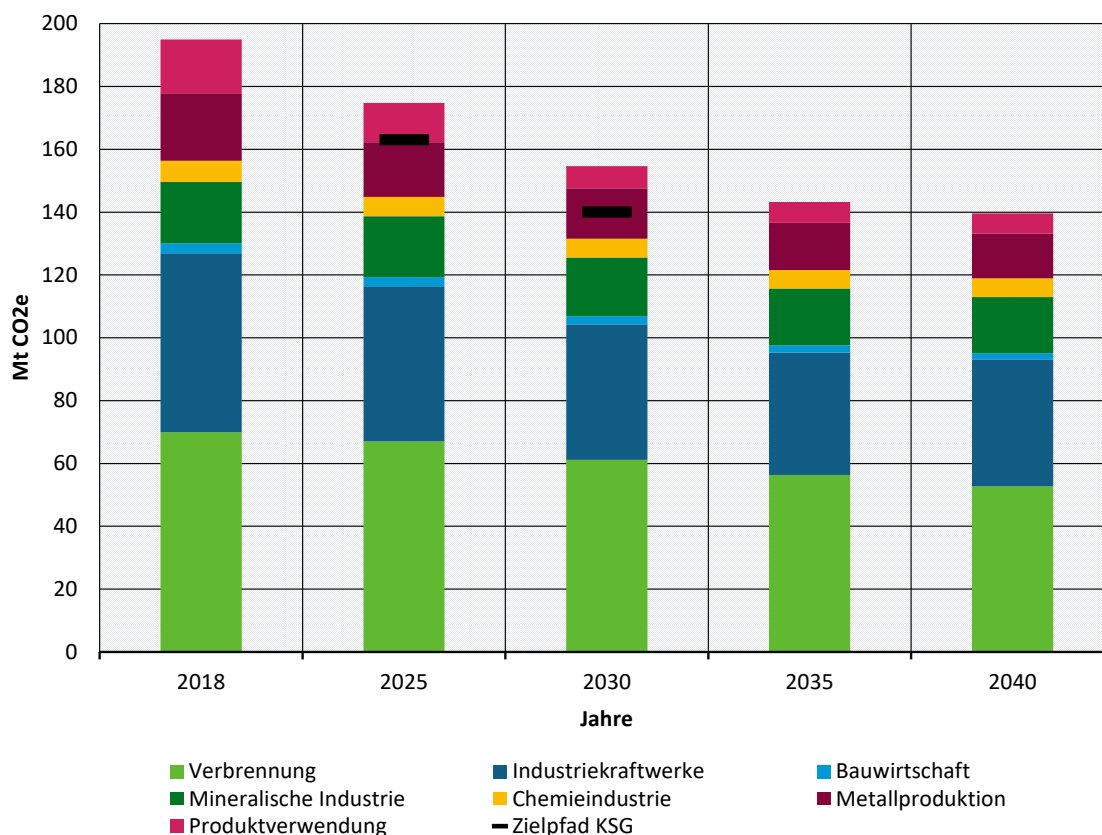
Zwischen 2020 und 2025 wird im MMS von etwa konstanten Emissionen ausgegangen, anschließend erfolgt eine kontinuierliche Abnahme bis 2030 und eine weitere, aber geringere Abnahme bis 2040. Die Entwicklung bis 2025 ist zunächst von einem deutlichen Emissionsrückgang in den Jahren 2020 und 2021 durch den Rückgang der Bruttowertschöpfung als Folge der Corona-Pandemie geprägt. Im Zeitraum 2021 bis 2025 findet eine Erholung der Wirtschaftsleistung statt, welche Emissionseinsparungen und Effizienzgewinne kompensiert, weshalb die Emissionen der Industrie in diesem Zeitraum nahezu stagnieren. Den größten Teil der Emissionsminderungen machen die energiebedingten Emissionen aus (v.a. Verarbeitendes Gewerbe). Diese reduzieren sich von 2018 bis 2030 um etwa 18 Mio. t CO₂-Äq, was auf Maßnahmen wie den Emissionshandel, Programme zur Markteinführung von CO₂-armen Verfahren sowie Effizienzmaßnahmen 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. Dem wirkt teilweise eine verstärkte Elektrifizierung im Bereich der Dampferzeugung und der Industrieöfen entgegen. Insgesamt ist im MMS Strom für diese Anwendungen aber nicht attraktiv genug, um einen Energieträgerwechsel auszulösen, der einen ansteigenden Strombedarf bewirken könnte.

Die Prozessemissionen in der mineralischen Industrie und Metallproduktion sinken ebenfalls zwischen 2018 und 2030, wobei die weiteren Reduktionsmöglichkeiten bei den derzeit verwendeten

Prozessen begrenzt sind bzw. im Fall der Stahlherstellung einen Prozesswechsel verlangen. Dieser findet im MMS von Oxygenstahl hin zur Sekundärroute und zur wasserstoffbasierten Direktreduktion statt. Zwischen 2030 und 2040 nehmen die Emissionen aus der mineralischen Industrie und der Stahlindustrie noch um rund 3 Mio. t CO₂-Äq ab. Die Emissionen der chemischen Industrie und aus der nichtenergetischen Verwendung von Brennstoffen und aus Lösemitteln bleiben zwischen 2021 und 2040 annähernd konstant.

Abbildung 16: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen



Quelle: (UBA 2020a), Modellrechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

Tabelle 54: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS

Kategorie	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO ₂ -Äq										
Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen		62,9	65,1	66,2	66,7	67,0	65,8	64,6	63,5	62,3	61,2
Industriekraftwerke	119,9	49,8	50,3	50,5	50,4	49,4	47,8	46,5	45,3	44,2	43,1
Bauwirtschaftlicher Verkehr		3,1	3,1	3,0	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,7	2,6

Mineralische Industrie	19,4	18,7	19,0	19,2	19,3	19,4	19,2	19,1	19,0	18,8	18,7
Chemische Industrie	6,6	5,8	5,9	5,9	6,0	6,1	6,1	6,0	6,0	6,0	5,9
Metallproduktion	17,1	16,4	16,6	16,9	17,2	17,4	17,1	16,9	16,6	16,3	16,1
Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln		2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Elektronik-Industrie	15,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Anwendung als ODS-Ersatzstoff		9,1	8,7	8,2	7,8	7,3	6,5	5,8	5,0	4,2	3,5
Sonstige Produktherstellung und -Verwendung		4,0	3,7	3,4	3,0	2,7	2,4	2,1	1,8	1,5	1,1
Andere Bereiche		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gesamt	178,1	172,2	174,6	175,7	176,0	174,8	170,4	166,2	162,2	158,4	154,6
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	186	182	177	172	165	157	149	140	132	125	118
Abweichung vom Sektorziel*	-7,9	-9,8	-2,4	3,7	11,0	17,8	21,4	26,2	30,2	33,4	36,6

Quelle für die Jahre 2021-2030: Modellrechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Die Werte für das Jahr 2020 wurden der Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2021) entnommen.

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

Anmerkung: Die Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen sind in Anhang A.2 zu finden.

Die Emissionen fluoriertener Gase⁶⁹ sinken im Projektionszeitraum 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.

In Summe belaufen sich die Emissionen der Industrie im MMS im Jahr 2030 auf 154,6 Mio. t CO₂-Äq. Zwischen 2023 und 2030 wird das jährliche Sektorziel gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 jeweils überschritten. Es ist aber zu bedenken, dass bei der Maßnahmenwirkung und -ausgestaltung sowie insbesondere bei den hinterlegten Produktionsmengen Unsicherheiten bestehen.

Tabelle 55 zeigt den zeitlichen Verlauf der Emissionen von CO₂, CH₄, N₂O und fluorierten Gasen. Die CO₂-Emissionen nehmen den Hauptteil der gesamten Treibhausgasemissionen ein, da verbrennungsbedingte Emissionen den Großteil der Gesamtemissionen ausmachen (Tabelle 54) und die CO₂-Emissionen sich direkt aus dem Kohlenstoffanteil des Brennstoffs (v.a. Kohle, Erdgas) ergeben. CO₂ macht

⁶⁹ Diese fallen in den Kategorien chemische Industrie, Metallproduktion, Elektronik-Industrie, Anwendung als ODS-Ersatzstoff, sonstige Produktherstellung und -verwendung sowie andere Bereiche an.

im Jahr 2030 96 % der gesamten Treibhausgasemissionen aus. Fluorierte Gase tragen rund 3 % bei, und CH₄ und N₂O weniger als 1 % der Emissionen.

Die gesamten Treibhausgasemissionen sinken von 281,5 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 1990 auf 154,6 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030 und damit um rund 45 %. Die Minderung gegenüber 2005 beläuft sich auf 19 %. Bis 2040 reduzieren sich die Emissionen auf 139,4 Mio. t CO₂-Äq; dies entspricht einer Minderung von 50,5 % gegenüber 1990 bzw. 27,0 % gegenüber 2005.

Tabelle 55: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Industrie nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
CO₂-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	244,8	166,6	177,3				
MMS				162,3	147,8	136,9	133,3
CH₄-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,6	0,8	0,8				
MMS				0,8	0,8	0,7	0,8
N₂O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	22,7	9,3	2,0				
MMS				1,6	1,3	1,2	1,1
Emissionen fluorierter Gase							
Entwicklung 1990 – 2018	13,4	14,2	14,8				
MMS				10,1	4,7	4,4	4,2
Summe THG-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	281,5	191,0	194,9				
MMS				174,8	154,6	143,2	139,4

Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018		-32,2	-30,8				
MMS				-37,9	-45,1	-49,1	-50,5
Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 2005 in %						
Entwicklung 1990 – 2018			2,1				
MMS				-8,5	-19,0	-25,0	-27,0

Quelle: (UBA 2020a), Modellrechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut

7 Gebäude

7.1 Übergreifende Rahmendaten

7.1.1 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 Vorausberechnungen der Europäischen Kommission ab (European Commission 2020). Nationale Prognosen gehen von einem weiteren kontinuierlichen Rückgang der Anzahl der Personen pro Haushalt aus. In Verbindung mit der Bevölkerungsentwicklung, welche bis 2035 wächst und danach nur leicht abfällt, führt dies zu einem stetigen, leichten Anstieg der Anzahl der Haushalte in Deutschland bis 2040 (Tabelle 56). Die Anzahl der Haushalte ist insbesondere als Eingangsgröße für die Berechnung der Anzahl der elektrischen Geräte relevant. Die angesetzten Maßnahmen wirken sich hingegen nicht auf die Anzahl der Haushalte aus.

Tabelle 56: Vergleich der Anzahl privater Haushalte verschiedener Quellen

	Quelle	2020	2025	2030	2035	2040
Bevölkerung (Mio.)	Tabelle 4	83,2	83,6	83,8	83,8	83,5
Haushaltsgröße	Basierend auf nationalen Prognosen (StBA 2017)	1,97	1,95	1,93	1,90	1,87
Anzahl Haushalte (Mio.)	Eigene Berechnung	42,2	42,9	43,4	44,1	44,6

Quelle: (European Commission 2020; StBA 2017)

7.1.2 Wohnfläche und Entwicklung der Nutzfläche in Nichtwohngebäuden

Tabelle 57 zeigt die Bevölkerungsentwicklung sowie die Veränderung der absoluten und relativen spezifischen Wohnfläche. Seit 2002 ist die Wohnfläche pro Kopf von 41,4 m² auf 46,7 m² pro Person im Jahr 2018 angestiegen (Destatis 2019). Nach den jetzigen Prognosen wird die Pro-Kopf-Wohnfläche zumindest bis 2030 weiter zunehmen. Bis zum Jahr 2030 entspricht die Entwicklung in Tabelle 57 der Wohnungsmarktprogno­se des BBSR (BBSR 2015). Ab 2030 wird angenommen, dass zwar die spezifische Wohnfläche steigt, sich allerdings die Entwicklung verlangsamt. Weiterhin wird angenommen, dass die spezifische Wohnfläche bis 2050 ausgehend von 2018 um 7 Quadratmeter auf insgesamt 52 Quadratmeter pro Kopf steigt. Die Nutzfläche in Nichtwohngebäuden ist an die Wohnfläche gekoppelt und folgt deshalb dem relativen Zuwachs der spezifischen Wohnfläche.

Tabelle 57: Entwicklung der Bevölkerung sowie absolute und relative Entwicklung der spezifischen Wohnfläche

	2018	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bevölkerung [in Mio.]	83,2	83,2	83,6	83,8	83,8	83,5	82,6	81,6
Wohnfläche [in m ² /Einwohner]	45	45,6	47,2	48,5	50	51	51,5	52
Relativer Zuwachs		0,67 %	0,70 %	0,55 %	0,62 %	0,40 %	0,20 %	0,19 %

Quelle: (Destatis 2019; BBSR 2015)

7.2 Wärmebedarf im Gebäudebereich

7.2.1 Methodik

Zur Ermittlung der Wärmebedarfsentwicklung wird das Simulationsmodell Invert/ee-Lab eingesetzt. Methodisch stellt Invert/ee-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, technoökonomisches Simulationsmodell dar. Mithilfe des Modells können Investitionsentscheidungen in Bezug auf Energieeffizienz und auf die Optionen zur Deckung des Energiebedarfs für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in Jahresschritten abgebildet werden.

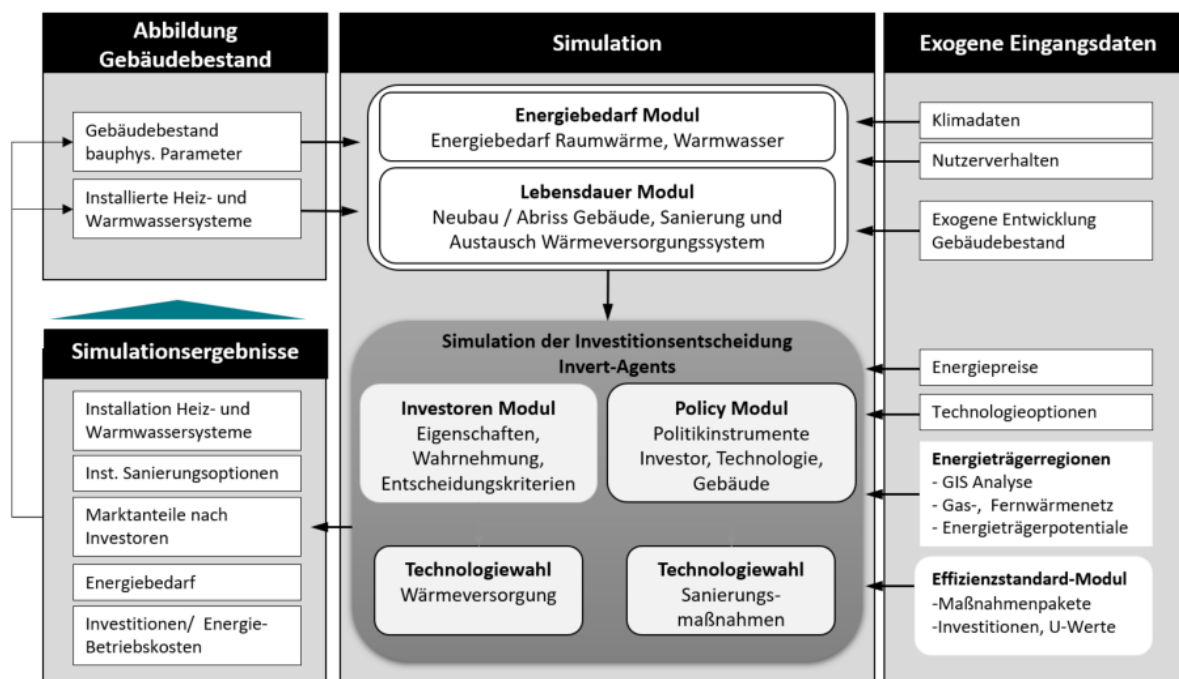
Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualterklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Systeme zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend 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 (Steinbach 2015).

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:

- a) Berücksichtigung von investorenspezifischen Hemmnissen und Kalkülen bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen (Steinbach 2015)
- b) Das Temperaturniveau des Wärmeverteilungssystems wird in der Simulation berücksichtigt, hier besonders die Interaktion zwischen diesem und den Wirkungsgraden bzw. Arbeitszahlen der Wärmeversorgungssysteme. Dies ist in besonderem Maße für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes von Wärmepumpen in älteren Gebäuden von Bedeutung.
- c) 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, Nutzungspflichten (GEG) oder haushaltsunabhängige Umlagesysteme werden technik- 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.

Abbildung 25: Struktur des Simulationsmodells Invert/ee-Lab



Quelle: (Steinbach 2015)

Abschätzung der Einzelinstrumentenwirkungen über Instrumentenindikatoren

Die Abschätzung der Einzelinstrumentenwirkungen erfolgt für die meisten Instrumente Bottom-up. Ausnahme ist das BEHG (CO₂-Bepreisung fossiler Brennstoffe), für das die Wirkung über INVERT/EE-Lab modellgestützt abgeschätzt wird. Die Bottom-up Abschätzung der Wirkung einzelner Politikinstrumente greift auf bestehende Evaluationen oder Auswertungen der entsprechenden Instrumente zurück. 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 2018), für das Marktanzreizprogramm (Fichtner et al. 2019), die Energieberatung für Wohngebäude (PWC 2019) sowie für das Heizungsaltsanlagenlabel (IZT und Öko-Institut 2020). Sofern die betrachteten Instrumente bisher nicht evaluiert wurden, werden die Instrumentenwirkungen durch eigene Abschätzungen auf Basis geeigneter Indikatoren ermittelt.

7.2.2 Maßnahmen

7.2.2.1 Finanzielle Anreize für Investitionen in Energieeffizienz und Erneuerbare Energien

a) CO₂-Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 wurde im Herbst 2019 durch die Bundesregierung beschlossen, ab 2021 eine CO₂-Bepreisung für die Bereiche Wärme und Verkehr einzuführen (siehe Abschnitt 8.2.1).

b) Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)

Mit der im Klimaschutzprogramm 2030 beschriebenen „Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)“ sollen die investiven Förderprogramme des Bundes in den Bereichen Wärme aus erneuerbaren Energien und energieeffiziente Gebäude zusammengeführt und insgesamt mit einem höheren Förderbudget ausgestattet werden. Eine Beschlussfassung der Förderrichtlinie und der Haushaltsmittel stand zum Zeitpunkt der Modellierung noch aus, daher werden für das MMS die Förderprogramme einzeln dargestellt.

c) CO₂-Gebäudesanierungsprogramm und Anreizprogramm Energieeffizienz

Aus den Mitteln des CO₂-Gebäudesanierungsprogramms werden die KfW-Förderprogramme zum energieeffizienten Bauen und Sanieren (EBS) finanziert. Für Neuzusagen stehen im Jahr 2020 insgesamt rd. 5,2 Mrd. € zur Verfügung. Mit dem „Anreizprogramm Energieeffizienz“ (APEE) wurden von 2016 bis 2020 zusätzliche Ausgaben von jährlich mehr als 165 Mio. € zu Verfügung gestellt, welche die bestehende Förderlandschaft aus CO₂-Gebäudesanierungsprogramm und Marktanzreizprogramm für Erneuerbare Energien in Form des „Heizungs- bzw. Lüftungspakets“ bei KfW und BAFA ergänzt haben. Über den Titel des APEE wurde außerdem seit Sommer 2016 die Förderung der Markteinführung Brennstoffzellenheizungen finanziert. Die Fördertatbestände sind in den einzelnen Programmen im Folgenden dargestellt.

Im Jahr 2021 werden das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm und das Anreizprogramm Energieeffizienz in der neuen Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) aufgehen.

1. „Energieeffizient Sanieren - Programmnummern 151/152 und 430“

Mit dem Förderprogramm „Energieeffizient Sanieren“ wird die energetische Sanierung von Wohngebäuden, für die der Bauantrag vor dem 1. Februar 2002 gestellt wurde, durch zinsverbilligte Kredite in Verbindung mit Tilgungszuschüssen oder über Investitionszuschüsse unterstützt. Gefördert werden die umfassende Sanierung zum KfW-Effizienzhaus sowie die Sanierung durch Einzelmaßnahmen oder Maßnahmenkombinationen zur Verbesserung der Energieeffizienz an Wohngebäuden. Die Höhe der Förderung richtet sich nach dem erreichten Effizienzniveau. Für die Förderung zum KfW-Effizienzhaus (KfW-EH) existieren im Bestand aktuell fünf Kategorien – KfW EH 55, KfW EH 70, KfW EH 85, KfW EH 100, KfW EH 115, die sich hinsichtlich des erreichten Jahresprimärenergiebedarfs und des auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche des Gebäudes bezogenen Transmissionswärmeverlusts mit Bezug auf die Referenzwerte der jeweils geltenden Energieeinsparverordnung unterscheiden⁷⁰. Zudem wird über den Förderbaustein KfW EH Denkmal (160) die Sanierung von Baudenkmalern sowie besonders erhaltenswerter Bausubstanz gefördert.

Tabelle 58: Fördersätze Energieeffizient Sanieren Wohngebäude nach Anpassung durch das KSPR 2030

KfW-Effizienzhaus-Standard	Investition-/ Tilgungszuschuss	Maximaler Investitions- / Tilgungszuschuss
Sanierung KfW 55	40 %	48.000 €
Sanierung KfW 70	35 %	42.000 €
Sanierung KfW 85	30 %	36.000 €

⁷⁰ Ein KfW Effizienzhaus 70 Standard wird beispielsweise dann erreicht, wenn das Gebäude nicht mehr als 70 % des Primärenergiebedarfs eines äquivalenten Neubaus entsprechend der EnEV aufweist (relevant sind dabei die Referenzwerte eines Neubaus gemäß der EnEV 2009). Bezogen auf die reine Gebäudehüllen Anforderung (H_T) liegen die Werte jeweils 15 % höher – für KfW 70 entsprechend maximal 85 % des spezifischen Transmissionswärmekoeffizienten der EnEV.

Sanierung KfW 100	27,5 %	33.000 €
Sanierung KfW 115	25 %	30.000 €
Sanierung KfW Denkmal	25 %	30.000 €
KfW-Einzelmaßnahmen	20 %	10.000 €

Quelle: eigene Darstellung

Förderfähige Einzelmaßnahmen unterliegen ebenfalls bestimmten Mindestanforderungen. Zu den Einzelmaßnahmen zählen u. a. die Wärmedämmung der Außenwände, des Daches, der Keller- und Geschossdecken sowie die Erneuerung der Fenster und Außentüren. Mit Bezug auf die Anlagentechnik wird die Optimierung der bestehenden Heizungsanlage gefördert, der Erstanchluss an ein Nah- und Fernwärmenetz sowie die Erneuerung oder Einbau einer Lüftungsanlage. Die Förderung von erneuerbaren Wärmeerzeugern und Hybridsystemen wird über das Marktanzreizprogramm gefördert und kann mit dem KfW-Ergänzungskredit 167 für die Finanzierung kombiniert werden.

2. KfW-Programm „Energieeffizient Bauen - Programmnummer 153“

Das KfW-Programm „Energieeffizient Bauen“ ist das Pendant des Programmes „Energieeffizient Sanieren“ für den Neubau von Wohngebäuden. Gefördert wird die Errichtung, Herstellung oder der Ersterwerb von KfW-Effizienzhäusern durch zinsverbilligte Kredite in Verbindung mit Tilgungszuschüssen. Zur Auswahl stehen die Standards KfW EH 40 Plus, KfW EH 40 und KfW EH 55.

Tabelle 59: Angepasste Fördersätze Energieeffizient Bauen Wohngebäude

KfW-Standard	Tilgungszuschuss	Maximaler Tilgungszuschuss
Neubau KfW 40 Plus	25 %	30.000 €
Neubau KfW 40	20 %	24.000 €
Neubau KfW 55	15 %	18.000 €

Quelle: Eigene Darstellung

3. KfW-Energieeffizienzprogramm „Energieeffizient Bauen und Sanieren - Programmnummern 276/277/278“ (Energiekosten im Gewerbegebäude senken)

Seit 1.7.2015 werden die energetische Sanierung und der energieeffiziente Neubau gewerblich genutzter Nichtwohngebäude in der vergleichbaren Fördersystematik wie bei den Wohngebäuden gefördert. Gefördert werden sowohl Einzelmaßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz (siehe oben) als auch die Sanierung zum KfW-Effizienzgebäude (KfW EG 70, KfW EG 100, KfW EG Denkmal) und der Neubau von KfW-Effizienzgebäuden (KfW EG 55 und KfW EG 70). Die Förderung erfolgt über zinsverbilligte Kredite in Verbindung mit Tilgungszuschüssen (Tabelle 60).

Tabelle 60: Angepasste Fördersätze Energieeffizient Bauen und Sanieren Nichtwohngebäude

KfW Standard	Tilgungszuschuss	Maximaler Tilgungszuschuss
Sanierung KfW 55	27,5 %	275 €/ m ²
Sanierung KfW 100	20 %	200 €/ m ²
Sanierung KfW Denkmal	17,5 %	175 €/ m ²

KfW-Einzelmaßnahmen	20 %	200 €/ m ²
Neubau KfW 55	5 %	50 €/ m ²
Neubau KfW 70	Kein Zuschuss / nur Kredit	

Quelle: Eigene Darstellung

4. KfW-Programm „IKK Energieeffizient Bauen und Sanieren - Programmnummern 217/218

Über dieses Programm werden kommunale Nichtwohngebäude adressiert. Das Programm erfasst die gleichen Fördertatbestände wie die Förderprogramme für gewerbliche Nichtwohngebäude.

5. IKU - Energieeffizient Bauen und Sanieren - Programmnummern 220/219

Nichtwohngebäude von sozialen Einrichtungen und Vereinen werden durch das Programm „IKU - Energieeffizient Bauen und Sanieren“ adressiert. Das Programm erfasst die gleichen Fördertatbestände wie die Förderprogramme für gewerbliche Nichtwohngebäude.

d) Steuerliche Förderung Gebäudesanierung

Mit dem Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 im Steuerrecht vom 21.12.2019 sowie der Energetischen Sanierungsmaßnahmen-Verordnung (ESanMV) vom 02.01.2020 wird eine steuerliche Förderung energetischer Sanierungsmaßnahmen eingeführt (§ 35c EStG). Die steuerliche Förderung ist zulässig für (in § 35c EStG abschließend aufgezählte) Einzelmaßnahmen (wie z. B. den Heizungstausch oder die Dämmung einzelner Bauteile der Hüllfläche eines Gebäudes) in zu eigenen Wohnzwecken genutzten Wohnungen und Wohngebäuden. Steuerlich gefördert werden sowohl Einzelmaßnahmen als auch die Möglichkeit einer ggf. schrittweisen, durch mehrere Einzelmaßnahmen verwirklichten umfassenden Sanierung, z. B. aufgrund eines Sanierungsfahrplanes (Gesamtsanierung). Im Jahr 2020 wird die steuerliche Förderung alternativ zu den bestehenden KfW-Förderprogrammen (CO₂-Gebäudesanierungsprogramm, EBS KfW-Programme) und dem Marktanzreizprogramm (MAP) eingeführt, d.h. Gebäudeeigentümer müssen sich entscheiden, welche Fördermöglichkeit sie in Anspruch nehmen. Ab dem 1.1.2021 läuft die steuerliche Förderung alternativ zur Bundesförderung für effiziente Gebäude. Die Förderung erfolgt in Form eines progressionsunabhängigen Abzugs der Steuerschuld (also unabhängig vom Einkommen) über einen Zeitraum von drei Jahren. Abzugsfähig sind 20 % der Aufwendungen für die energetischen Maßnahmen bei einer Begrenzung des Förderbetrags auf maximal 40.000 €. Aufwendungen für einen Energieberater können mit 50 % begünstigt werden. Förderfähig sind Sanierungsmaßnahmen, mit denen nach dem 1.1.2020 begonnen wurde. Voraussetzung ist zudem, dass das begünstigte Objekt im Zeitpunkt der Durchführung der Sanierungsmaßnahme älter als zehn Jahre ist. Förderfähig sind Wärmedämmmaßnahmen an Wänden, Dachflächen und Geschossdecken, die Erneuerung der Fenster oder Außentüren, 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 die ESanMV fest.

Tabelle 61: Steuerliche Förderung Gebäudesanierung

Fördertatbestände	Abzugsfähige Investitionskosten	Maximale Förderung
KfW-Einzelmaßnahmen insgesamt; davon:	20 %	40.000 €
im Jahr des Abschlusses der Maßnahme	7 %	14.000 €
im nächsten Jahr	7 %	14.000 €
im übernächsten Jahr	6 %	12.000 €

Quelle: Eigene Darstellung

e) Marktanzreizprogramm (MAP)

Das MAP wird ebenfalls mit den anderen finanziellen Förderprogrammen für den Gebäudebereich in der BEG zusammengeführt (siehe b)).

Mit dem MAP werden Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien für die Wärme- und Kältebereitstellung sowie bestimmte Wärmespeicher und Nahwärmenetze gefördert, sowohl in Wohn- als auch in Nichtwohngebäuden. Dabei sind fast ausschließlich Anlagen im Gebäudebestand förderfähig, Anlagen in Neubauten nur in Ausnahmefällen (innovative Anlagentypen). Die Einzelheiten der MAP-Förderung sind in den Förderrichtlinien vom 30. Dezember 2019⁷¹ spezifiziert. Dies umfasst insbesondere auch die technischen Mindestanforderungen, die hier im Detail nicht dargestellt werden. Das Programm umfasst zwei Förderteile: Für kleinere Anlagen werden über das BAFA Investitionszuschüsse gewährt. Förderfähig sind hier Solarkollektoranlagen, Biomasseanlagen und effiziente Wärmepumpen. Für größere Anlagen vergibt die KfW im Rahmen des KfW-Programms „Erneuerbare Energien – Premium“ zinsgünstige Darlehen inkl. Tilgungszuschüsse. In diesem Teil sind große Solarthermieanlagen, Biomasseheiz(kraft)werke, große effiziente Wärmepumpen, Biogasleitungen, Tiefengeothermieanlagen, Nahwärmenetze für Wärme aus erneuerbaren Energien und große Wärmespeicher für Wärme aus erneuerbaren Energien förderfähig. Die Zuordnung dieses Teils des Förderprogramms erfolgt im Bereich des Umwandlungssektors (Strom/Fernwärme). Förderberechtigt sind alle Gebäudeeigentümer bzw. Anlagenbetreiber (Contractoren) bis auf Einrichtungen des Bundes und der Bundesländer. Tabelle 62 zeigt die Fördersätze für die EE-Wärmeerzeuger und Hybrid-systeme im MAP-Teil BAFA.

Tabelle 62: Angepasste Fördersätze Marktanzreizprogramm Teil BAFA

Technologien	Investitionszuschuss
Biomasseanlagen	35 %
Wärmepumpen	35 %

⁷¹ https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/richtlinien-erneuerbare-energien-dez-2019.pdf;jsessionid=36B3DC2AED62811D5449FA5089DEDA37?_blob=publicationFile&v=4

Solarthermieranlagen	30 %
Gas-Hybridheizung ⁷²	30 %
Renewable Ready Gas Brennwert ⁷³	20 %
Austauschprämie Ölheizung (zusätzlicher Förderbetrag bei Austausch einer Ölheizung gegen eine Biomasseanlage, Wärmepumpe oder Gashybridheizung)	10 %

Quelle: Eigene Darstellung

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 sowie im Zuge des 2. Nachtragshaushalts 2020 und weiteren internen Umschichtungen stehen für das MAP im Jahr 2020 rd. 3 Mrd. € für Neuzusagen bereit. Im Jahr 2021 wird das MAP dann in der neuen Bundesförderung für effiziente Gebäude aufgehen.

f) Mini-KWK-RL (NKI)*

Dezentrale KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis einschließlich 20 kW werden über das BAFA mit Investitionszuschüssen gefördert. Die Förderbeträge wurden letztmalig zum 1.1.2015 erhöht und betragen je nach Leistungsstufe zwischen 10 und 1.900 € pro kW_{el}. Bei besonders effizienten Mini-KWK-Anlagen besteht die Möglichkeit, neben der schon erwähnten Basisförderung zusätzlich einen Wärmeeffizienzbonus (25 % der Basisförderung, wenn ein Abgaswärmetauscher zur Brennwertnutzung integriert ist) bzw. Stromeffizienzbonus (60 % der Basisförderung für Anlagen mit besonders hohen elektrischen Wirkungsgraden) zu erhalten. Das Programm wird zum 31. Dezember 2020 eingestellt.

g) Zuschuss Brennstoffzelle

Die Zuschussförderung für Brennstoffzellenheizung wird seit Sommer 2016 durch Mittel des APEE bereitgestellt. Die Administration der Förderung erfolgt über das KfW-Programm 433⁷⁴. Gefördert werden Brennstoffzellenheizung in der Leistungsklasse 0,25 bis 5 kW elektrisch in neuen oder bestehenden Wohn- oder Nichtwohngebäuden. Die maximale Förderung beträgt 28.200 € und setzt sich zusammen aus einem Festbetrag von 5.700 € und einer leistungsabhängigen Förderung von 450 € pro 100 W elektrischer Leistung

h) Förderprogramm Heizungsoptimierung

Das Förderprogramm Heizungsoptimierung fördert den Austausch und die Installation von hocheffizienten „Umwälz- und Zirkulationspumpen“ für die Heizung oder die Warmwasserversorgung im Gebäudebereich; ferner den hydraulischen Abgleich des Heizungsverteilsystems sowie evtl. ergänzende niedriginvestive Maßnahmen, sofern diese Maßnahmen durch einen Fachbetrieb ausgeführt werden. Im Jahr 2021 wird das Programm in der neuen Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) aufgehen.

i) Förderung der seriellen Sanierung

Die Maßnahme zielt darauf ab, 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 eigenerzeugungem

⁷² Der EE-Wärmeerzeuger muss mindestens 25 % der Heizlast decken. Berechnung der Heizlast bei Solarthermie: 635 W / m²

⁷³ Gas-Brennwertkessel mit Regelungs- und Steuertechnik, die eine spätere Einbindung erneuerbarer Energien ermöglicht. Die Umrüstung auf eine Hybridheizung muss spätestens 2 Jahre nach Installation des Gas-Brennwertkessels erfolgen.

⁷⁴ [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Soziale-Organisationen-und-Vereine/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-\(433\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Soziale-Organisationen-und-Vereine/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-(433)/)

Strom. Projekte zur seriellen Sanierung können eine mit der BEG kombinierbare, zusätzliche finanzielle Förderung erhalten. Mit Hilfe der Förderung soll es gelingen, Modellprojekte und Prototypen in den Sanierungsmarkt zu überführen. Im EKF sollen zwischen 2020 und 2024 knapp 0,6 Mrd. € bereitgestellt werden.

j) Änderungen beim Wohngeld und bei Mietnebenkosten

Zur Vermeidung sozialer Härten bei steigenden Heizkosten werden seit Januar 2021 durch das Wohngeld-CO₂-Bepreisungsentlastungsgesetz (WoGCO₂BepEntlG) Wohngeldbezieher durch eine Erhöhung der Wohngeldausgaben um 10 % unterstützt. Die Unterstützung erfolgt in Form eines von der Anzahl der Personen abhängigen Zuschlags auf die zu berücksichtigende Miete oder Belastung, der in die Wohngeldberechnung eingeht und zu einem höheren Wohngeld führt. Darüber hinaus hat die Bundesregierung am 12. Mai 2021 beschlossen, die Umlagefähigkeit der CO₂-Bepreisung auf 50 % 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.

7.2.2.2 Ordnungsrecht

k) Gebäudeenergiegesetz (GEG)

Der Deutsche Bundestag hat am 18. Juni 2020 das GEG beschlossen, der Bundesrat hat das Gesetz am 3. Juli 2020 durch Beschluss bestätigt. Das GEG ist am 1. November 2020 in Kraft getreten. Es schafft ein neues, einheitliches, aufeinander abgestimmtes Regelwerk für Gebäudeenergieeffizienz und die Nutzung von Wärme aus erneuerbaren Energien.

Das GEG führt die Bestimmungen des Energieeinsparungsgesetzes (EnEG), der Energieeinsparverordnung (EnEV) und des Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz (EEWärmeG) zusammen. Es regelt u. a. die energetischen Mindestanforderungen an Neubauten sowie an Bestandsgebäude im Falle einer umfassenden Sanierung. Die Anforderungen gelten dabei sowohl für Wohn- als auch für Nichtwohngebäude, sofern diese regelmäßig geheizt oder gekühlt werden.

Mit dem GEG werden die europäischen Vorgaben zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden umgesetzt und die Regelung des Niedrigstenergiegebäudes in Form der bestehenden Neubauanforderungen in das vereinheitlichte Energieeinsparrecht integriert. Das aktuelle energetische Anforderungsniveau für Neubauten und Sanierung wird beibehalten und nicht verschärft.

Der jeweilige maximale Jahres-Primärenergiebedarf eines zu errichtenden Gebäudes ist auf der Grundlage des Referenzgebäudeverfahrens zu berechnen. Maßgeblich für den höchstzulässigen Jahres-Primärenergiebedarf eines zu errichtenden Gebäudes ist der Wert eines Referenzgebäudes gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung wie das zu errichtende Gebäude. Die technische Ausführung des Referenzgebäudes ist im Gesetz beschrieben.

Ferner ist der Höchstwert des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlustes bestimmt, den ein zu errichtendes Wohngebäude beim baulichen Wärmeschutz nicht überschreiten darf. Bei Nichtwohngebäuden ist die Mindestqualität der Gebäudehülle durch Höchstwerte der mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche geregelt.

Bei bestimmten Sanierungsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden sind energetische Mindestanforderungen an die Qualität (U-Werte) des jeweiligen Außenbauteils, das Gegenstand des Austausches oder der Renovierung ist (Bauteilverfahren), festgelegt. Alternativ zum Bauteilverfahren gelten bei Sanierungen von Bestandsgebäuden die Anforderungen auch dann als erfüllt, wenn das geänderte

Gebäude den Jahres-Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes um nicht mehr als 40 % überschreitet und dabei bestimmte, im Gesetz festgelegte Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz eingehalten werden (sogenannte 140 Prozent-Regel).

Gebäudeeigentümer dürfen ihre Heizkessel, die mit einem flüssigen oder gasförmigen Brennstoff beschickt werden, die vor dem 1. Januar 1991 eingebaut worden sind bzw. nach Ablauf von 30 Jahren nach Einbau oder Aufstellung nicht mehr betreiben. Brennwert- und Niedertemperaturkessel sind von der Austauschpflicht ausgenommen. Ausnahmen gelten zudem für selbstgenutzte Ein- und Zweifamilienhäuser.

Normiert wurde zudem eine Regelung zur Einschränkung des Einbaus neuer Ölheizungen ab dem Jahr 2026 nach den Maßgaben in den Eckpunkten für das Klimaschutzprogramm 2030. Hybridlösungen im Sinne einer Kombination von Ölheizungen mit der anteiligen Nutzung erneuerbarer Energien sind weiterhin erlaubt. Eine Härtefallregelung stellt sicher, dass Betroffene, insbesondere in ländlichen Regionen – wo Erdgas und Fernwärme nicht verfügbar ist – finanziell nicht überfordert werden. Eine entsprechende Regelung gilt ab 2026 gleichermaßen zur Einschränkung des Einbaus von neuen Heizkesseln, die mit festen fossilen Brennstoffen befeuert werden.

Des Weiteren sind Anforderungen an die Nutzung erneuerbarer Energien zur Deckung des Wärme- und Kälteenergiebedarfs und deren Umfang bei zu errichtenden Gebäuden sowie bei der grundlegenden Renovierung von Bestandsgebäuden der öffentlichen Hand (Vorbildfunktion) festgelegt, und es wird bestimmt, mit welchen Ersatzmaßnahmen anstelle der Nutzung erneuerbarer Energien die Anforderungen erfüllt werden können. Neu ist, dass die o. g. Nutzungspflicht von erneuerbaren Energien künftig auch durch die Nutzung von gebäudenah erzeugtem Strom aus erneuerbaren Energien erfüllt werden kann.

Neu eingeführt wurde eine befristete Innovationsklausel. Diese ermöglicht insbesondere, über eine Befreiung bei der zuständigen Behörde die nach dem GEG erforderlichen Anforderungen anstelle über den zulässigen Jahres-Primärenergiebedarf über ein auf die Begrenzung der Treibhausgasemissionen fokussiertes System nachzuweisen, soweit die Gleichwertigkeit der Anforderungen gegeben ist.

Eingeführt wird zudem ein neues gleichwertiges Verfahren zum Nachweis der Einhaltung der energetischen Anforderungen bei der Errichtung von Wohngebäuden (sogenanntes Modellgebäudeverfahren für Wohngebäude).

Im Falle des Verkaufs und bei bestimmten größeren Sanierungen von Ein- und Zweifamilienhäusern ist ein informatorisches Beratungsgespräch mit einer zur Ausstellung von Energieausweisen berechtigten Person zu führen, wenn ein solches Beratungsgespräch als einzelne Leistung unentgeltlich angeboten wird.

Mit dem GEG wurde der Vollzug bei Neubauten und bestimmten größeren Sanierungen im Gebäudebestand durch Einführung einer sogenannten Erfüllungserklärung verbessert.

Ebenfalls entsprechend den Beschlüssen im Klimaschutzprogramm 2030 wurde im GEG eine Klausel zur Überprüfung der energetischen Mindestanforderungen an Neubauten und Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand verankert. Die Überprüfung wird nach Maßgabe des geltenden Wirtschaftlichkeitsgebots und unter Wahrung des Grundsatzes der Technologieoffenheit erfolgen. Die federführenden Ressorts werden nach Maßgabe der Ergebnisse der Überprüfung innerhalb von sechs Monaten nach Abschluss der Überprüfung einen Vorschlag zu Weiterentwicklung vorlegen. Die Bezahlbarkeit des Bauens und Wohnens ist ein zu beachtender wesentlicher Eckpunkt.

l) Mietrecht

Mit dem am 1. Januar 2019 in Kraft getretenen Gesetz zur Ergänzung der Regelungen über die zulässige Miethöhe bei Mietbeginn und zur Anpassung der Regelungen über die Modernisierung der Mietsache vom 18. Dezember 2018 (Mietrechtsanpassungsgesetz - BGBl. S. 2648) sind die Vereinbarungen aus dem Koalitionsvertrag zum Thema Modernisierung der Mietsache, einschließlich der Mieterhöhung nach Modernisierung, umgesetzt worden. Die Regelung enthält im Kern drei Neuerungen:

- ▶ Die Möglichkeit, die Kosten einer Modernisierung durch Erhöhung der jährlichen Miete auf die Mieter umzulegen (sogenannte "Modernisierungsumlage"), wurde von elf auf acht Prozent jährlich gesenkt.
- ▶ Es gilt eine Kappungsgrenze für die Erhöhung der Miete nach Modernisierung. Die monatliche Miete darf aufgrund von Modernisierungen nun nur um höchstens drei € pro Quadratmeter Wohnfläche innerhalb von sechs Jahren steigen. Beträgt die monatliche Miete vor der Mieterhöhung weniger als sieben € pro Quadratmeter, darf sie sich lediglich um höchstens zwei € pro Quadratmeter innerhalb von sechs Jahren erhöhen.
- ▶ Insbesondere im Hinblick auf private Kleinvermieter wurde ein vereinfachtes Verfahren für kleinere Modernisierungsmaßnahmen (Kosten in Höhe von bis zu 10.000 € pro Wohnung innerhalb von fünf Jahren) eingeführt.

m) Umsetzung Ökodesign-RL und Energieverbrauchskennzeichnungs-RL für energieverbrauchsrelevante Produktgruppen

Siehe Beschreibung übergeordnete Maßnahmen (Abschnitt 4.2).

n) Vorbildfunktion Bundesgebäude

In Form eines Erlasses bzw. des Beschlusses des Bundeskabinetts für klimaneutrale Neu- und Erweiterungsbauten des Bundes soll verbindlich festgelegt werden, dass Neubauten des Bundes ab 2022 mindestens den Standard Effizienzgebäude_{Bund} (EGB) erreichen müssen. Ferner soll der Erlass auch verbindliche Sanierungsziele für bestehende Gebäude enthalten. Dazu ist es erforderlich, dass bei allen neuen großen Sanierungs- und Modernisierungsbauvorhaben mindestens ein EGB 55-Standard zu Grunde gelegt wird. Per Erlass soll für Bundesgebäude zudem eine jährliche Sanierungsrate festgelegt werden. Die Ressortabstimmung des Entwurfs als auch der Beschluss durch die Bundesregierung standen im April 2021 noch aus.

7.2.2.3 Flankierende und informatorische Instrumente

o) Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen

Ziel der Maßnahme ist es, die Motivation der Gebäudeeigentümer zum Austausch alter ineffizienter Heizungsanlagen zu fördern und damit die Austauschrate zu erhöhen. Das Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz berechtigt Heizungsinstallateure, Schornsteinfeger sowie bestimmte Energieberater seit 2016, entsprechende Energielabel anzubringen. Die Bezirksschornsteinfeger sind ab 2017 verpflichtet, im Rahmen ihrer regelmäßigen Überwachung, Energielabel an Heizkessel anzubringen, die älter als 15 Jahre sind. Mit dem Energielabel wird der Heizkessel einer bestimmten Energieeffizienzklasse zugeordnet und die Eigentümer erhalten Informationen über Energiekosteneinsparungen und Hinweise zu weiterführenden Energieberatungsangeboten (z. B. „Energieberatung für Wohngebäude (Vor-Ort-Beratung, individueller Sanierungsfahrplan)“, etc.).

p) Energieausweis

Die Bestimmungen zum Energieausweis werden im GEG (s.o.) geregelt. Der Energieausweis ist eine wichtige informatorische Maßnahme. Er dient ausschließlich der Information über die energetische Qualität von Gebäuden und soll einen überschlägigen Vergleich von Gebäuden ermöglichen. Das Instrument des Energieausweises ist bereits in der bisherigen Energieeinsparverordnung enthalten. Um die Qualität der Energieausweise zu verbessern, wurden strengere Sorgfaltspflichten für Aussteller von Energieausweisen festgelegt. Neu ist des Weiteren, dass die sich aus dem Primärenergiebedarf oder Primärenergieverbrauch ergebenden Kohlendioxidemissionen eines Gebäudes künftig zusätzlich in Energieausweisen anzugeben sind. Damit enthält der Energieausweis zusätzliche Informationen, die die Klimawirkung berücksichtigen.

q) Diverse Informationsdienste wie „Deutschland macht's effizient“, der Deutschen Energie-Agentur (dena) oder dem Informationszentrum für zukunftsgerechtes Bauen

Die im Mai 2016 bundesweit gestartete Informationsoffensive „Deutschland macht's effizient“ zielt darauf ab, Privathaushalte, Unternehmen und Kommunen für Aktivitäten im Bereich der Energieeffizienz zu motivieren. Die Informationsoffensive besteht dabei aus zwei Elementen, einer emotionalen Dachkampagne und der zielgruppenscharfen Ansprache und Motivation der Energieverbraucherinnen und -verbraucher. Die Deutsche Energie-Agentur (dena) informiert private Haushalte und Unternehmen seit dem Jahr 2002 über Maßnahmen und Hintergründe der effizienten und rationellen Energieverwendung von Strom sowie über die Möglichkeiten des Einsatzes erneuerbarer Energien in Gebäuden, über Elektromobilität und effiziente Energiesysteme. Das innovative Modellvorhaben Effizienzhaus Plus des Bundes in Berlin wirbt seit 2016 als Informations- und Kompetenzzentrum für zukunftsgerechtes Bauen (IKzB) für den klimafreundlichen Wandel im Gebäudebereich. Als Dialog-, Beratungs- und Informationsplattform stimmt es mit einem analogen und digitalen Informations- und Veranstaltungsprogramm gezielt ein auf die Umsetzung der Energie- und Klimaziele im Gebäudebereich.

r) Bundesförderung für Energieberatung

- Energieberatung für Wohngebäude (Vor-Ort-Beratung, individueller Sanierungsfahrplan)

Die Bundesregierung fördert für Wohngebäude die Erstellung gebäudeindividueller Sanierungsfahrpläne (iSFP) und vergleichbarer Energieberatungsberichte über die „Energieberatung für Wohngebäude (Vor-Ort-Beratung, individueller Sanierungsfahrplan)“. Die Beratung verfolgt das Ziel, für ein einzelnes Gebäude eine auf die individuelle Situation des Gebäudes zugeschnittene Sanierungsstrategie zu entwickeln und zu vermitteln. Sanierungsfahrpläne schaffen somit Orientierung und Transparenz über die aus technischer und wirtschaftlicher Sicht sinnvolle zeitliche Abfolge energetischer Modernisierungsmaßnahmen, wobei die individuelle Situation des Gebäudeeigentümers – Alter, finanzielle Mittel etc. – berücksichtigt wird. Für den einzelnen Investor wird damit auch herausgearbeitet, wie energetische Modernisierungsmaßnahmen an ohnehin anstehende Instandhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen gekoppelt werden können.

Konkret wird im Rahmen der Beratung aufgezeigt, wie ein Wohngebäude Schritt für Schritt über einen längeren Zeitraum durch aufeinander abgestimmte Maßnahmen umfassend energetisch saniert werden kann, oder wie durch eine umfassende Sanierung ein energetisches Niveau zu erreichen ist, welches einem der KfW-Effizienzhausstandards entspricht. Die Förderhöhe des Bundesprogramms wurde im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 auf 80 % des förderfähigen Beratungshonorars angehoben. Die maximale Förderhöhe liegt bei 1.300 € bei Ein- und Zweifamilienhäusern sowie

1.700 € bei Mehrfamilienhäusern.⁷⁵ Die Energieberater haben sich durch Selbsterklärung gegenüber dem BAFA zu verpflichten, hersteller-, anbieter-, produkt- und vertriebsneutral zu beraten.

- Weitere Maßnahmen zur Energieberatung privater Haushalte (z. B. Verbraucherzentralen)

Die Bundesregierung fördert Energieberatungen für Privatpersonen, die durch den Verbraucherzentrale Bundesverband (vzbv) und die Verbraucherzentralen der Länder durchgeführt werden. Durch regionale Kooperationen mit Kommunen und Energieagenturen sollen mehr Verbraucher auf die qualifizierte Energieberatung in den Beratungsstellen und die Energie-Checks durch den Energieberater „zu Hause“ (Basis-Check für Mieter, Gebäude-Check, Heiz-Check, Solarwärme-Check sowie Eignungs-Check-Heizung) aufmerksam gemacht werden.

- Energieberatung für Nichtwohngebäude, Anlagen und Systeme

Die Bundesregierung fördert die Energieberatung für die Sanierung und den Neubau von Nichtwohngebäuden über das Programm „Energieberatung für Nichtwohngebäude von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen“. Bei der Sanierungsberatung sollte – ähnlich wie bei der Vor-Ort-Beratung für Wohngebäude – entweder ein Vorschlag für die Sanierung eines Gebäudes (zeitlich zusammenhängend) z. B. zum Effizienzhaus (Komplettsanierung) oder für eine umfassende Sanierung auf der Basis von aufeinander abgestimmten Einzelmaßnahmen (Sanierungsfahrplan) enthalten sein. Dabei kann es sich auch um kurzfristig umsetzbare Energiesparmaßnahmen, z. B. die Modernisierung der Anlagentechnik und Optimierung des Gebäudebetriebs, handeln. Die Neubauberatung soll die Kommunen bei der Umsetzung des ab dem Jahr 2019 geltenden Niedrigstenergiegebäudestandards unterstützen (191 k). Die „Energieberatung für Nichtwohngebäude von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen“ wird mit der „Energieberatung im Mittelstand“ und der Contracting-Orientierungsberatung zu Januar 2021 im Förderprogramm „Energieberatung für Nichtwohngebäude, Anlagen und Systeme“ (EBN) zusammengelegt und dabei teilweise auch auf private Eigentümer ausgeweitet.⁷⁶ Die Förderung umfasst u. a. weiterhin die Beratung zur DIN 16247 (Energieaudit) sowie zur DIN 18599. Der Fördersatz wurde im Rahmen des Klimaschutzprogramms auf 80 % angehoben.

s) KfW Energetische Stadtsanierung – Programmnummern 432/201/202

Das Programm „Energetische Stadtsanierung – Klimaschutz und Klimaanpassung im Quartier“ besteht aus den Programmteilen KfW 432 (Kommunale und soziale Infrastruktur) sowie KfW 201/202 (Quartiersversorgung). Mit dem Programm KfW 432 werden finanzielle Zuschüsse für die Erstellung integrierter Quartierskonzepte für energetische Sanierungsmaßnahmen erteilt. Diese umfassen Maßnahmen zur Energieeinsparung, -speicherung und -gewinnung sowie zur Wärmeversorgung. Des Weiteren sind die Kosten für umsetzungsbegleitendes Sanierungsmanagement für eine Dauer von maximal fünf Jahren förderfähig. Förderanträge können durch kommunale Gebietskörperschaften gestellt werden. Bewilligte Zuschüsse für die Erstellung von Quartierskonzepten und das Sanierungsmanagement können jedoch zur Umsetzung auch an privatwirtschaftliche oder gemeinnützige Akteure weitergegeben werden. Darüber hinaus werden mit dem KfW-Programm „Quartiersversorgung“ (KfW 201, 202) zinsgünstige Darlehen und Tilgungszuschüsse für energieeffiziente Investitionen in die quartiersbezogene Infrastruktur, z. B. in den Bereichen Wärme- und Kälteversorgung, Wasserver- und Abwasserentsorgung sowie grün-blaue Infrastruktur vergeben. Antragsberechtigt

⁷⁵ Richtlinie über die Förderung der Energieberatung für Wohngebäude (Vor-Ort-Beratung, individueller Sanierungsfahrplan) vom 28. Januar 2020 (<https://www.bundesanzeiger.de/pub/de/amtlicher-teil?0-1.-table~panel~at-row-0-publication~info~cell-result~link&edition=BAanz+AT+04.02.2020>).

⁷⁶ Richtlinie „Energieberatung für Nichtwohngebäude, Anlagen und Systeme“ (EBN) vom 13. November 2020 (<https://www.bundesanzeiger.de/pub/de/amtlicher-teil?3-1.-table~panel~at-row-2-publication~info~cell-result~link&year=2020&edition=BAanz+AT+11.12.2020>).

sind kommunale Gebietskörperschaften und kommunale Unternehmen mit mindestens 50-prozentigem Hintergrund sowie Investor-Betreiber-Modelle.

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 wurde eine Ausweitung des Förderprogramms beschlossen. Diese wurde zum 1. April 2021 umgesetzt. Die Förderung wurde auf neue Fördertatbestände, insbesondere im Bereich nachhaltige Mobilität, Digitalisierung und grün-blaue Infrastruktur ausgeweitet. Außerdem wurden die Förderkonditionen verbessert.

t) Forschung, Entwicklung und Demonstration für energieeffiziente Gebäude und Quartiere

Energieeffiziente Gebäude und Quartiere stellen einen Schwerpunkt in der Projektförderung der Bundesregierung dar. Im Hinblick auf das für das Jahr 2050 avisierte Klimaziel Treibhausgasneutralität treibt auch die Bundesregierung die Forschung zu Strategien und Konzepten für nachhaltiges Bauen weiter voran. Die Förderung bezieht sich hierbei auf die gesamte Wertschöpfungskette im Baubereich und schließt auch konkrete Vorhaben, z. B. zum Standard „Effizienzhaus Plus“, mit ein. Auch der Wissenstransfer aus der Bauforschung in die Praxis ist hierin enthalten. Das ehemalige Modellvorhaben Effizienzhaus Plus des Bundes steht seit Ende 2017 in neuer Funktion als "Informations- und Kompetenzzentrum für zukunftsgerechtes Bauen" Interessierten zur Verfügung.⁷⁷ Anschaulich vermittelt das ehemalige Forschungs- und Modellvorhaben eine neue Generation von Gebäuden, die mehr Energie erwirtschaften als sie benötigen, und bietet unter dem Motto "Bauen der Zukunft Erleben, Informieren, Mitgestalten" einen versachlichten Informationstransfer zu Innovationen aus der Bauforschung.

Im Juli 2019 ist die Forschungsinitiative Zukunft Bau in das Innovationsprogramm Zukunft Bau übergegangen. Das Innovationsprogramm Zukunft Bau stellt eine Weiterentwicklung der im Jahr 2006 gestarteten Forschungsinitiative Zukunft Bau dar, aus der bisher mehr als 1.200 Forschungsprojekte und rund 70 Modellvorhaben hervorgegangen sind. Neuerungen gibt es insbesondere im Bereich der Zukunft Bau Forschungsförderung, die mit den neuen Forschungskategorien Grundlagenforschung, industrielle Forschung, experimentelle Entwicklung und Durchführbarkeitsstudien alle Stufen der Innovationsentwicklung bis hin zu marktnahen Tätigkeiten unterstützt. Der Förderaufruf für 2019 enthielt u. a. die Etablierung klima- und umweltfreundlicher Bauweisen als thematischen Schwerpunkt für einzureichende Forschungsprojekte. 2017, 2018 und 2019 wurden die ersten Neubauten und Sanierungsmaßnahmen im Förderprogramm für Modellvorhaben "Effizienzhaus Plus Bildungsbauten" erfolgreich fertiggestellt. Das Informations- und Kompetenzzentrum (IKzB) im bundeseigenen Modellvorhaben EP in Berlin dient weiterhin als analoge und digitale Dialogplattform für den Wissenstransfer aus der Bauforschung in die Praxis, wirbt für den Gebäudestandard EP des Bundes und baut Hemmnisse gegenüber diesem Thema gesamtgesellschaftlich ab.

Die Aktivitäten im Bereich der Bauforschung werden im Innovationsprogramm Zukunft Bau weiter ausgebaut. Die Etablierung klima- und umweltfreundlicher Bauweisen stellt dabei einen wichtigen Forschungsbereich dar. Es werden eine Vielzahl von Themen im Bereich der ökologischen Dimension des Nachhaltigen Bauens aufgerufen. 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 bildet die Stärkung der Robustheit und Resilienz von Gebäuden, die sowohl der Anpassung an Folgen des Klimawandels dienen als auch der verminderten Komplexität des Bauens.

u) Bildungsinitiative für Gebäudeeffizienz II - Programmbeitrag ESF

⁷⁷ <https://www.zukunftbau.de/effizienzhaus-plus/>

Im Rahmen des Europäischen Sozialfonds (ESF) hat BMU ein Förderprogramm zur gewerkeübergreifenden Qualifizierung in der energetischen Gebäudesanierung aufgelegt. Der Fokus liegt dabei auf informellen, außerschulischen und praktischen Angeboten für Auszubildende und Ausbildungspersonal. Programmschwerpunkt ist die Zusammenarbeit und die Schnittstellenkommunikation zwischen denjenigen Gewerken, die Gebäude klimaschonend und energiesparend planen, bauen und sanieren. Zwischen 2015 und 2018 wurden vier Projekte umgesetzt, zum 1. Januar 2019 konnten weitere 4 Projekte starten. Austausch und Transfer erfolgt in sogenannten Fachwerkstätten, die zwei Mal pro Jahr stattfinden. Die Projekte sind Teil eines größeren Programms zu beruflicher Bildung für nachhaltige Entwicklung, über das von 2015 - 2022 insgesamt 28 Projekte unterstützt werden.

v) Weiterentwicklung der Städtebauförderung (StBauF)

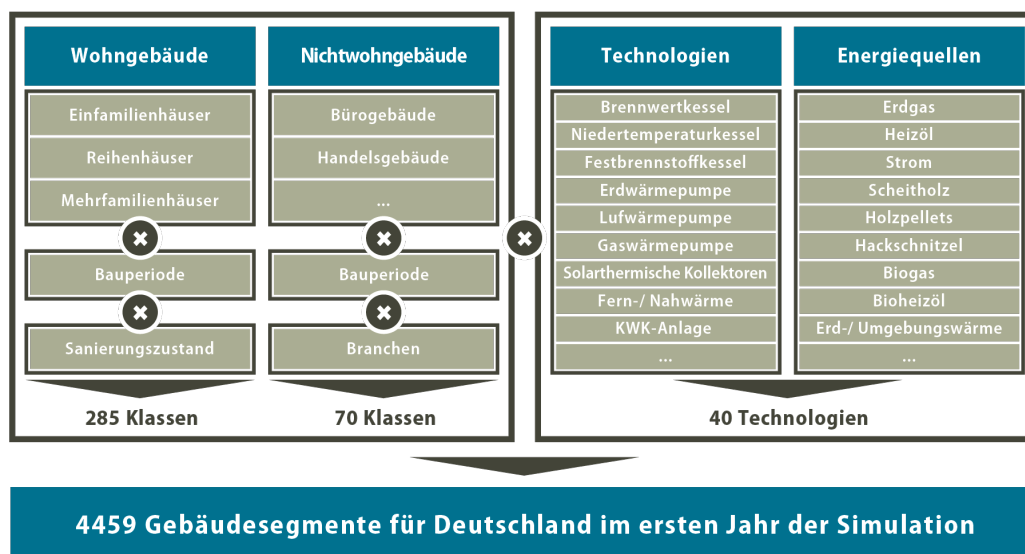
Im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 wurde auch die Weiterentwicklung der Städtebauförderung verankert. Mit der Weiterentwicklung der Städtebauförderung 2020 sind Maßnahmen zum Klimaschutz bzw. zur Anpassung an den Klimawandel im Rahmen der Städtebauförderung wesentlich verstärkt worden. Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen sind nunmehr explizite Fördervoraussetzung und zugleich als Querschnittsaufgabe in allen Programmen der Städtebauförderung förderfähig. Damit werden insbesondere städtebauliche Maßnahmen zur Verbesserung der grünen Infrastruktur adressiert, erfasst sind beispielsweise aber auch Maßnahmen der energetischen Gebäudesanierung, Nutzung klimaschonender Baustoffe oder klimafreundliche Mobilität. Als wichtige Elemente nachhaltiger Stadtentwicklung setzt die Städtebauförderung zudem Schwerpunkte bei der Entwicklung und Revitalisierung brachgefallener Flächen oder der besseren Vernetzung unterschiedlicher Nutzungen wie Wohnen, Arbeiten, Daseinsvorsorge und Kultur.

7.2.3 Annahmen und Parameter

Gebäudetypologische Abbildung von Referenzgebäuden und Wärmeversorgungstechnologien

Der Gebäudebestand der Sektoren private Haushalte und GHD in Deutschland wird im Modell sehr detailliert über Referenzgebäude abgebildet. Ein Referenzgebäude stellt die Verschneidung von Gebäudetyp, Baualter und Sanierungszustand sowie derzeit eingesetztem Heizungssystem entspricht (Abbildung 26) dar. Dies erlaubt die Berücksichtigung gebäude- und technikspezifischer Faktoren bei der Simulation der Technologiewahl auf einem sehr disaggregierten Niveau.

Abbildung 26: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab



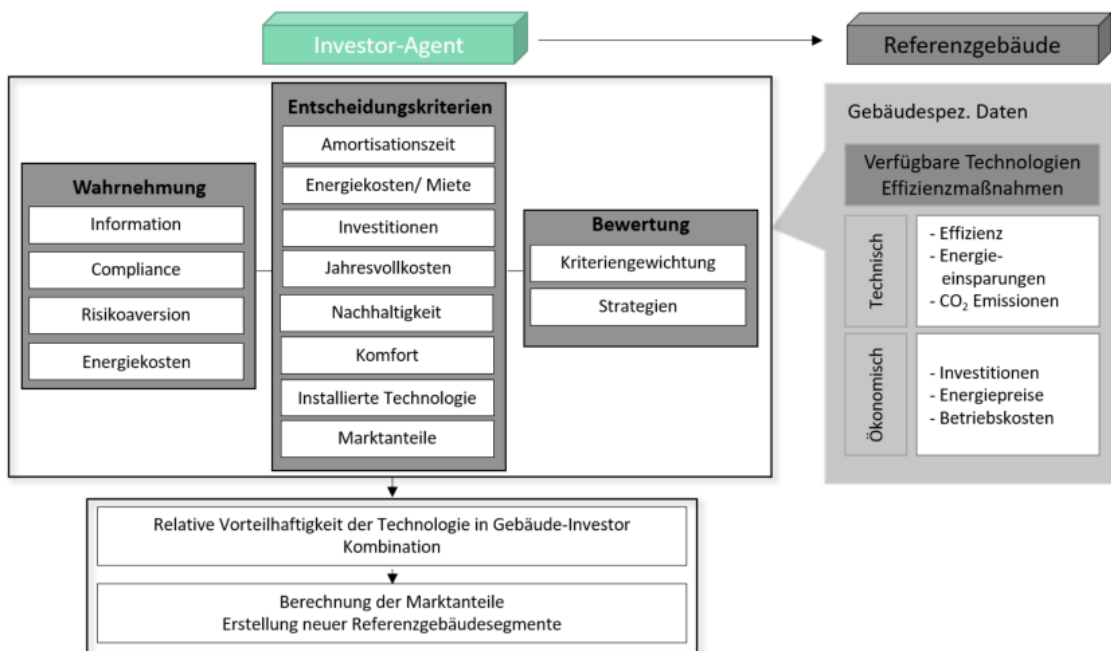
Quelle: Eigene Darstellung IREES

Derzeit werden 40 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 basiert auf den Erhebungen „Datenbasis Wohngebäude“ (Diefenbach et al. 2010) und deren Aktualisierung aus dem Jahr 2018 (Cischinsky und Diefenbach 2018). Die Gebäudetypologie von Nichtwohngebäuden basiert ursprünglich auf der Studie „Energieverbrauch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (Fraunhofer ISI et al. 2013). Der aus der Modellrechnung resultierende Energiebedarf ist auf die temperaturbereinigten Werte der Anwendungsbilanzen sowie der EE-Wärmebereitstellung nach AGEE-Stat kalibriert.

Modellierung von Investoren im Gebäudebereich

Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – *Selbstnutzende Eigentümer*innen*, *Private Vermieter*innen*, *Eigentümergeinschaften*, *Wohnungsbaugesellschaften*, *gewerbliche Gebäudebesitzer*innen*. Als Grundlage der Investitionsentscheidung werden verschiedene ökonomische und nicht-ökonomische Entscheidungskriterien definiert, die für jede Kombination von Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technologieoptionen individuell ermittelt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz werden als Eingangsdaten definiert, womit einerseits die Relevanz unterschiedlicher Entscheidungskriterien über Gewichte bestimmt werden, andererseits auch die Ausprägung der Kriterien beeinflusst werden. Somit wird sowohl die Art der Investitionsentscheidung – Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien – als auch die Wahrnehmung der Technologieoptionen und der damit verbundenen Parameterausprägungen unterschieden. Für jede zur Verfügung stehende Technologieoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet, auf deren Basis die Marktanteile mit einem *Nested-Logit-Modell* ermittelt werden.

Abbildung 27: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten

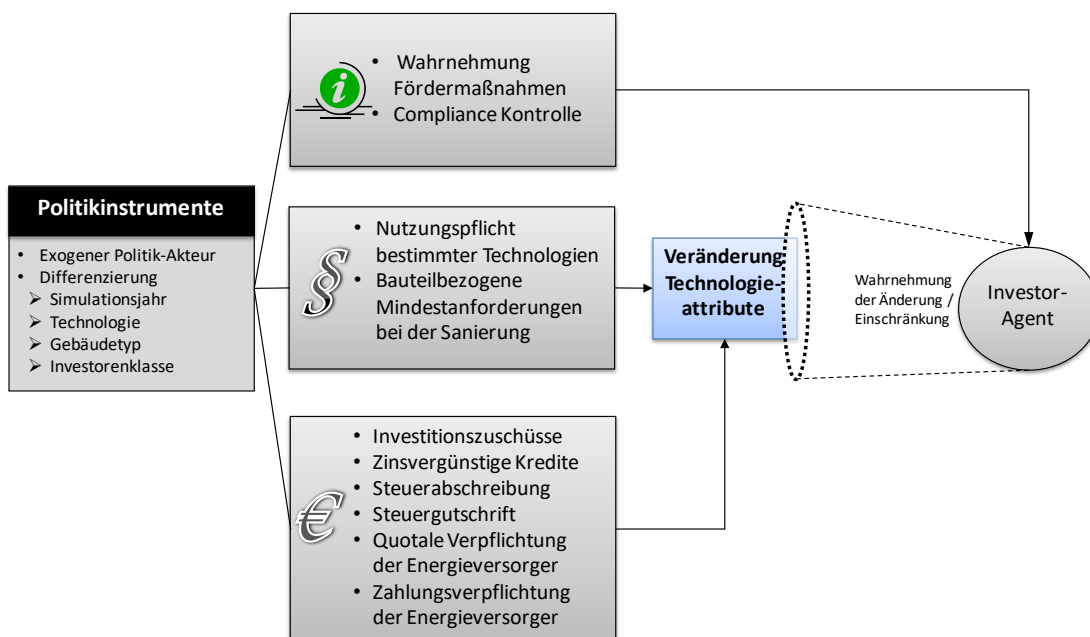


Quelle: Eigene Darstellung IREES

Modellierung von Politikinstrumenten

Um die Wirkung der Politikinstrumente auf die Investitionsaktivität in Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme zu untersuchen, werden diese explizit im Modell abgebildet. Dies geschieht als integrale Modellierung von Politikinstrumenten und Investoren, die eine akteurspezifische Untersuchung der Wirkungen der Instrumente ermöglichen (Abbildung 28).

Abbildung 28: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumente in Invert-Agenten



Quelle: (Steinbach 2015)

Berücksichtigung des Klimawandels

Bei der Berechnung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser im Gebäudesektor wird der Klimawandel in Form von steigenden Temperaturen berücksichtigt, da dieser bereits bis 2030 Auswirkungen auf den Heizbedarf hat.

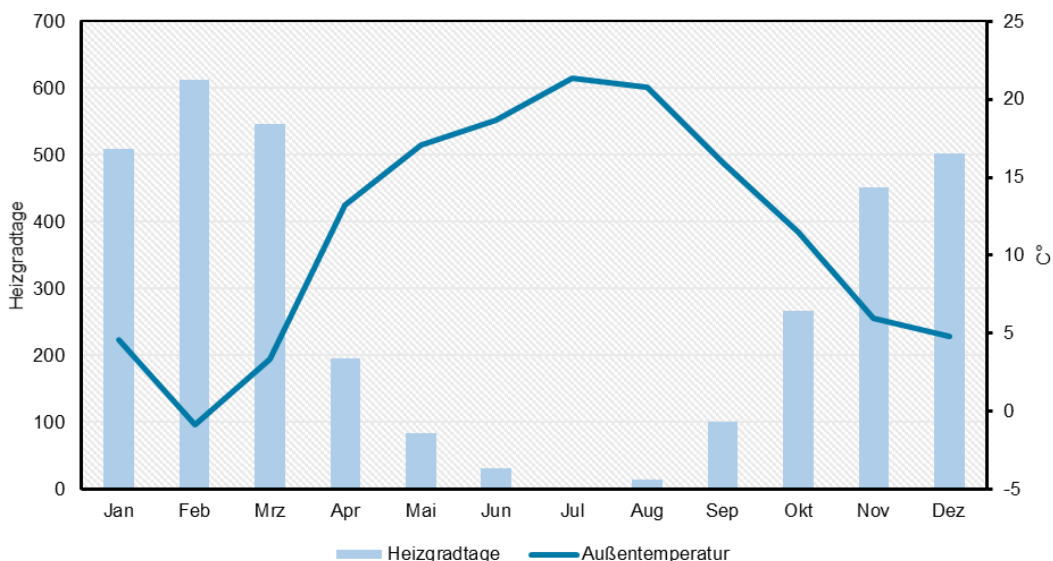
Für die Berechnung der Temperaturentwicklung werden die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Diese umfassen Daten für ein mittleres Jahr, sowie für einen extremen Sommer und Winter. Die Berechnung der Klimamodelle erfolgt auf Basis von repräsentativen Konzentrationspfaden (RCPs), die wiederum auf Annahmen über die Zunahme der Wärmestrahlung (in Watt) in Folge des Klimawandels und den zugehörigen Emissionspfaden basieren. Die Testreferenzjahre sind eine Kombination aus den Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Im Konzentrationspfad RCP 4.5 steigen die Treibhausgasemissionen bis 2050 und stabilisieren sich dann auf einem Niveau mit 650 ppm CO₂-Äq bei einem Temperaturanstieg von 1,8 bis 2°C bis 2100. Im Pfad RCP 8.5 mit einer Strahlung von 8,5 Watt pro Quadratmeter steigen die Treibhausgasemissionen dagegen kontinuierlich und verursachen bis 2100 eine Konzentration von 1370 ppm CO₂-Äq in der Atmosphäre und einen Temperaturanstieg von 4°C. Nach Aussage des DWD ist das RCP 8.5 Szenario nach aktuellen Entwicklungen realistischer. Da jedoch zunehmend Maßnahmen umgesetzt werden, um den anthropogenen Einfluss zu reduzieren, stellen die Zukunftsjahre des DWD eine Kombination aus den Konzentrationspfaden RCP 4.5 und RCP 8.5 dar (DWD 2017; Spinoni et al. 2018).

Nach aktuellen Berechnungen des Climate Action Tracker⁷⁸ wird durch die von berichtenden Staaten angestrebten Politikmaßnahmen eine Temperaturentwicklung von 2,7 bis 3,1 °C bis 2100 erreicht. Werden darüber hinaus die zugesagten Zielverpflichtungen der Staaten umgesetzt, kann die Temperaturerhöhung auf 2,4 °C bis 2100 begrenzt werden. Zur Berücksichtigung einer aus heutiger Sicht realistischen Temperaturänderung wird daher der Mittelwert der Testreferenzjahre von RCP 8.5 und RCP 4.5 angesetzt.

Zur Berechnung des Einflusses steigender Temperaturen auf den Endenergiebedarf in Invert/ee-Lab ist die Entwicklung der Heizgradtage entscheidend. Abbildung 29 zeigt den Mittelwert der hinterlegten Außentemperaturen und Heizgradtage in Deutschland für das Jahr 2018. Insgesamt ergeben sich 3.317 Heizgradtage.

⁷⁸ <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>

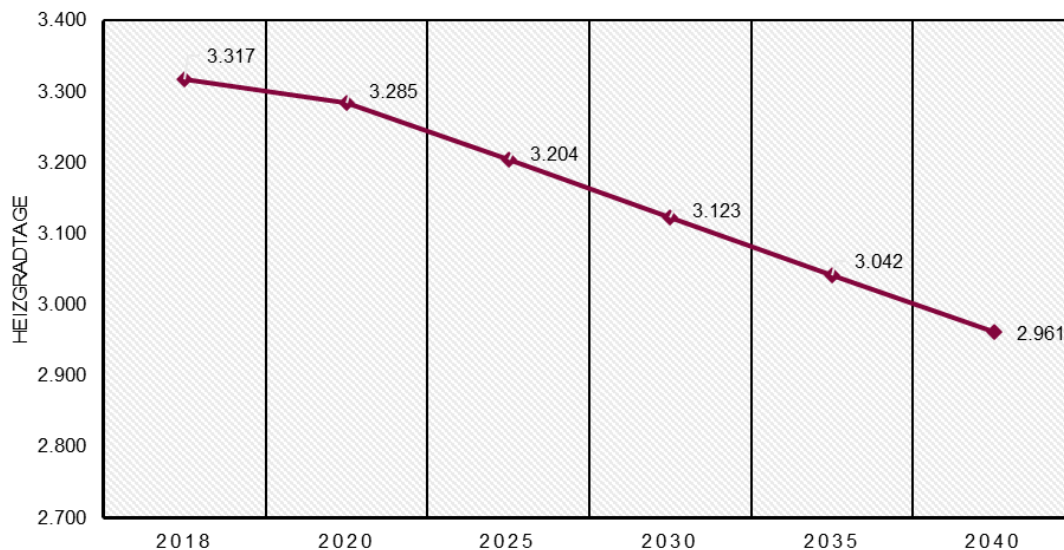
Abbildung 29: Mittelwerte der Außentemperatur und Heizgradtage in Deutschland nach Monaten im Jahr 2018



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Die Entwicklung der Heizgradtage bis 2040 resultiert aus den hinterlegten Konzentrationspfaden und der Temperaturentwicklung. Für die Berechnung wird die Temperaturentwicklung der Testreferenzjahre von 2015 bis 2045 in sechs deutschen Städten herangezogen und die Reduktion der Heizgradtage berechnet. Die Differenz aus der Summe der Heizgradtage, die sich für 2015 und 2045 ergibt, wird durch die Anzahl an Jahren dividiert, um die jährliche Reduktion der Heizgradtage zu erhalten. Durch den Anstieg der Temperaturen resultiert eine jährliche Reduktion der Heizgradtage um 16 Gradtage. Abbildung 30 zeigt die jährliche Entwicklung der Heizgradtage im Zeitraum 2018 bis 2040.

Abbildung 30: Entwicklung der Heizgradtage im Zeitraum 2018 bis 2040



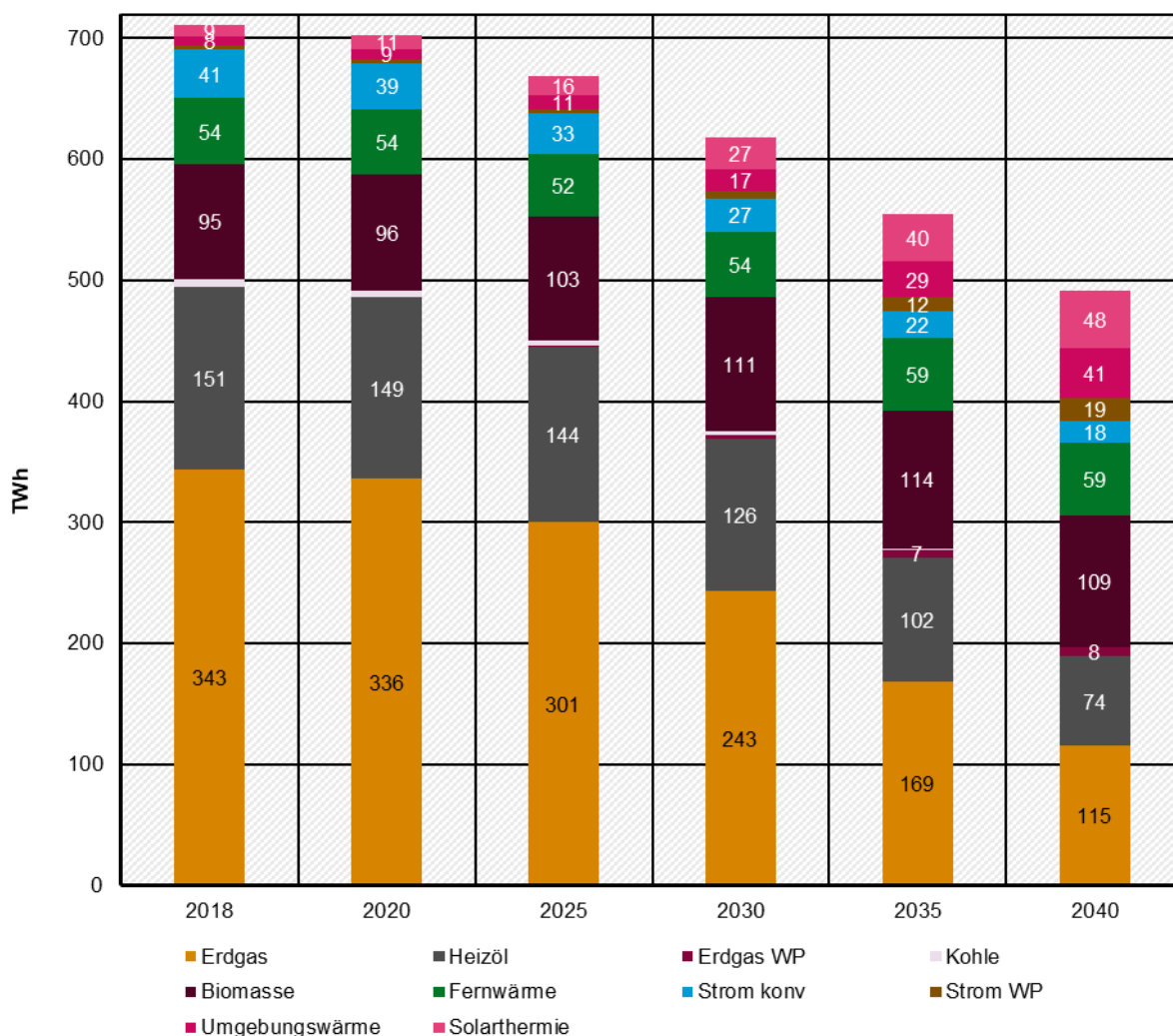
Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2017)

7.2.4 Ergebnisse

7.2.4.1 Entwicklung des Endenergieverbrauchs

Abbildung 31 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern. Der Endenergiebedarf reduziert sich im Zeitraum 2018 bis 2030 um 13 Prozent auf 618 TWh und bis 2040 um weitere 18 Prozent auf 492 TWh.

Abbildung 31: Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im MMS



Quelle: Eigene Darstellung, Werte für 2018 auf Basis von AGE B (2020)

Mit Bezug auf die eingesetzten Energieträger führen die simulierten Investitionsentscheidungen unter den angenommenen Rahmenbedingungen zur Energiepreisentwicklung zu einer Verschiebung von Erdgas zu Wärmepumpen (Umgebungswärme und Strom WP)⁷⁹ und Biomassekesseln⁸⁰. Auch der Anteil der kombinierten Anlagen mit Solarthermie wächst deutlich. Im Jahr 2040 erreicht Solar-

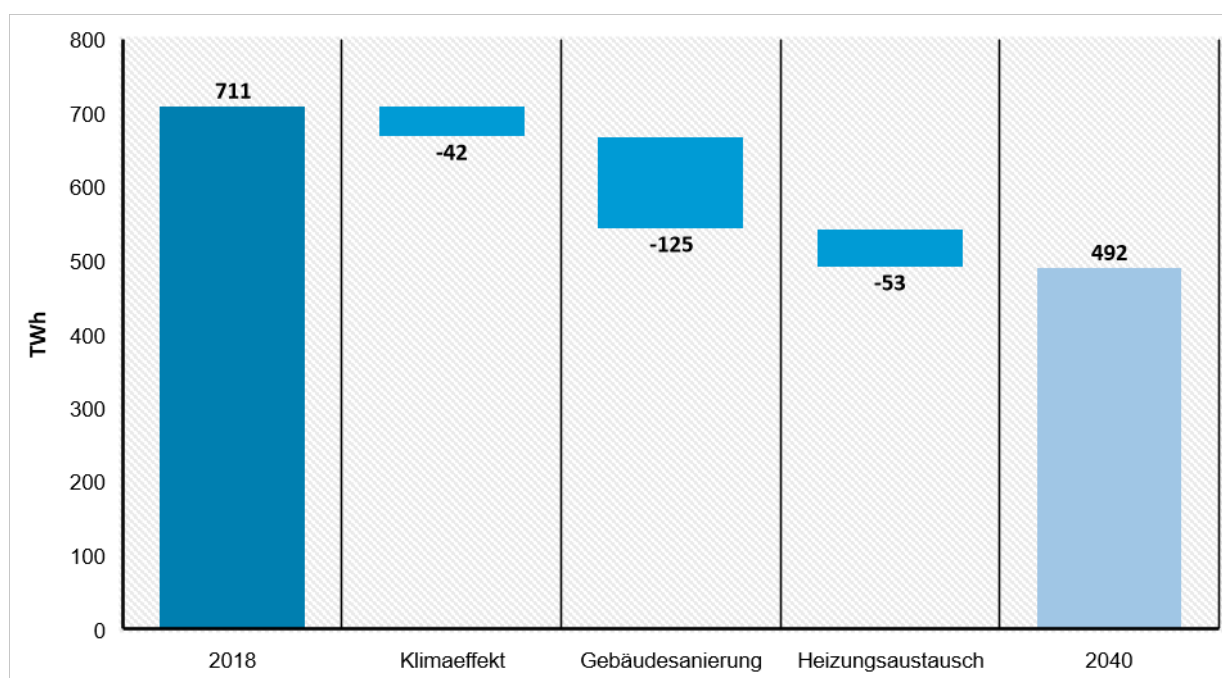
⁷⁹ Hier dargestellt ist die Endenergiebilanz, d.h. nur Umwelt- und Erdwärme aus dezentralen Wärmepumpen in Gebäuden. Tiefengeothermie über Wärmenetze fällt unter den Umwandlungssektor.

⁸⁰ Bei Biomassekesseln ist ein konstanter Anteil von 45 TWh für Holz-Einzelraumfeuerungen enthalten.

thermie mit 48 TWh rund 10 Prozent des Endenergiebedarfs. Der Anteil von Fernwärme steigt dagegen nur leicht. Im Jahr 2030 trägt Fernwärme mit 54 TWh zu 9 Prozent und im Jahr 2040 mit 59 TWh zu 12 Prozent zum Endenergiebedarf bei. Wärmepumpen (Strom-WP und Umgebungswärme) haben im Jahr 2030 mit 24 TWh einen Anteil von 4 Prozent, dieser steigt bis 2040 auf 60 TWh und damit auf rund 12 Prozent. Dezentrale EE-Wärme (Biomasse, Solarthermie und Umgebungswärme) erreicht in Summe bis 2030 einen Anteil von 25 Prozent und bis 2040 einen Anteil von 40 Prozent an der Wärmebereitstellung. Der Anteil fossiler Heizkessel mit Erdgas und Heizöl an der Wärmeerzeugung liegt im Jahr 2030 mit 243 TWh noch bei 60 Prozent und sinkt bis 2040 auf 115 TWh und erreicht einen Anteil von 38 Prozent.

Die Dekomposition der Endenergiebedarfsreduktion zwischen 2018 und 2040 ist in Abbildung 32 dargestellt. Eine nähere Betrachtung der Modellergebnisse zeigt, dass allein durch höhere durchschnittliche Temperaturen eine Einsparung von 42 TWh pro Jahr bis zum Jahr 2040 erreicht wird. Den größten Effekt erzielen jedoch die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle, die zu 125 TWh Einsparungen pro Jahr führen. Daneben wird auch durch den Wechsel des Wärmeversorgungssystems mit 53 TWh eine hohe Wirkung erzielt.

Abbildung 32: Einfluss von Klimaeffekt, Gebäudesanierung und Heizungsaustausch auf den Endenergiebedarf im MMS



Quelle: Eigene Berechnung IREES

Der im Modell angenommene Klimaeffekt in Form der sinkenden Heizgradtage hat Auswirkungen auf die Veränderung der durchschnittlichen Monatstemperaturen. Im Ausgangsjahr 2018 beträgt die durchschnittliche Temperatur 11,5 °C. Bis 2013 steigt diese auf 11,9 °C und bis 2040 auf 12,3 °C. Dabei sind die Veränderungen in den Wintermonaten deutlich größer als in den Sommermonaten.

7.2.4.2 Bewertung der Einzelmaßnahmen

Im Folgenden erfolgt die Bewertung einer Auswahl zentraler wirkmächtiger Politikinstrumente für den Gebäudebereich. Im MMS sind dies die unter dem Dach der Bundesförderung effiziente Gebäude

(BEG) zusammengeführte Förderung für energieeffizientes Bauen und Sanieren, den Einsatz erneuerbarer Wärmeenergien und zur Steigerung der Energieeffizienz von Heizsystemen. Hinzu kommen die steuerliche Förderung der Gebäudesanierung, das Gebäudeenergie-Gesetz (GEG), die Energieberatung für Wohngebäude, das Heizungsanlagenlabel und die Vorbildfunktion Bundesgebäude.

Für eine Reihe anderer Maßnahmen wird aus verschiedenen Gründen auf eine Wirkungsabschätzung verzichtet. Für einige Maßnahmen mangelt es für die Wirkungsabschätzung an der empirischen Grundlage. Dies gilt zum Beispiel für die Maßnahme „Änderungen bei Mietnebenkosten“ sowie Anpassungen am Mietrecht. Für die Gesetzesbegründung des WoG-CO₂-BeprEntlG wurden empirische Schätzungen zu Empfängerzahl und Entlastungswirkung durchgeführt. Mit dem WoG-CO₂-BeprEntlG werden keine Emissionen eingespart, sondern einkommensschwächere Haushalte im Kontext der CO₂-Bepreisung entlastet. Insofern ist eine Wirkungsabschätzung mit Blick auf Emissionseinsparungen für diese Maßnahme nicht möglich bzw. nicht sinnvoll. Andere Maßnahmen (z. B. Änderungen bei der Städtebauförderung) können aufgrund der wenig konkreten Beschreibung sowie des sektorübergreifenden Ansatzes (Gebäude, Verkehr, Abfallwirtschaft) nicht abgeschätzt werden. Die Förderung der seriellen Sanierung wiederum besteht gemäß des Entwurfs der entsprechenden Förderrichtlinie von Januar 2021 aus drei Modulen (Durchführbarkeitsstudien, Entwicklung und Erprobung serieller Sanierungskomponenten für individuelle Pilotprojekte, ergänzende Investitionsbeihilfen zum Aufbau von Produktionskapazitäten serieller Sanierungskomponenten), die vorrangig darauf ausgelegt sind, die Entwicklung neuartiger Verfahren und Komponenten zur seriellen Sanierung zu unterstützen. Damit soll langfristig die Marktentwicklung der seriellen Sanierung in Deutschland unterstützt werden. Die Maßnahme wird allerdings erst dann eine spürbare Einsparwirkung entfalten, wenn sich die damit verbundenen Verfahren und Komponenten auf dem Markt etabliert haben und entsprechend nachgefragt werden.

Die Bewertung der Einzelmaßnahmen erfolgt für die meisten Instrumente Bottom-up. Ausnahme ist das BEHG (CO₂-Bepreisung fossiler Brennstoffe), für das die Wirkung über INVERT/EE-Lab modellgestützt abgeschätzt wird.

Die Beschreibung, welche Annahmen zur Ausgestaltung der Einzelmaßnahmen zu Grunde liegen, findet sich in Abschnitt 7.2.3. Die Abschätzung der Wirkung der Einzelmaßnahmen des MMS erfolgt gegenüber einem Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS). Im Rahmen des OMS wird unterstellt, dass die betroffene Einzelmaßnahme nicht existiert und somit keine Wirkung entfalten kann. Die Wirkung der Einzelmaßnahmen wird ab dem Jahr 2020 abgeschätzt, so dass die kumulierten jährlichen Einsparungen den Zeitraum zwischen 2020 und dem jeweiligen Betrachtungsjahr erfassen. Auch wenn eine Maßnahme schon vor 2020 existiert (z. B. die Neubau- und Sanierungsförderung), wird ihre Wirkung erst ab dem Jahr 2020 quantifiziert. Tabelle 63 zeigt eine Übersicht der untersuchten Einzelmaßnahmen und die Annahmen zur entsprechen Referenz im Vergleichsszenario (OMS).

Tabelle 63: Ausgestaltung des Vergleichsszenarios (OMS) zur Quantifizierung der Einzelmaßnahmenwirkung

Einzelmaßnahme	Ausgestaltung Vergleichsszenario (Ohne-Maßnahme-Szenario)
BEHG (CO₂-Bepreisung fossiler Brennstoffe)	Im Vergleichsszenario werden die CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe nicht bepreist.
Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG)	Im Vergleichsszenario werden weder energieeffiziente Neubauten noch Sanierungsmaßnahmen bei bestehenden Gebäuden finanziell gefördert. Neubauten erfolgen auf das Anforderungsniveau des GEG. Bei Sanierungen sowie der Installation von Anlagen zur EE-Wärmeerzeugung wird angenommen, dass die im Rahmen des MMS durch die Bundesförderung induzierten Investitionen ausbleiben.
Steuerliche Förderung der Gebäudesanierung	Im Vergleichsszenario werden weder Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle noch der Umstieg auf EE-Wärmeerzeuger steuerlich gefördert. Vielmehr wird angenommen, dass die durch die steuerliche Förderung induzierten Sanierungsmaßnahmen ausbleiben.
Gebäudeenergiegesetz (GEG)	Neubau: „Einfrieren“ der Mindestanforderungen an neue Gebäude auf das Niveau des GEG (damit im MMS keine Einsparungen gegenüber dem OMS). Im Gebäudebestand wird die bedingte Sanierungspflicht des GEG „ausgeschaltet“; dabei wird angenommen, dass in rund der Hälfte aller Sanierungsfälle dennoch eine EnEV-konforme energetische Modernisierung stattfindet; hinsichtlich der Nachrüstverpflichtung für Heizkessel wird angenommen, dass Kessel, die älter als 30 Jahre sind, nur halb so oft ausgetauscht werden wie unter den Anforderungen des GEG.
Gebäudeenergiegesetz (GEG) - Ölkesselverbot	Alte Ölkessel werden zu Gunsten effizienterer Ölkessel ausgetauscht (d.h. die Effizienzgewinne durch den Einsatz eines neuen Ölkessels, z. B. BW-Kessel, werden schon von der Referenz erfasst); ferner wird unterstellt, dass Ölkessel auch ohne Ölkesselverbot anteilig durch EE-Hybridanlagen (z. B. Ölkessel+ Solarthermie) ersetzt werden.
Energieberatung für Wohngebäude	Im Vergleichsszenario finden keine Beratungen statt, entsprechend bleiben die durch die Beratung ausgelösten Sanierungsaktivitäten aus.
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	Im Vergleichsszenario erhalten alte Heizanlagen kein Effizienzlabel.
Vorbildfunktion Bundesgebäude	Für bestehende Bundesgebäude wird im Vergleichsszenario eine jährliche Sanierungsrate von 1,2 % (im Sinne einer äquivalenten Vollsanierungsrate) unterstellt. Sanierungen erfolgen auf ein Durchschnittsniveau von KfW EG-100.

Quelle: Öko-Institut

Tabelle 64 gibt einen Überblick, mit welchen Aktivitätsraten, spezifischen Effizienzen und sonstigen Annahmen die Wirkung der Einzelinstrumente gegenüber dem Vergleichsszenario abgeschätzt wurde.

Tabelle 64: Umsetzung und Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung
BEHG (CO₂-Bepreisung fossiler Brennstoffe)	Vergleich zweier Modellläufe mit INVERT/EE-Lab, bei denen bei einem Lauf der CO ₂ -Preis „eingeschaltet“, beim anderen „ausgeschaltet“ wird. Angesichts der Unklarheit, wie sich der CO ₂ -Preis in den Jahren 2027ff entwickelt, wird aus der Perspektive der Hauseigentümer kein perfect foresight unterstellt.
Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG)	Es wird angenommen, dass die BEG bis 2040 mit den gleichen Förderbedingungen wie im Jahr 2020/2021 weitergeführt wird. Damit verbindet sich die Annahme, dass sich auch die Anzahl an Förderanträgen sowie deren Verteilung auf die verschiedenen Fördertatbestände (Einzelmaßnahmen Gebäudehülle und Anlagentechnik, Effizienzhäuser, usw.) entsprechend der Fallzahlen im Jahr 2020 fortschreiben. Die Berechnung der Einspareffekte erfolgt über die Einspareffekte, die im Rahmen der Evaluierung der KfW-Programme „Energieeffizientes Sanieren“ und „Energieeffizientes Bauen“ sowie des MAP empirisch erhoben wurden.
Steuerliche Förderung der Gebäudesanierung	Es wird angenommen, dass die Konditionen der steuerlichen Förderung bis 2040 unverändert fortgeführt werden. Da die Sanierungsmaßnahmen, die durch die steuerliche Förderung erfasst werden, gleichzeitig auch durch das BEG gefördert werden können, müssen sich Gebäudeeigentümer für einen der beiden Förderkanäle entscheiden. Die Abschätzung der Förderfälle der steuerlichen Förderung basiert zum einen auf den Fallzahlen des BEG im Jahr 2020 (s.o.) sowie einem Vergleich der Förderkonditionen in den beiden Förderkanälen. 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. Bei den EE-Wärmeerzeugern wird hingegen angenommen, dass aufgrund der im BEG wesentlich attraktiveren Förderkonditionen, 90 % der ausgelösten Förderfälle über das BEG gefördert werden.
Gebäudeenergiegesetz (GEG)	Neubau: Kein Einspareffekt, da das Anforderungsniveau unverändert bleibt. Sanierung: Die Berechnung der Einsparwirkung erfolgt unter der Annahme einer konstanten Sanierungsrate von 1 %/a sowie unter Zugrundelegung gebäudetypspezifischer Einsparwerte für eine Sanierung auf die Mindestanforderungen des GEG für eine vollständige Sanierung. Bei der Abschätzung der Einsparwirkung der Nachrüstpflicht für alte Heizkessel wird ein Vorzieheffekt in Höhe von 3 Jahren unterstellt, d.h. nach 3 Jahren wäre ein infolge der Nachrüstpflicht ausgetauschter Kessel ohnehin ausgetauscht worden (zu Gunsten eines Kessels, der genauso effizient ist wie der neue Kessel, der infolge der Austauschpflicht installiert wird).
Gebäudeenergiegesetz (GEG) - Ölkesselverbot	Eingedenk des schon heute zu beobachtenden Anteils von Hybridanlagen beim Ölkesselerersatz wird angenommen, dass das Verbot ab 2026 pro Jahr rund 45.000 Ölkessel betrifft, ein Großteil davon in EZFH. Es wird ferner unterstellt, dass bei EZFH bei 10 % der Fälle und bei MFH und NGW bei 20 % 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). Die Berechnung der Einsparwirkung erfolgt unter Zugrundelegung gebäudetypspezifischer Substitutionsmixe (Verteilung der Fälle auf zulässige Alternativen wie Erdgas, Fernwärme, EE- und Hybridanlagen).

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung
Energieberatung für Wohngebäude	Es wird angenommen, dass die Anzahl an vor-Ort Beratungen (rund 16.000 im Jahr 2020 ⁸¹) weiter steigt (um weitere rund 10.000 Beratungen pro Jahr) und ein bestimmter Anteil der Beratungsfälle in konkrete Sanierungsmaßnahmen mündet ⁸² .
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	Analog IZT und Öko-Institut (2020) Berücksichtigung von zwei Effekten: (1) Einsparungen infolge vorgezogener Kesseltausche, für die das Label ursächlich war sowie (2) Einsparungen durch die Wahl eines effizienteren neuen Kessels bzw. einer effizienteren Heizungsanlage, ausgelöst durch das Label bei einem ohne-hin geplanten (also nicht zusätzlichen) Heizungstausch.
Vorbildfunktion Bundesgebäude	Das Instrument adressiert eine beheizte Nettogrundfläche von rund 22,2 Mio. m ² (davon rund 1/3 in zivilen und 2/3 in militärischen Liegenschaften). Es wird angenommen, dass die Sanierungsrate der Bundesgebäude - in Analogie zu den Vorgaben der EED - bis zum Jahr 2025 sukzessive auf 3 % pro Jahr ansteigt. Gleichzeitig etabliert sich für Sanierungsmaßnahmen des Bundes der Mindeststandard EGB-55.

Quelle: Öko-Institut

Die Abschätzung der Wirkung der Einzelinstrumente erfolgt in mehreren Schritten. Der erste Schritt besteht in einer Abschätzung der individuellen Bruttoeinsparungen der verschiedenen Instrumente. Soweit Mitnahme-, Übertragungs- oder Spill-over Effekte in der Bruttoeinsparung noch nicht im OMS erfasst werden, werden diese Effekte in Form einer Effektbereinigung herausgerechnet (Effektanpassung). Im letzten Schritt werden die Überschneidungseffekte zwischen verschiedenen Instrumenten berücksichtigt. Im Zuge dieser Bereinigung wird auch der Tatsache Rechnung getragen, dass die prozentualen Einsparwirkungen verschiedener Maßnahmen an einem Gebäude nicht einfach addiert werden dürfen. Der Effekt tritt z. B. dann besonders deutlich auf, wenn an einem Gebäude gleichzeitig Einzelmaßnahmen auf der Versorgungsseite (Wärmeerzeuger) und auf der Nachfrageseite (Gebäudehülle) durchgeführt werden. Die Gesamtwirkung ergibt sich dann nicht aus einfacher Addition der beiden individuellen Maßnahmenwirkungen, sondern die prozentualen Einzelwirkungen sind multiplikativ zu verbinden. Die im Zuge der Wirkungsabschätzung verwendeten Instrumentenfaktoren werden in Tabelle 65 dargestellt.

Die ex-ante Wirkungsabschätzung beginnt mit dem Stichjahr des MMS. Für alle schon bestehenden Instrumente wird folglich die Wirkung ab dem 01.01.2020 abgeschätzt. Erstes Wirkjahr ist also das Jahr 2020.

Tabelle 65: Faktoren zur Effektbereinigung und zur Berücksichtigung der Überschneidungseffekte zwischen Instrumenten

Einzelmaßnahme	Instrumentenüberschneidung
BEHG (CO ₂ -Bepreisung fossiler Brennstoffe)	Instrumentenfaktor: 0,6 Durch das BEHG ausgelöste Sanierungsmaßnahmen werden teilweise über das BEG oder die steuerliche Förderung gefördert und werden dort bilanziert (CO ₂ -Preis als Türöffner für die Förderung)
Bundesförderung effiziente Gebäude	Instrumentenfaktor: 0,95

⁸¹ https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ebw_statistik_foerderungen.pdf?__blob=publicationFile&v=16

⁸² Laut Evaluierungsbericht 2019 lag die durchschnittliche Umsetzungsquote über alle Maßnahmen bei 62 %, mit geplanten Umsetzungen bei 80 %. Siehe https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ebw_evaluierungsbericht_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Einzelmaßnahme	Instrumentenüberschneidung
	Vor allem Überschneidung mit der steuerlichen Förderung. Diese wird bei der Wirkungsabschätzung aber explizit herausgerechnet. Mögliche Mitnahmeeffekte werden mangels empirischer Grundlage nicht berücksichtigt.
Steuerliche Förderung der Gebäudesanierung	Instrumentenfaktor: 0,95 Vor allem Überschneidung mit dem BEG. Diese wird bei der Wirkungsabschätzung aber explizit herausgerechnet. Mögliche Mitnahmeeffekte werden mangels empirischer Grundlage nicht berücksichtigt.
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG)	Instrumentenfaktor: 0,9 Ein Teil der infolge der bedingten Sanierungsanforderungen ausgelösten Sanierungsmaßnahmen wird gefördert (BEG, steuerliche Förderung); bei der Nachrüstverpflichtung für alte Heizkessel kommt es zu Überschneidungen mit dem Heizungsanlagenlabel und der BEG Einzelmaßnahmenförderung/Steuerförderung (falls Umstieg auf EE-Wärmeerzeugung).
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG) - Ölkesselverbot	Instrumentenfaktor: 0,35 Annahme, dass in rund zwei Drittel der durch das Verbot betroffenen Kessel eine Förderung durch das BEG oder die steuerliche Förderung in Anspruch genommen wird.
Energieberatung für Wohngebäude	Instrumentenfaktor: 0,2 Die durch die Energieberatung ausgelösten Sanierungsmaßnahmen werden zu großen Teilen durch das BEG oder die Steuerförderung gefördert.
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	Instrumentenfaktor: 0,45 Die Wirkung des Labels bei MFH wird größtenteils dem GEG (Nachrüstpflicht Heizkessel > 30a) zugerechnet; Wirkung bei eigengenutzten EZFH wird hingegen hier bilanziert.
Vorbildfunktion Bundesgebäude	Instrumentenfaktor: 0,9 Sanierungen finden im Sanierungszyklus statt; die Maßnahmen unterliegen dabei teilweise den bedingten Sanierungsanforderung des GEG

Quelle: Öko-Institut

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die abgeschätzten Einsparungen an fossilen Brennstoffen und die damit einhergehende Reduktion direkter Treibhausgasemissionen. Da das OMS nicht modelliert wird, kann keine Aussage darüber getroffen werden, welche Entwicklung die ausgewiesenen Indikatoren im Vergleichsszenario nehmen würden. Aus diesem Grund können die im Zuge der Einzelinstrumentenabschätzung ermittelten Summenwerte nicht mit einem modellierten Vergleichsszenario abgeglichen werden.

Tabelle 66: Netto-Einsparungen fossiler Brennstoffe pro Jahr für ausgewählte Maßnahmen (ohne Wirkungen auf Umwandlungssektor)

Fossile Brennstoffeinsparungen pro Jahr [PJ]*	Wirkbeginn für die Wirkungsabschätzung	2025	2030	2035	2040
BEHG (CO ₂ -Bepreisung fossiler Brennstoffe)	2021	3	27	75	108
Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG)	2020	103	189	275	361
Steuerliche Förderung der Gebäudesanierung	2020	24	45	65	85
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG)	2020	47	72	98	125
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG) - Ölkesselverbot	2026	0	1,9	3,7	5,5
Energieberatung für Wohngebäude	2020	0,4	0,8	1,2	1,5
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	2020	0,9	1,8	2,7	3,6
Vorbildfunktion Bundesgebäude	2020	0,4	1,2	1,9	2,7

Anmerkung: * Nur fossile Brennstoffe in der dezentralen Wärmeerzeugung ohne Fernwärme und Strom

Quelle: Berechnung Öko-Institut

Tabelle 67: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen pro Jahr für ausgewählte Maßnahmen (ohne Wirkungen auf Umwandlungssektor)

Direkte Emissionsminderung* [Mio. t CO ₂ -Äq]	Wirkbeginn für die Wirkungsabschätzung	2025	2030	2035	2040
BEHG (CO ₂ -Bepreisung fossiler Brennstoffe)	2021	0,2	1,5	4,2	6,0
Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG)	2020	6,9	12,4	17,7	22,8
Steuerliche Förderung der Gebäudesanierung	2020	1,6	2,9	4,2	5,4
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG)	2020	3,1	4,7	6,4	8,1
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG) - Ölkesselverbot	2026	0,0	0,2	0,3	0,5
Energieberatung für Wohngebäude	2020	0	0	0,1	0,1
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	2020	0,1	0,1	0,2	0,2
Vorbildfunktion Bundesgebäude	2020	0,0	0,1	0,1	0,2

Anmerkung: * Nur fossile Brennstoffe in der dezentralen Wärmeerzeugung ohne Fernwärme und Strom

Quelle: Berechnung Öko-Institut

7.3 Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung

7.3.1 Methodik

Wie in den vorangegangenen Projektionsberichten erfolgt auch im vorliegenden Bericht die Berechnung der zukünftigen Stromnachfrage der Haushaltsgeräte in den privaten Haushalten mit der Energienachfrageplattform FORECAST. Diese Energienachfrageplattform wird auch zur Berechnung der Nachfrage in den Sektoren GHD und Industrie verwendet. 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 abgedeckt (siehe Abschnitt 7.2.1 zu den Gebäuden und Abschnitt 8.1). FORECAST-Residential setzt sich aus folgenden Gerätekategorien zusammen, die im Modell des Weiteren nach Technologien und/oder Effizienzklassen differenziert werden:

- ▶ Große elektrische Haushaltsgeräte (darunter: Kühl- und Gefriergeräte, Spülmaschinen, Waschmaschinen, Trockner, Herde)
- ▶ IKT-Endgeräte (darunter: Desktop-Computer, PC-Bildschirme, Laptops, Fernseher, Set-Top-Boxen, Modem/Router)
- ▶ Elektrische Kleingeräte (darunter: Kaffeemaschinen, Staubsauger, Bügeleisen, Toaster, Fön, Mikrowelle, Dunstabzugshaube)
- ▶ Beleuchtung
- ▶ Klimageräte
- ▶ Sonstige elektrische Anwendungen: diese Kategorie stellt 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 potenzieller Geräte, die bis 2040 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 des Restaggregats der sonstigen elektrischen Anwendungen. Bei dieser Kategorie lässt sich dieser Ansatz aufgrund der großen Heterogenität nicht durchführen. Die Stromnachfrage im Basisjahr wird

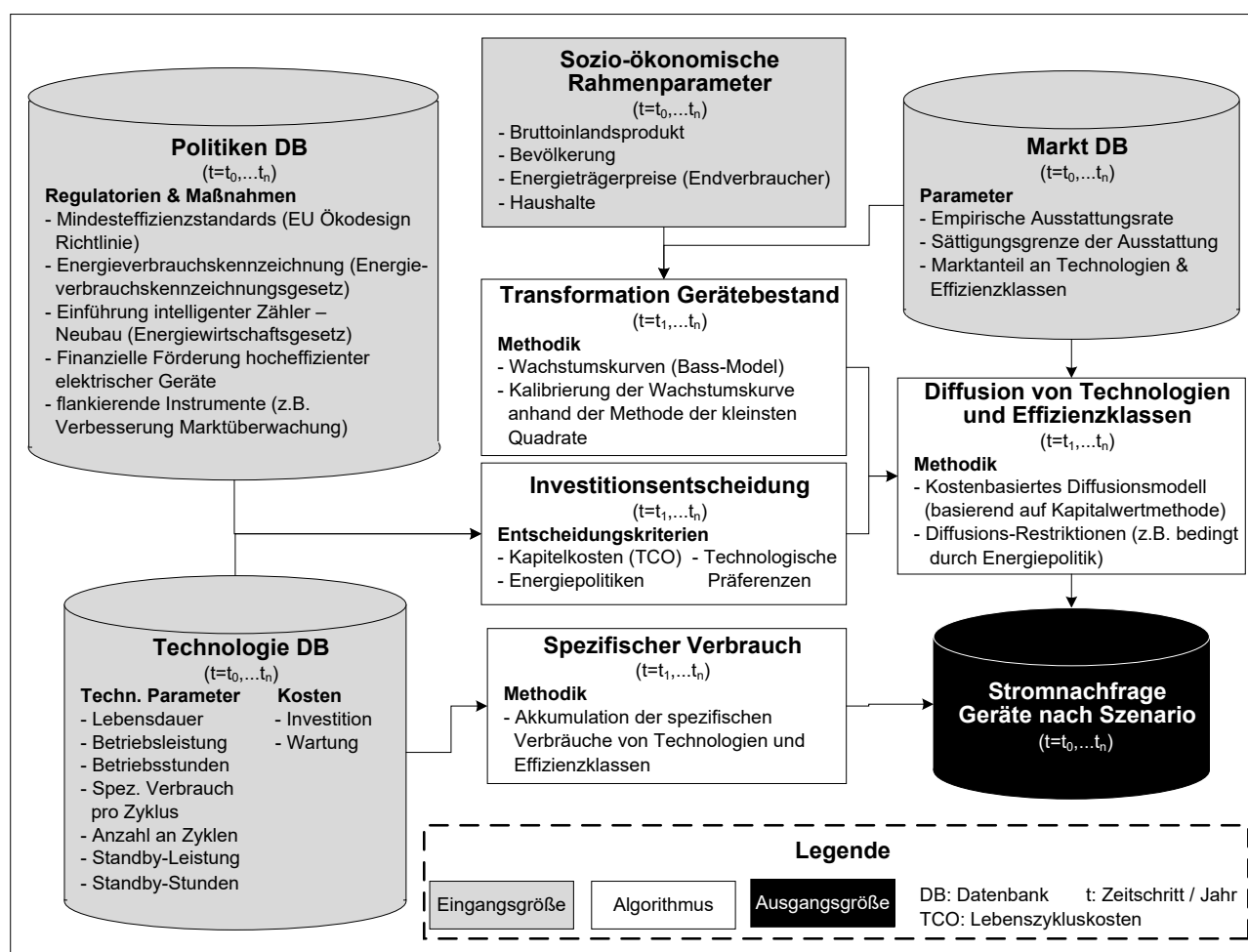
für die sonstigen elektrischen Anwendungen daher als Differenz zur Stromnachfrage laut der Energiebilanz (ohne den Verbrauch für Raumwärme und Warmwasser) ermittelt und für die Zukunft anhand einer abgeschätzten Ausstattungsrate fortgeschrieben.

Um auch die Kosten für unterschiedliche Diffusionspfade in 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 33 dargestellt.

Abbildung 33: Modellüberblick FORECAST-Residential (Geräte-Modul)



Quelle: Elsland 2016

Die bestehenden Politiken, welche Auswirkungen auf den Stromverbrauch in privaten Haushalten haben, sind eng miteinander verwoben. Insbesondere durch das Zusammenwirken der Politiken können diese ihre volle Wirkung entfalten. Ein Beispiel hierfür ist die Kombination aus der Ökodesign-Richtlinie und der Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung. Eine Bewertung auf Einzel-

maßnahmenebene durch instrumentenscharfe Zurechnung von Energie- und Treibhausgaseinsparungen gestaltet sich daher methodisch schwierig. Um dennoch eine Abschätzung der Effekte der zentralen Politikinstrumente zu gewährleisten, werden die Ergebnisse des MMS mit einem Szenario verglichen, in dem die zu bewertenden Maßnahmen nicht implementiert sind. Die Wirkung des Instrumentes wird durch Differenzbildung zum MMS ermittelt. Mögliche Überlagerungseffekte werden dabei berücksichtigt, so dass es nicht zu Doppelzählungen kommt. Tabelle 68 grenzt die zu quantifizierenden Maßnahmenwirkungen ab und definiert die entsprechenden Vergleichsszenarien.

Tabelle 68: Vorgehen zur Quantifizierung der Einzelmaßnahmenwirkung

Einzelmaßnahmen	Vorgehen zur Quantifizierung
Energie- und Stromsteuer	Zur Abschätzung der Wirkung der Ökosteuer wird ein Szenario gerechnet, in dem der Strompreis für Endverbraucher ab dem Jahr 2008 um die betreffenden Beträge geringer ist.
EEG-Umlagesenkung	Zur Abschätzung der Wirkung der Umlageveränderung wird ein Szenario gerechnet, in dem die Umlage als Bestandteil des Strompreises für Endverbraucher konstant bleibt. Dies wird insbesondere gemacht, um die Vergleichbarkeit mit den Vorgängerberichten und den Annahmen zur EEG-Umlage sicherzustellen.
Mindesteffizienzstandards nach EU-Ökodesign-Richtlinie und EU-Energielabel-Rahmenverordnung	Um die Effekte der EU-Energielabel-Rahmenverordnung sowie der Mindeststandards nach Ökodesign zu quantifizieren, wird ein Vergleichsszenario ohne die beiden Maßnahmen gerechnet und mit den gemeinsamen Wirkungen der beiden Instrumente ab dem Jahr 2009 (Ökodesign) bzw. 2010 (EU-Energielabel) verglichen. Zuletzt wird die Aufteilung der Wirkung zwischen den beiden Maßnahmen abgeschätzt.
Pilotprogramm Einsparzähler	Die Abschätzung der Wirkung des Pilotprogramms Einsparzähler erfolgte als Bottom-up Wirkungsabschätzung.
Beratung einkommensschwacher Haushalte (Stromspar-Check)	Die Abschätzung der Wirkung des Stromspar-Checks erfolgte als Bottom-up Wirkungsabschätzung.

Quelle: Darstellung Fraunhofer ISI

Im MMS werden als relevante Maßnahmen die Mindesteffizienzstandards basierend auf der EU-Ökodesign-Richtlinie, die EU-Energielabel-Rahmenverordnung, die Energie- und Stromsteuer, die EEG-Umlagesenkung, Energieberatung einkommensschwacher Haushalte (Stromspar-Check) und das Pilotprogramm Einsparzähler abgeschätzt.

Tabelle 69 gibt an, für welche Maßnahmen die Einzelbewertung bzw. die Modellbewertung mit dem Modell FORECAST durchgeführt wurde. Weiterhin wird für Maßnahmen mit Einzelbewertung angegeben, in welcher Höhe Überschneidungen und Mitnahmeeffekte berücksichtigt wurden. Mitnahmeeffekte berücksichtigen, dass z. B. Effizienzinvestitionen auch ohne Förderprogramm durchgeführt worden wären. Überschneidungen berücksichtigen die vielen (häufig gewollten) Überschneidungen und Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen. Für Maßnahmen, die mit FORECAST bewertet wurden, werden entsprechende Effekte in den Modellrechnungen auch berücksichtigt, können jedoch nicht ausgewiesen werden. Die 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 69: Übersicht der Maßnahmen in privaten Haushalten: Methodik und Annahmen zu Überschneidungen und Mitnahmeeffekten

Maßnahme	Methode	Überschneidung	Mitnahmeeffekte
Energie- und Stromsteuer	FORECAST	Keine Ausweisung möglich	Keine (Ordnungsrecht)
EEG-Umlagesenkung	FORECAST	Keine Ausweisung möglich	Keine (Ordnungsrecht)
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie	FORECAST	Keine Ausweisung möglich (wird gemeinsam mit der EU-Energielabel-Rah- menverordnung model- liert)	Keine (Ordnungsrecht)
EU-Energielabel-Rah- menverordnung	FORECAST	Keine Ausweisung möglich (wird gemeinsam mit den Mindesteffizienzstandards modelliert)	Keine (Ordnungsrecht)
Pilotprogramm Einsparzäh- ler	Bottom-Up Einzelbewer- tung	Keine Überschneidungen	Sehr gering
Energieberatung für ein- kommensschwache Haus- halte (Stromspar Check)	Bottom-Up Einzelbewertung	Keine Überschneidungen	Sehr gering

Quelle: Fraunhofer ISI

Die Maßnahmeneffekte des Stromspar Checks weisen keine nennenswerten Überschneidungen zu den anderen Maßnahmen auf, da sich dieses Förderprogramm an einkommensschwache Haushalte richtet. Diese spezielle Zielgruppe wird von anderen Maßnahmen kaum erreicht. Zudem werden Mitnahmeeffekte minimal eingeschätzt, da diese Maßnahme Haushalte erreicht, welche sich zu kosten-deckenden Preisen voraussichtlich keine Stromsparchecks leisten könnten (BMWi 2020)⁸³.

7.3.2 Maßnahmen

Für diesen Sektor gibt es derzeit in Deutschland nur wenige rein sektorspezifische Maßnahmen. Überwiegend handelt es sich um übergreifende Instrumente, deren Wirkung auf den Stromverbrauch der privaten Haushalte abgeschätzt wird.

7.3.2.1 Quantifizierte Instrumente

a) Ökologische Steuerreform*

Die ökologische Steuerreform wird entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 4.1 im Sektor private Haushalte (Strom) berücksichtigt.

b) EEG-Umlagesenkung*

Die EEG-Umlagesenkung wird entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 3.5 im Sektor private Haushalte (Strom) berücksichtigt.

c) Mindeststandards (EU Ökodesign-Richtlinie)*

⁸³ Mitteilung zu Artikel im Integrierten Nationalen Energie- und Klimaplan (S. 217ff).

Die Mindeststandards unter der EU Ökodesign-RL und den jeweiligen EU-Durchführungsverordnungen werden entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 4.2 für die den Stromverbrauch der privaten Haushalte betreffenden Produktgruppen berücksichtigt.

d) EU-Energielabel – EU-Richtlinie zur Energieverbrauchskennzeichnung*:

Die Verordnungen für die jeweiligen Produktgruppen im Rahmen der Energieverbrauchskennzeichnung werden entsprechend der Beschreibung bei den übergeordneten Maßnahmen (Abschnitt 4.2 für die den Stromverbrauch der privaten Haushalte betreffenden Produktgruppen berücksichtigt.

e) Pilotprogramm Einsparzähler*

Das Pilotprogramm Einsparzähler wird entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 4.1 im Sektor private Haushalte berücksichtigt.

f) Beratung einkommensschwacher Haushalte (Stromsparcheck)

Eine der wenigen spezifisch an diesen Sektor gerichteten Maßnahmen ist das – in jeweils etwas unterschiedlicher Ausgestaltung – bereits seit vielen Jahren von der NKI geförderte Projekt „Stromsparcheck“. Die Maßnahme beinhaltet gezielt die Beratung einkommensschwacher Haushalte zum Strom- und Energiesparen. Im Rahmen der Beratung erhalten die Haushalte kostenlos Energiesparartikel (zum Beispiel LED-Lampen und schaltbare Steckdosenleisten), mit denen sie unmittelbar ihren Strombedarf senken können und einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Das von 2016 bis 2019 laufende Projekt „Stromsparcheck Plus“ beinhaltete zusätzlich bei Erfüllung bestimmter Voraussetzungen einen Zuschuss zur Beschaffung eines hochenergieeffizienten Kühlgerätes. Derzeit läuft das Projekt „Stromsparcheck Aktiv“ (1.4.2019 – 31.3.2022).

Die Quantifizierung der Wirkung dieser Maßnahme erfolgt auf Basis der jährlich eingestellten Fördermittel (bisher rund 9,3 Mio. € pro Jahr für die Projekte „Stromsparcheck Kommunal“ von 04/2016 bis 03/2019 und „Stromsparcheck Aktiv“ von 04/2019 bis 03/2022), die auch für die Zukunft fortgeschrieben werden. Dabei wird auch auf Kennwerte zur Einsparwirkung aus der regelmäßigen Evaluierung des Programms im Rahmen der Evaluierung der NKI und weitere verfügbare Evaluationen zurückgegriffen.

7.3.2.2 Flankierende Instrumente

Als flankierende Instrumente werden zum einen die in Abschnitt 4.4 beschriebenen begleitenden Maßnahmen berücksichtigt, soweit sie für den Sektor Private Haushalte – Strom relevant sind. Dazu gehören von den dem MMS zugeordneten Maßnahmen insbesondere

- ▶ die freiwillige Produktkennzeichnung für energierelevante Produkte sowie
- ▶ die Infokampagne für das neue EU-Energielabel.

Als weiteres sektorspezifisches Instrument wird als flankierend eingestuft:

g) Einführung intelligenter Messgeräte (Smart Meter) zur Stromverbrauchsmessung

Mit Inkrafttreten des Messstellenbetriebsgesetzes (MsbG) im September 2016 wurde die grundsätzliche Neuordnung des Messwesens vorgenommen. Das Gesetz definiert den Messstellenbetrieb und die Messung als separaten Bereich des Netzbetriebs, schafft neue Marktrollen und hat die Abrechnungsentgelte Strom abgeschafft. Es schreibt den umfassenden Einbau von modernen Messeinrichtungen und intelligenten Messsystemen durch den sog. „grundzuständigen Messstellenbetreiber für moderne Messeinrichtungen und intelligente Messsysteme“ (§ 2 Nr. 6 MsbG) bis 2032 vor. Verpflichtend ist der Einbau seit 2017, jedoch zunächst nur für Verbraucher mit einem Jahresstromverbrauch

von über 6.000 kWh, für Verbraucher, die mit einer steuerbaren Verbrauchseinrichtung am Flexibilitätsmechanismus nach §14a EnWG teilnehmen sowie für Anlagenbetreiber nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz oder dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz mit einer installierten Leistung von mehr als 7 kW. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Einbauverpflichtung für intelligente Messgeräte im März 2021 durch ein Urteil des Oberverwaltungsgerichtes Nordrhein-Westfalen vorerst gestoppt wurde (OVG NRW 2021). Für Letztverbraucher mit einem Jahresstromverbrauch bis einschließlich 6.000 Kilowattstunden und Anlagen mit einer installierten Leistung über 1 bis einschließlich 7 Kilowatt ist der Einbau der Smart Meter für den grundzuständigen Messstellenbetreiber optional möglich.

7.3.3 Annahmen und Parameter

Gerätebestand

Der Gerätebestand wird hier über die geschätzte Diffusionsgeschwindigkeit und über Sättigungen der Ausstattungsraten ermittelt. Die daraus resultierenden Ausstattungsraten werden mit der Anzahl an Haushalten aus dem Rahmenkapitel multipliziert. Wie in den vorangegangenen Berichten, orientieren sich die Annahmen zur Entwicklung der Ausstattungsraten an den in den Politikszenerarien 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 70.

Die jeweiligen Ausstattungsraten der privaten Haushalte mit elektrischen Haushaltsgeräten im Basisjahr 2018 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 44,1 Mio. im Jahr 2035 zurückzuführen. Lediglich bei Spülmaschinen und Wäschetrocknern wird bis 2035 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.

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 Datenlage 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 und eine darauf aufbauende Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Barthel et al. 2010).

Tabelle 70: Erwartete Entwicklung des Bestands an elektrischen Geräten in privaten Haushalten

Gerätebestand (Anzahl Geräte in Tausend)	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Große elektrische HH-Geräte						
Kühlschränke	44.184	44.758	45.613	46.307	47.095	47.694
Gefrierschränke	29.291	29.764	30.542	31.214	31.963	32.584
Waschmaschinen	39.520	40.052	40.835	41.477	42.227	42.808
Geschirrspüler	29.566	30.254	31.348	32.122	32.840	33.346
Trockner	26.191	27.852	30.808	32.713	34.079	34.942
Herde (Gas- und Elektroherde)	41.719	42.213	42.890	43.432	44.092	44.587
IKT-Geräte						
Desktop-PC	37.434	38.422	37.790	33.790	27.743	20.929
Computer-Bildschirm	36.003	36.860	38.511	40.018	41.623	43.044
Laptops	19.816	21.837	27.351	34.242	43.303	55.287
Fernseher	65.861	67.503	70.618	73.409	76.315	78.829
Set-Top-Boxen	40.496	41.415	44.048	45.530	46.914	48.292
Router	26.621	27.430	29.002	30.355	31.672	32.758
Beleuchtung	1.392.590	1.419.310	1.466.080	1.506.321	1.548.836	1.583.797
Klimageräte	2.870	3.385	4.748	6.076	7.205	8.012

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. Welche Annahmen dazu getroffen werden, wird gerätespezifisch in Zusammenhang mit der Quantifizierung dieser Maßnahme dargestellt. 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 MMS zeigt Tabelle 71. Danach liegt der erwartete Rückgang des spezifischen Stromverbrauchs für die großen elektrischen Geräte zwischen den Jahren 2015 und 2040 zwischen 15 und 36 %. Im Bereich der IKT-Geräte fallen die erwarteten spezifischen Verbrauchsreduktionen sehr unterschiedlich aus, da manche Geräte einen Technologiewechsel erfahren (bspw. Monitore), während andere leistungsstärker werden und sich der Verbrauch daher kaum senkt (bspw. Laptops). Bei Klimageräten wird im MMS ein Anstieg des spezifischen Verbrauchs von gut 11 % bis 2040 erwartet. Die Entwicklung wird hier durch verlängerte Nutzungszeiten einerseits und die stärkere Leistungsfähigkeit andererseits bestimmt.

Tabelle 71: Erwartete Entwicklung des spezifischen Verbrauchs elektrischer Geräte in privaten Haushalten im MMS

Spezifischer Geräteverbrauch	2015	2018	2020	2025	2030	2035	2040
	kWh/ Gerät	Veränderung gegenüber 2015 in %					
Große elektrische HH-Geräte							
Kühlschränke	223,4	-10,5	-17,6	-27,1	-28,9	-30,5	-31,7
Gefrierschränke	232,0	-8,3	-13,9	-27,3	-30,3	-31,9	-33,2
Waschmaschine	163,3	-5,2	-8,7	-17,2	-19,4	-20,8	-22,0
Geschirrspüler	363,6	-4,8	-7,9	-12,5	-12,4	-13,8	-15,7
Trockner	211,1	-10,8	-17,1	-30,2	-33,7	-35,3	-36,4
Elektroherd	771,2	-1,6	-3,4	-7,1	-10,7	-14,8	-16,1
IKT-Endgeräte							
Desktop-PC	58,4	-1,2	-2,7	-7,2	-11,1	-11,1	-11,1
Computer-Bildschirm	36,5	-9,6	-19,5	-36,7	-39,2	-39,2	-39,2
Laptops	30,1	0,7	2,0	1,3	-1,0	-1,0	-1,0
Fernseher	146,4	-0,8	0,9	4,2	2,5	-3,4	-8,5
Set-Top-Boxen	50,2	0,8	1,2	1,4	1,4	0,2	0,0
Router	71,2	-1,1	-3,8	-9,3	-13,3	-13,3	-13,3
Beleuchtung pro Haushalt	192,5	-19,1	-30,8	-49,5	-64,8	-69,0	-68,6
Klimaanlage	381,1	-4,2	-3,9	3,6	10,3	11,4	11,4

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

7.3.4 Ergebnisse

Einen Überblick über die Entwicklung des Stromverbrauchs privater Haushalte im MMS nach Anwendungsbereichen gibt Tabelle 72. Dabei verzeichnen die privaten Haushalte von 2015 bis 2040 einen kontinuierlichen Rückgang des Stromverbrauchs. Bei der weißen Ware wird insgesamt von einer relativ gleichbleibenden Ausstattungsrate ausgegangen, lediglich der Anteil der Trockner wird sich voraussichtlich in den kommenden Jahren noch leicht weiter 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 beträchtlichen Rückgangs des spezifischen Energieverbrauchs der meisten IKT-Geräte führen die angenommenen höheren Ausstattungsraten zu einem leichten 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 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 2040 deutlich ansteigen.

Tabelle 72: Entwicklung des Stromverbrauchs privater Haushalte 2010–2035 im MMS

Stromverbrauch MMS	2018	2020	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Weißer Ware	36,4	35,2	32,6	32,7	32,8	32,7
Elektroherd	17,8	18,4	19,7	18,8	17,8	17,4
IKT-Endgeräte	17,4	17,9	18,7	18,9	18,8	18,7
Beleuchtung	6,5	5,6	4,2	2,9	2,6	2,7
Klimaanlage	1,1	1,2	1,9	2,6	3,1	3,4
Sonstiger Strom	21,2	21,0	19,9	19,0	18,5	18,0
Summe	100,4	99,3	97,0	94,9	93,6	92,9

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Auf Grundlage der oben dargestellten Annahmen ergeben sich durch diese Maßnahmen im Jahr 2020 jährliche Einsparungen in Höhe von rund 18 TWh. Im Jahr 2030 steigen diese auf rund 28 TWh und im Jahr 2040 auf 37 TWh (Tabelle 73). Die größten Einsparungen ergeben sich durch die Ökodesign-Richtlinie (28 TWh in 2040) gefolgt von der Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung (8,5 TWh in 2040). Diese Steigerung ist in der Berechnung der Wirkung entsprechend berücksichtigt. Zusätzlich zu den hier aufgeführten Maßnahmen ergibt sich eine Veränderung auch durch die Deckelung der EEG-Umlage in den Jahren 2021 und 2022 auf 6,5 bzw. 6 Cent/kWh und eine anschließend prognostizierte weitere Reduktion der Umlage (siehe Kapitel 3.5). Hierdurch fallen vorhandene Einsparwirkungen weg. So sinkt die Maßnahmenwirkung der EEG-Umlage von 2,9 TWh im Jahr 2020 auf 0,9 TWh im Jahr 2030 und sinkt in den Folgejahren ganz auf null. Insgesamt sind die Einsparwirkungen in diesem Szenario leicht geringer als im Vorgängerbericht. Dies liegt auch daran, dass von einem weniger starken Anstieg des Energieverbrauchs im kontrafaktischen Szenario ohne Maßnahmen ausgegangen wird, so dass die Verbräuche, auf welche die Maßnahmen wirken, leicht geringer

ausfallen als in den Vorgängerberichten. Die dem kontrafaktischen Szenario zugrundeliegenden Annahmen begründen sich beispielsweise in einer autonomen, nicht durch Politikmaßnahmen getriebenen, Durchdringung effizienterer Geräte im Markt.

Tabelle 73: Wirkung der strombezogenen Maßnahmen im Sektor private Haushalte - MMS

Maßnahme	Instrumententyp	Wirkungsbeginn	Einsparungen am Stromaufkommen					
			2018	2020	2025	2030	2035	2040
			TWh					
Energie- und Stromsteuer	E	Quantifiziert ab 2008	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Mindeststandards - EU-Ökodesign-Richtlinie	R	Schrittweise Umsetzung seit 2009	11,0	14,4	19,8	21,1	23,1	28,0
EU-Energie-label-Verordnung	R/I	Quantifiziert ab Einführung des neuen Energielabels 2010	2,5	2,9	5,2	6,5	7,4	8,5
Pilotprogramm Einsparzähler	F	Quantifiziert ab 2016	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Energieberatung für einkommensschwache Haushalte (Stromspar Check)	I	Quantifiziert ab 2009	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Summe aller Einzelmaßnahmen			13,9	17,8	25,6	28,3	31,2	37,2

Quelle: Schätzung Fraunhofer ISI

Anmerkung: Erklärung der Instrumententypen: Tabelle A 1 im Anhang A1

7.4 Geräte und Prozesse im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

7.4.1 Methodik

Für die Modellierung der Prozesswärme und der nicht-gebäudebezogenen 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) energieträgerspezifisch 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 Schlomann et al. 2014) und Statistiken (z. B. Anwendungsbilanz) abgeglichen.

7.4.2 Maßnahmen

Siehe die Maßnahmen in Bezug auf Strom und Prozesswärme/-dampf in der Industrie (Abschnitt 6.1.3).

7.4.3 Annahmen und Parameter

Für die meisten Maßnahmen, welche den Sektor GHD adressieren, sind die Annahmen der Quantifizierung im Abschnitt 6.1.4 dargestellt, da diese auch den Industriesektor betreffen. Allein die Programme zur Förderung der Energieeffizienz in Kälte- und Klimaanlageanlagen sowie die Kommunalrichtli-

nie der NKI adressieren ausschließlich Unternehmen im GHD-Sektor und werden im Folgenden beschrieben. Für die Mindesteffizienzstandards werden einzelne Lose speziell für den GHD-Sektor modelliert. Annahmen zu Mitnahmeeffekten und Überschneidungen mit anderen Programmen sind für alle GHD-Maßnahmen zusammen mit den Industrie-Maßnahmen in Tabelle 34 dargestellt.

Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie

Für die Modellierung der EU-Ökodesign-Richtlinie werden im GHD-Sektor eine Reihe einzelner Lose modelliert. Diese sind in Abschnitt 6.3.1 aufgeführt.

NKI: Kälte-Klima-Richtlinie

Laut Programmausgestaltung werden Investitionen mit 15-25 % gefördert. Es wird von einer mittleren Förderquote von 20 % ausgegangen. Für die Bewertung der Maßnahmenwirkung wird mit ähnlichen Kennwerten gerechnet wie für die Evaluation der NKI. Entsprechend wird von einer Fördereffizienz bezogen auf die jährliche Endenergieeinsparung von 0,004 PJ/€ Förderung ausgegangen. Diese beinhaltet bereits Mitnahmeeffekte, welche entsprechend nicht mehr separat abgezogen werden. Laut Evaluation dominiert die Wirkung auf den Stromverbrauch, was auch hier unterstellt wurde. Überschneidungen mit anderen Instrumenten werden mit 15 % angesetzt. So können entsprechend geförderte Maßnahmen im Rahmen einer geförderten Energieberatung empfohlen sein. Für die jährliche Fördersumme wird ab 2020 von 20 Millionen € ausgegangen.

NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen

Die Bewertung der Kommunalrichtlinie orientiert sich an der NKI-Evaluation (Öko-Institut et al. 2017). Demnach wird von einer Fördereffizienz bezogen auf die jährlichen Endenergieeinsparungen von 0,018 GJ/€ ausgegangen. Dieser Wert berücksichtigt bereits Mitnahmeeffekte. Es wird nicht von relevanten Überschneidungen mit anderen Programmen ausgegangen.

7.4.4 Ergebnisse

7.4.4.1 Bewertung der Einzelmaßnahmen

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 die Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft zurückzuführen.

Tabelle 74: Wirkung der Maßnahmen im Sektor GHD im MMS - Stromeinsparungen

Maßnahme	Strom-Einsparungen					
	2015	2020	2025	2030	2035	2040
	TWh/a					
Energie- und Stromsteuer	1,5	2,9	3,0	3,2	3,2	2,9
EEG-Umlagesenkung	2,5	5,8	3,4	1,8	0,0	0,0
Energieberatung Mittelstand	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Maßnahme	Brennstoff-Einsparungen						Vermeidung von CO ₂ -Emissionen					
Ökodesign-Richtlinie												
Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit	-	3,5	12,5	19,8	19,8	19,8	-	0,17	0,57	0,86	0,82	0,78
NKI: Kälte-Klima-Richtlinie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke	0,4	1,5	2,7	3,1	3,1	3,1	0,02	0,07	0,12	0,13	0,13	0,12
Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Förderwettbewerb	-	-	0,7	1,2	1,2	1,2	-	-	0,03	0,05	0,05	0,05
Pilotprogramm Einsparzähler	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Energieauditpflicht für Nicht-KMU	0,71	4,27	7,84	8,55	8,55	8,55	0,03	0,20	0,35	0,37	0,35	0,34
KfW Effizienzprogramm	0,49	1,73	3,14	3,89	3,99	3,99	0,02	0,08	0,14	0,17	0,17	0,16
NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen	0,27	0,71	1,05	1,06	1,06	1,06	0,01	0,03	0,05	0,05	0,04	0,04
Summe	3,7	14,3	29,6	39,2	39,4	39,4	0,2	0,7	1,3	1,7	1,6	1,6

Anmerkung: Die Wirkung der Energieberatung Mittelstand enthält entgegen der Abgrenzung dieses Kapitels auch gebäudebezogene Maßnahmen.

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

7.5 Gesamtergebnisse Gebäude

Tabelle 76 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen im Zeitraum 2020 und 2030 im MMS. Die Definition und Abgrenzung dieses Sektors kann Abschnitt 2.1 entnommen werden. Die Gesamtemissionen, die dem Gebäudesektor in der Bilanzierung zugewiesen werden, sinken bis zum Jahr 2030 auf 90,9 Mio. t CO₂-Äq. Davon entfallen 84 Mio. t CO₂-Äq auf fossile Brennstoffe für die Bereitstellung von Raumwärme- und Warmwasser in Wohn- und Nichtwohngebäuden. Die restlichen Emissionen entfallen auf Geräte und Prozesse für Private Haushalte und GHD. Das Sektorziel gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 für das Jahr 2030 wird damit um knapp 24 Mio. t CO₂-Äq verfehlt.

Maßgeblich für den Rückgang der Treibhausgasemissionen ist die Reduktion der CO₂-Emissionen (siehe Tabelle 77). Durch Sanierungsmaßnahmen in Gebäuden und Austausch der Wärmeversorgungssysteme reduziert sich der Bedarf an den fossilen Brennstoffen Erdgas, Heizöl und Kohle. Wie in Abbildung 32 dargestellt, reduzieren jedoch auch steigende Außentemperaturen bis 2040 den Energieverbrauch für Raumwärme. Der weitaus größere Effekt wird jedoch durch die Verbesserung der Energieeffizienz der Gebäude und die Umstellung auf EE und Fernwärme erreicht.

Tabelle 76: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS

Kategorie	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO ₂ -Äq										
GHD und Sonstige	29,1	31,8	31,3	30,7	30,0	29,2	28,4	27,4	26,3	25,2	24,1
Haushalte	90,9	84,1	83,1	81,7	80,3	78,6	76,7	74,6	72,3	69,7	66,8
Gesamt	120,0	115,9	114,3	112,4	110,3	107,9	105,1	102,0	98,6	94,9	90,9
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	118	113	108	102	97	92	87	82	77	72	67
Abweichung vom Sektorziel	2,0	2,9	6,3	10,4	13,3	15,9	18,1	20,0	21,6	22,9	23,9

Quelle für die Jahre 2021-2030: Modellrechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Die Werte für das Jahr 2020 wurden der Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2021) entnommen.

Anmerkung: Die Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen sind in Anhang A.2 zu finden.

Wie in Tabelle 77 ersichtlich, ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2030 bis 2040 deutlich dynamischer als in den Vorjahren. Ausgehend von 1990 reduzieren sich die Treibhausgasemissionen um 76 %. Aufgrund des steigenden CO₂-Preises im BEHG nimmt die Wirtschaftlichkeit für erneuerbare Wärmeversorgungstechnologien sowie die Sanierungsaktivität aufgrund steigender Energiekosten zu, was zu einer höheren Dynamik nach 2030 führt.

In Bezug auf die Sanierungsaktivität spielt auch das Alter des Gebäudebestandes und der installierten Wärmeversorgungstechnologien eine Rolle. Diese führt dazu, dass mehr Gebäude in den natürlichen Austausch- und Instandsetzungszyklus gelangen und damit die Sanierungs- und Heizungs-tauschrate steigt.

Tabelle 77: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
CO₂-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	204,5	152,7	115,4				
MMS				106,6	89,6	67,8	49,2
CH₄-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	4,2	0,7	0,8				
MMS				0,9	0,9	0,9	0,8
N₂O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	1,0	0,5	0,4				
MMS				0,4	0,4	0,3	0,3
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018	209,7	153,9	116,6				
MMS				107,9	90,9	69,0	50,2
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018		-26,6	-44,4				
MMS				-48,6	-56,7	-67,1	-76,0
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 2005 in %						
Entwicklung 1990 – 2018			-24,3				
MMS				-29,9	-41,0	-55,2	-67,4

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), Modellrechnungen Öko-Institut

8 Verkehr

8.1 Methodik

Die Modellierung erfolgt mit dem Modell TEMPS des Öko-Instituts. Das Modell wurde bereits in den bisherigen Projektionsberichten der Bundesregierung eingesetzt und ermöglicht eine Berechnung der zukünftigen Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors in Abhängigkeit von politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen.

Modellierung von Neuzulassungen und Bestand

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 die Nutzerkosten (TCO⁸⁴) zurückgreift. 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 Treibhausgasemissionen des Bestands ergeben sich infolgedessen aus der zu Grunde gelegten Fahrleistung, dem Fahrzeugbestand, der Energieeffizienz je Antrieb und dem Anteil erneuerbarer Kraftstoffe.

Verkehrsnachfrage und Preiselastizitäten

Ausgangspunkt für die Annahmen zur Entwicklung der Verkehrsnachfrage ist die Referenzentwicklung der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM). Diese enthält jedoch nur Maßnahmen bis zum Stichtag 30. Juni 2017. Für die Entwicklung der Verkehrsnachfrage im MMS wurde die Wirkung zusätzlicher Maßnahmen berücksichtigt, ebenso wie aktuelle Trends. Für das Basisjahr 2018 wurde das Fahrleistungsgerüst aus TREMOD 6.01 zu Grunde gelegt sowie aktuelle Daten zur Verkehrsnachfrage gemäß Verkehr in Zahlen (BMVI 2018). Die Wirkung zusätzlicher Maßnahmen auf die Verkehrsnachfrage wurde überwiegend über Preiselastizitäten hergeleitet.

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 Kreuzpreiselastizität⁸⁵ 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 Verkehrsleistung im Straßengüterverkehrs bestimmt. Die Kreuzelastizität für andere Verkehrsträgeroptionen wird dabei auf 0,3 abgeschätzt.

⁸⁴ Total Cost of Ownership.

⁸⁵ 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.

Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen

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 2018 vorgenommen.

8.2 Maßnahmen

8.2.1 Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung

a) CO₂-Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 wurde im Herbst 2020 durch die Bundesregierung beschlossen, ab 2021 eine CO₂-Bepreisung für die Bereiche Wärme und Verkehr einzuführen (siehe Abschnitt 3.4).

Parametrisierung:

Der CO₂-Preis wirkt auch auf die Kraftstoffpreise. Die Kraftstoffpreiselastizität der Pkw-Fahrleistung wird mit -0,3 angenommen nach Hautzinger et al. (2004) und die Transportkostenelastizität der Lkw-Verkehrsleistung mit -0,6 nach (de Jong et al. 2010). Dies entspricht bei schweren Lkw bei einem Kraftstoffkostenanteil an den Transportkosten von 27 % einer Kraftstoffpreiselastizität der Lkw von etwa -0,15⁸⁶.

b) Erhöhung der Luftverkehrssteuer (LuftVSt)

Seit Januar 2011 wird in Deutschland die LuftVSt auf Rechtsvorgänge (regelmäßig entgeltliche Beförderungsverträge) erhoben, die zum Abflug eines Fluggastes berechtigen. Die Steuer entsteht mit dem tatsächlichen Abflug des Passagiers von einem inländischen Flughafen. Die Besteuerung umfasst ausschließlich die gewerbliche Beförderung von Personen durch Luftverkehrsunternehmen. Post- und Frachtverkehre werden hingegen nicht besteuert. Der Steuertarif knüpft an die pauschalierte Entfernung zum Zielort an und ist in drei Distanzklassen gegliedert („Kurzstrecke“ bis 2.500 km, „Mittelstrecke“ bis 6.000 km und „Langstrecke“ 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.

Mit dem „Gesetz zur Änderung des Luftverkehrssteuergesetzes“ vom 12. Dezember 2019 (Deutscher Bundestag 12.12.2019a) wurde insbesondere die folgende Erhöhung der gesetzlichen Steuersätze der LuftVSt ab dem 1. April 2020 beschlossen:

- ▶ Abflüge in der „Kurzstrecke“: von 7,50 € auf 13,03 € (+74 %)
- ▶ Abflüge in der „Mittelstrecke“: von 23,43 € auf 33,01 € (+41 %)
- ▶ Abflüge in der „Langstrecke“: von 42,18 € auf 59,43 € (+41 %)

Die gesetzlichen Steuersätze werden unter Berücksichtigung der erzielten Einnahmen aus dem Handel mit luftverkehrsbezogenen Emissionszertifikaten im EU-ETS abgesenkt (§ 11 Abs. 2 Luft-VStG). Die anzuwendenden Steuersätze betragen 2019: 7,38 €, 23,05 € und 41,49 €. Im Jahr 2020 sind folgende (abgesenkte) Steuersätze anzuwenden: bis 31. März 2020 7,37 €, 23,01 €, 41,43 € und ab 1. April 2020 12,90 €, 32,67 € und 58,82 €.

⁸⁶ 27%*(-0,6)

Parametrisierung:

Die Wirkung einer erhöhten LuftVSt auf die Verkehrsnachfrage wird über Preiselastizitäten abgebildet.

Es wird ein Kostensatz von durchschnittlich 8 ct/pkm (2017) im internationalen Luftverkehr hinterlegt. Für nationale Flüge werden die umgerechnet auf den Personenkilometer höhere LuftVSt und die auch auf den betreffenden Betrag anfallende Mehrwertsteuer sowie der etwas höhere Energieverbrauch im nationalen Luftverkehr berücksichtigt, wodurch sich ein höherer Kostensatz von 13,2 ct/pkm (2017) für nationale Flüge ergibt.

Eine Überwälzung der (angehobenen) LuftVSt auf die Fluggäste kann im Rahmen des Wettbewerbs erfolgen, ist aber aus steuerlichen Regelungen heraus nicht zwingend vorgegeben. Für die Berechnung der Maßnahmenwirkung wird eine vollständige Überwälzung der Kosten angenommen.

Bei nationalen Flügen wird die LuftVSt grundsätzlich bei Hin- und Rückflug erhoben; bei internationalen Flügen nur nach Abflug von einem inländischen Startort. Da auch internationale Flüge meist paarweise (Hin und Rück) gekauft werden, wird die Preiserhöhung auf beide Strecken bezogen. Ferner wird berücksichtigt, dass bei inländischen Flügen auf den LuftVSt-Betrag (s. o.) auch noch Mehrwertsteuer fällig wird, bei internationalen Flügen jedoch nicht.

Der Anteil nationaler bzw. internationaler Flüge sowie die Verteilung der LuftVSt 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.

c) Mehrwertsteuersenkung Bahn-Fernverkehr (Maßnahme im Maßnahmenbündel 3.4.3.1 des KSPr 2030)

Mit dem „Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 im Steuerrecht“ (Deutscher Bundestag 21.12.2019) wurde beschlossen, die Mehrwertsteuer im Bahn-Fernverkehr zum 1. Januar 2020 vom bisherigen normalen Mehrwertsteuersatz (19 %) auf den ermäßigten Steuersatz (7 %) abzusenken.

Die zum 01.01.2020 reduzierte MwSt. von 19 % auf 7 % auf Bahnfahrkarten von über 50 km Entfernung hat die Deutsche Bahn an alle Kunden der Fernverkehrszüge in vollem Umfang weitergegeben. Dabei wurden neben den Flexpreisen auch sämtliche weiteren Preisangebote, wie beispielsweise die Sparpreise, die BahnCards, die Reservierungen, die Zeitkarten etc. um rund 10 Prozent reduziert (dies entspricht der MwSt.-Reduktion von 19 % auf 7 %). Eine Anpassung der Preisangebote im Nahverkehr über 50 km und außerhalb von Verkehrsverbänden wurde zum Juni 2020 vorgenommen.

Parametrisierung:

Im gewichteten Durchschnitt über alle Kundensegmente hinweg gehen die Analysen der Deutschen Bahn von einer Preiselastizität von rund -0,3 aus. Vor dem Hintergrund der abgesenkten MwSt. auf Bahnfahrkarten über 50 km Entfernung plant die Deutsche Bahn daher mittelfristig mit rund 5 Mio. zusätzlichen Reisenden in ICE- und IC-Zügen des Fernverkehrs.

d) Elektrifizierung Schienenverkehr:

Rund 61 % des Streckennetzes sind derzeit (2019) elektrifiziert. Mit dem umfassenden Elektrifizierungsprogramm will das BMVI diesen Anteil auf 70 % erhöhen. Das Programm besteht aus vier Säulen: den im Bedarfsplan der Bundesschienenwege enthaltenen Elektrifizierungsmaßnahmen (1. Säule), den im Bundesprogramm zum Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) enthaltenen Vorhaben zur Elektrifizierung (2. Säule), den ergänzenden Programmen zur Elektrifizierung im Schienengüterverkehr (SGV) (Ausbauprogramm „Elektrische Güterbahn“) und im Rahmen der Strukturstärkung (3. Säule) sowie Förderung „alternativer Antriebe im Schienenverkehr“ (4. Säule). Nach Fertigstellung der Vorhaben aus dem „Bedarfsplan Schiene“ werden 67 % des Netzes elektrifiziert sein. Im Bundeshaushalt 2019 wurde ein Haushaltstitel für das Ausbauprogramm „Elektrische Güterbahn“ geschaffen. Die Begutachtung der Vorschläge zu diesem Programm befindet sich in der Endphase. Die Prüfung wird voraussichtlich 2020 abgeschlossen. Im Anschluss wird unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel zeitnah eine Auswahl und Priorisierung der Vorhaben vorgenommen.

Parametrisierung:

Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2030 das Ziel von 70 % Elektrifizierung erreicht wird.

Da vor allem die stärker befahrenen Trassen elektrifiziert werden, liegt bezogen auf die Betriebsleistung der elektrische Anteil höher als in Bezug auf die Streckenelektrifizierung. Nahezu drei Viertel der Betriebsleistung (74 %) werden schon heute auf der Schiene elektrisch erbracht. Im Personennahverkehr werden derzeit ca. 64 % der Betriebsleistung elektrisch erbracht, im Personenfernverkehr rund 98 % und im Güterverkehr 89 %.

Es wird angenommen, dass sich durch die stärkere Elektrifizierung bis 2030 die in Dieseltraktion erbrachte Betriebsleistung gegenüber 2019 halbiert.

e) Stärkung Schienenpersonenfernverkehr (SPFV): Einführung Deutschlandtakt mit Ausbau Infrastruktur und Digitalisierung

Mit Hilfe des Deutschlandtakts (Maßnahme im Maßnahmenbündel 3.4.3.1 des KSP 2030) sollen die Züge deutschlandweit besser aufeinander abgestimmt und dadurch Umsteige- und Reisezeiten deutlich gesenkt werden. Für ein besseres Bahnangebot braucht es aber zunächst die dafür passende Schieneninfrastruktur. Hierfür wurde in enger Abstimmung mit den Stakeholdern ein sogenannter Zielfahrplan entwickelt, anhand dessen die jeweils passgenaue Infrastruktur abgeleitet wird. Dieser enthält u. a. halbstündige Verbindungen auf den Hauptachsen im Schienenpersonenfernverkehr. Der dritte und finale Gutachterentwurf des Zielfahrplans wurde am 30.06.2020 anlässlich eines Schienengipfels vorgestellt⁸⁷. Die für den Deutschlandtakt erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen werden in einem nächsten Schritt nach der geltenden BVWP-Methodik volkswirtschaftlich bewertet. Die aus dem Zielfahrplan abgeleiteten Maßnahmen gilt es nach entsprechendem Nachweis der Wirtschaftlichkeit gesetzlich zu verankern. Der Deutschlandtakt soll schrittweise in Etappen umgesetzt werden. Dies bedeutet, dass die Maßnahmen des Deutschlandtaktes nicht alle sofort, sondern in sinnvollen Maßnahmenbündeln umgesetzt werden. Eine erste große Etappe ist bis Mitte der 2020er Jahre geplant. Der Finanzierungsbedarf der aus dem Zielfahrplan abgeleiteten bedarfsplanrelevanten Maßnahmen kann erst nach Vorlage der wirtschaftlichen Bewertung des Zielfahrplans beziffert werden, wobei der Finanzierungsbedarf der kleinen und mittleren Maßnahmen für die Ermöglichung des Halbstundentakts im Fernverkehr bereits beziffert ist. Voraussetzung für die gesamthafte Umsetzung des Deutschlandtakts sind ausreichende Mittel für den Aus- und Neubau des Schienennetzes zur Beseitigung von Engpässen sowie zur Verkürzung der Fahrzeiten zwischen Taktknoten

⁸⁷ Siehe <https://www.deutschlandtakt.de/>

im Rahmen des Bedarfsplans für die Bundesschienenwege sowie zum Erhalt der Infrastruktur. Der Bund hat bereits im Rahmen des KSPR 2030 beschlossen, sich von 2020 bis 2030 jährlich mit 1 Mrd. € zusätzlichen Eigenkapitals an der Deutschen Bahn zu beteiligen. Dadurch wird die Deutsche Bahn in die Lage versetzt, zusätzliches Kapital in die Modernisierung, den Ausbau und die Elektrifizierung des Schienennetzes und das Bahnsystem zu investieren, wovon auch der Deutschlandtakt profitieren kann. Zudem ist am 1.1.2020 die Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV-III) zwischen dem Bund und den Eisenbahninfrastrukturunternehmen des Bundes in Kraft getreten. Für den Zeitraum 2020 bis 2029 sind 86 Mrd. € Investitionen geplant, rund drei Viertel für den Erhalt. Zusätzlich werden Mittel bereitgestellt für die Umsetzung der Digitalen Schiene Deutschland, d.h. den Aufbau Digitaler Stellwerke und die Einführung digitaler Leit- und Sicherungstechnik. Hierfür stehen neben denen im Bundeshaushalt (Realisierung des DSD-Starterpakets: Köln-Rhein/Main, Knoten Stuttgart, Korridor Skandinavien-Mittelmeer sowie Fahrzeugförderrichtlinie) und über die Eigenkapitalerhöhung der DB AG vorgesehenen Mittel, weitere Mittel über die EU-Ko-Finanzierung zur Verfügung (50 % bei ETCS-Vorhaben).

Parametrisierung:

Die Parametrisierung erfolgt über eine Reduktion der Reisezeiten im SPFV. Dadurch gewinnt der Schienenverkehr gegenüber der Straße an Attraktivität. Es wird angenommen, dass die Verbesserung bei einer Zeiteinsparung für die Reisenden bis 2030 bei 5 % und bis 2040 bei 10 % liegt, und es wird ein Reisezeitelastizität von -0,6 angenommen (Nordenholz et al. 2016). Die ebenfalls verbesserte Zuverlässigkeit lässt sich mit den bekannten Ansätzen bisher nicht modellieren.

f) Stärkung Schienenpersonennahverkehr und Verbesserung der Angebotsqualität und Attraktivität des ÖPNV

Die Maßnahme entstammt dem Klimaschutzprogramm 2030 (Maßnahmenbündel 3.4.3.2). Die Bundesmittel nach dem Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) für den Ausbau des ÖPNV lagen bis 2019 bei rund 333 Mio. € pro Jahr. Mit dem Dritten Gesetz zur Änderung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes vom 6. März 2020 (Deutscher Bundestag 06.03.2020a) standen für das Jahr 2020 rund 665 Mio. € zur Verfügung. Ab 2021 steigen die Mittel auf 1 Mrd. € jährlich und ab 2025 auf 2 Mrd. €, mit einem weiteren Anstieg um 1,8 % p.a. ab 2026. Die Erhöhung auf 1 Mrd. € war dabei bereits im Koalitionsvertrag im Jahr 2018 vereinbart worden.

Weiterhin wurden die Regionalisierungsmittel laut dem Fünften Gesetz zur Änderung des Regionalisierungsgesetzes im Jahr 2020 um 150 Mio. € erhöht. Unter Berücksichtigung der Dynamisierung belaufen sich die zusätzlichen Mittel 2021 bereits auf 303 Mio. €, im Jahr 2022 auf rund 308 Mio. € und 2023 dann auf rund 464 Mio. €. Ab dem Jahr 2024 greift die bestehende Dynamisierung von 1,8 % (Deutscher Bundestag 06.03.2020b). Damit erhalten die Länder über die Jahre 2020 bis 2031 insgesamt zusätzliche Regionalisierungsmittel in Höhe von 5,25 Mrd. €.

Mit dem Gesetz über begleitende Maßnahmen zur Umsetzung des Konjunktur- und Krisenbewältigungspakets vom 14. Juli 2020 wurden die Länder im Jahr 2020 bei der Finanzierung des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) mit einer Erhöhung der Regionalisierungsmittel um einmalig 2,5 Mrd. € unterstützt, um die durch die Corona-Pandemie stark verringerten Fahrgeldeinnahmen zu kompensieren.

Weiterhin soll die Attraktivität des öffentlichen Personenverkehrs durch Förderprogramme verbessert werden. Unter anderem sollen hierzu Modellprojekte zur Stärkung des ÖPNV durch den Bund unterstützt werden; beispielhaft im Klimaschutzprogramm 2030 genannt ist die Einführung des 365-€-Tickets. Zur Umsetzung dieser Maßnahme hat das BMVI am 21.01.2021 eine Förderrichtlinie

„Modellprojekte zur Stärkung des ÖPNV“ veröffentlicht. Für diese Förderaktivitäten stehen laut Bundeshaushalt für den Zeitraum 2021-2024 Haushaltsmittel in Höhe von insgesamt rund 250 Mio. € zur Verfügung.

Die folgende Tabelle stellt die zusätzlich verfügbaren Mittel für den öffentlichen Verkehr gegenüber der Referenzentwicklung dar.

Tabelle 78: Zusätzliche Mittel für den öffentlichen Personennahverkehr (Mio. €)

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030
Regionalisierungsmittel	150 ⁸⁸	303	308	464	472	481	525
GVFG	333	667	667	667	667	1.667	1.854
Modellprojekte ÖPNV		48,979	55	90	60		

Quelle: eigene Darstellung, Quellen s. Text.

Parametrisierung:

Der ÖPNV ist aufgrund der hohen Energieeffizienz und des hohen Grades der Elektrifizierung mit erheblich geringeren Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer verbunden als der motorisierte Individualverkehr (MIV). Durch die Verlagerung von Verkehr vom MIV auf den ÖPNV können daher Minderungen der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor erreicht werden.

Berücksichtigt werden die zusätzlichen Mittel ohne die einmalig im Rahmen des Konjunkturpakets bewilligten Mittel von 2,5 Mrd. €, welche u. a. zum Ausgleich der zurückgegangenen Fahrgeldeinnahmen im Zusammenhang mit der Corona-Pandemie dienen.

Durch den Mittelanstieg soll eine Ausweitung des ÖV-Angebots erreicht werden. Bisher finanziert die öffentliche Hand den ÖPNV mit rund 17 Mrd. €; der Anteil der Nutzerfinanzierung liegt bei ca. 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.

- g) Stärkung Schienengüterverkehr: Trassen- und Anlagenpreisförderung, Bundesprogramm Zukunft Schienengüterverkehr, Netzausbau, Kapazitätserhöhung, Anschlussförderung

Mit der Trassenpreisförderung im Güterverkehr (TraFöG) wird der Schienengüterverkehr über eine anteilige Finanzierung der Trassenpreise gefördert. Den rechtlichen Rahmen für die Fördermaßnahme bildet die vom BMVI am 12. Dezember 2018 veröffentlichte Richtlinie zur Förderung des Schienengüterverkehrs über eine anteilige Finanzierung der genehmigten Trassenentgelte (af-TP) vom 10. Dezember 2018. Hierfür sind im Haushalt ab 2019 350 Mio. € jährlich bis 2022 sowie 175 Mio. € im Jahr 2023 vorgesehen. Der Fördersatz für 2020/21 beträgt 47,5 %. Ergänzt werden soll diese durch ein Förderprogramm zur anteiligen Förderung der Anlagenpreise im Schienengüterverkehr mit Schwerpunkt auf den Einzelwagenverkehr, das mit Beginn der Netzfahrplanperiode

⁸⁸ Zuzüglich 2,5 Mrd. € „Corona-Hilfe“, diese werden bei der Maßnahmenbewertung nicht berücksichtigt.

2020/2021 starten soll. Hierfür sind ab dem Haushaltsjahr 2020 jährlich 40 Mio. € vorgesehen. Ferner werden über das Bundesprogramm Zukunft Schienengüterverkehr Vorhaben in den Bereichen Digitalisierung, Automatisierung und innovative Fahrzeugtechnik gefördert. Die entsprechende Förderrichtlinie ist seit dem 20. Mai 2020 in Kraft. Hierfür stehen ab dem Bundeshaushalt 2020 jährlich 30 Mio. € zur Verfügung. Hinzu kommen weitere Fördermaßnahmen zur Stärkung des Schienengüterverkehrs, insbesondere die Kapazitätssteigerung des Netzes, die zu höheren Beladungsfaktoren und damit Kostensenkung im Schienengüterverkehr führt (740 m-Netz, Elektrifizierung), die Förderung des kombinierten Verkehrs sowie eine geplante fortentwickelte Förderung von Gleisanschlüssen und weiterer Anlagen des Schienengüterverkehrs (insb. Ersatz, Zuführungs- und Industriestammgleise, multifunktionale Anlagen zum Umschlag Straße/Schiene).

Parametrisierung:

Bei der Parametrisierung wird auf aktuell laufende Arbeiten im Rahmen der Nationalen Plattform Mobilität (NPM) zurückgegriffen. Es wird auf dieser Grundlage davon ausgegangen, dass mit den getroffenen Maßnahmen bis zum Jahr 2034 ca. 182 Mrd. Tonnenkilometer (tkm) auf der Schiene transportiert werden können und bis zum Jahr 2040 ca. 200 Mrd. tkm.

- h) Ausbau von Radinfrastruktur und Fahrradparkmöglichkeiten sowie allgemeine Verbesserung der Rahmenbedingungen für den Radverkehr

Das Maßnahmenbündel Förderung des Radverkehrs entstammt dem Klimaschutzprogramm 2030 (Maßnahmenbündel 3.4.3.3). Es wurden insgesamt 900 Mio. € zusätzliche Haushaltsmittel für den Radverkehr für die Jahre 2020-2023 bereitgestellt, die sich wie folgt zusammensetzen:

Tabelle 79: 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	226	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	24

Titel	Zweckbestimmung	2020	2021	2022	2023
Gesamt		50	250	300	300

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die meisten weiteren Haushaltstitel mit Radverkehrsbezug (z. B. nicht investive Modellvorhaben zur Umsetzung des Nationalen Radverkehrsplan, Bau von Radwegen an Bundesstraßen) werden in gleicher Höhe wie 2019 fortgeschrieben.

Außerdem wird der Radverkehr vom BMU im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative durch die Kommunalrichtlinie sowie durch den Förderaufruf "Klimaschutz durch Radverkehr" mit rund 40 Mio. € pro Jahr gefördert.

Im Rahmen des Konjunkturpakets haben das BMU und das BMVI die Förder-/Finanzierungsmöglichkeiten ihrer Programme erweitert. Antragsberechtigte profitieren bis Ende 2021 von erhöhten Förderquoten und reduzierten Eigenanteilen.

Mit der 54. Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften (BGBl. I 2020 S. 814), die am 28. April 2020 in Kraft getreten ist, wurden Änderungen zur Stärkung des Radverkehrs in der Straßenverkehrsordnung (StVO) beschlossen. Nebeneinanderfahren mit Fahrrädern ist demnach erlaubt, sofern andere Verkehrsteilnehmer nicht behindert werden. Beim Überholen von Radfahrern ist innerorts ein Mindestabstand von eineinhalb Metern vorgeschrieben, außerorts von zwei Metern. Eingeführt wird ein Grünpfeil an Ampeln nur für Radfahrer, die Möglichkeit zur Anordnung von Fahrradzonen (ähnlich zu Fahrradstraßen), ein generelles Haltverbot auf Schutzstreifen und Schrittgeschwindigkeit für rechtsabbiegende Kraftfahrzeuge über 3,5 t innerorts. Die Novelle der StVO ist aufgrund von Formfehlern nicht vollständig wirksam. Parallel zu den allgemeinen Vorschriften für das Radfahren werden die Vorschriften zur Nutzung geteilter Fahrräder (Sharing-Angebote, Teilmaßnahme des Maßnahmenbündels 3.4.4.12 des KSPR 2030) angepasst und führen zu einer Integration aller Sharing-Angebote mit einer Aufwertung des Fahrrads.

Mit dem „Achten Gesetz zur Änderung des Bundesfernstraßengesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften“ vom 21. Juni 2020 (Deutscher Bundestag 29.06.2020a) wurde außerdem eine gesetzliche Grundlage geschaffen, wonach Betriebswege auf Brücken im Zuge von für den Schnellverkehr mit Kraftfahrzeugen bestimmten Bundesfernstraßen und Bundesautobahnen bedarfsabhängig so zu bauen und zu unterhalten sind, dass auf diesen auch öffentlicher Radverkehr abgewickelt werden kann.

Parametrisierung:

Der in letzter Zeit zu beobachtende Trend der Zunahme des Radverkehrs ist bereits in der Referenzentwicklung enthalten. Für die Quantifizierung der Maßnahme wird die Methodik aus dem Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2020) verwendet. Es wird ab dem Jahr 2021 eine Verlagerung von Pkw-Verkehr auf Radverkehr in Höhe von 0,9 pkm je investiertem € (gemäß Tabelle 79) in die Radverkehrsinfrastruktur angenommen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Mittelabfluss im Radverkehr mit erheblicher Verzögerung erfolgt. Dies gilt vor allem für Investitionen, die vor Ort politisch entschieden, geplant und anschließend baulich umgesetzt werden müssen. Für die Finanzhilfen des Sonderprogramms „Stadt und Land“ liegt die vom BMVI unterzeichnete Verwaltungsvereinbarung den Ländern zur Unterzeichnung vor. Vor deren Abschluss können keine Projekte bewilligt werden. Der Start des Sonderprogramms „Stadt und Land“ ist für Anfang 2021 geplant. Bis zur tatsächlichen Fertigstellung der entsprechenden Projekte wird es jedoch ggf. noch Jahre dauern. Es wird angenommen, dass sich die Wirkung der zusätzlichen Mittel erst nach 5 Jahren vollständig zu entfalten beginnen wird. Zur Nutzung dieser neuen Radinfrastruktur ist

aber auch eine breite Verhaltensänderung hin zu einer verstärkten Radnutzung erforderlich. Für eine langfristige entsprechende Verhaltensänderung sollte schon im jüngsten Alter mit Mobilitätsbildung angesetzt werden. Im Rahmen des Nationalen Radverkehrsplans fördert das BMVI daher auch nicht-investive Projekte, die in besonderem Maße innovativ sind und auf andere Radverkehrsakteure oder vergleichbare Problemlagen übertragbar sind. So werden zum Beispiel beim Vorhaben „StatusRad - Fahrrad als Statussymbol für Jugendliche?“ Jugendliche der 9. und 10. Klassen in einer Projektwoche in der Schule adressiert, um ihnen das Fahrrad als Fortbewegungsalternative zum Auto noch vor dem Erlangen des Führerscheins näher zu bringen.

i) Kaufprämie und Infrastrukturförderung für E-Pkw

Bis zum Jahr 2030 sollen gemäß des 2019 beschlossenen Klimaschutzprogramms 2030 mindestens sieben bis zehn Millionen Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren. Zudem sollen im gleichen Zeitraum eine Million Ladepunkte zur Verfügung stehen. Hierzu unterstützt die Bundesregierung die Elektromobilität mit folgenden Förderaktivitäten:

- ▶ Kaufprämie für E-Pkw
- ▶ Masterplan Ladeinfrastruktur
- ▶ Flottenaustauschprogramme Sozial & Mobil

Bereits 2016 hat die Bundesregierung eine **Kaufprämie** für E-Autos, den Umweltbonus, beschlossen, an der sich der Bund und die Hersteller beteiligen. Voraussetzung für die Förderung durch den Bund ist, dass sich der um den Anteil des Herstellers reduzierte Kaufpreis aus dem Kaufvertrag ergibt. Die Beantragung erfolgt beim BAFA. Der Bundesanteil der Kaufprämie betrug zunächst 2.000 € für batterieelektrische Pkw (BEV) und 1.500 € für Plug-In-Hybride (PHEV).

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) wurden die Kaufprämien für elektrische Pkw (in Abhängigkeit des Listenpreises) erhöht und bis Ende 2025 verlängert.

Im Rahmen des Konjunkturpaketes vom 4. Juni 2020 wurde beschlossen, den Bundesanteil der Kaufprämie für E-Fahrzeuge für Fahrzeuge mit Zulassungsdatum vom 3. Juni 2020 bis 31.12.2021 zu verdoppeln (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 25.06.2020); im Rahmen des 4. Spitzengesprächs der "konzertierten Aktion Mobilität" (November 2020) wurde beschlossen, diese höhere „Innovationsprämie“ bis Ende 2025 zu verlängern. Der Herstelleranteil bleibt unverändert. Tabelle 80 zeigt die Kaufprämien in der Übersicht.

Tabelle 80: Kaufprämien für E-Pkw ab November 2019

	Herstelleranteil, Zulassung ab 5.11.2019	Bundesanteil, Zulassung 5.11.2019 bis 2.6.2020	Bundesanteil, Zulassung ab 3.6.2020 bis 31.12.2025
BEV unter 40 Tsd. €	3.000 €	3.000 €	6.000 €
BEV 40 – 65 Tsd. €	2.500 €	2.500 €	5.000 €
PHEV unter 40 Tsd. €	2.250 €	2.250 €	4.500 €
PHEV 40 – 65 Tsd. €	1.875 €	1.875 €	3.750 €

Quelle: Eigene Darstellung, Quellen siehe Text.

Die erforderlichen Haushaltsmittel sollen aus dem EKF zur Verfügung gestellt werden. Für die „Basis-Förderung“ sind ab dem Jahr 2020 Bundesmittel aus dem EKF bis 2024 in Höhe von 2,69 Mrd. € vorgesehen sowie zusätzlich 2 Mrd. € für die befristet erhöhte Kaufprämie, insgesamt also 4,69 Mrd. €. Die Förderung erfolgt bis zur vollständigen Auszahlung dieser Mittel, längstens bis 2025.

Im November 2019 wurde der **Masterplan Ladeinfrastruktur** (Bundesregierung 2019a) beschlossen. Dieser beinhaltet unter anderem das Ziel der Einrichtung von 50.000 öffentlichen Ladepunkten bis Ende 2022. Auch zur Förderung nicht-öffentlicher Lademöglichkeiten werden Mittel zur Verfügung gestellt. Insgesamt sind derzeit bis 2024 nach Aufstockung um Mittel aus dem Konjunkturpaket im Haushalt (EKF) 5,6 Mrd. € für die Ladeinfrastruktur bei Pkw und Lkw vorgesehen.

Parametrisierung:

Niedrigere Preise durch eine staatliche Kaufprämie für E-Pkw erhöhen im Modell den Anteil der Käufer, die sich für einen E-Pkw entscheiden. Kaufprämien für E-Pkw werden in der Modellierung bis zur Ausschöpfung der verfügbaren Mittel (4,69 Mrd. €) ausgezahlt. Dies ist im MMS bis Ende 2021 der Fall.

In der Modellierung wird nur der Bundesanteil der staatlichen 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 große Wechselwirkungen zwischen der Kaufprämie, den auf EU-Ebene zu erfüllenden Pkw-CO₂-Standards und der regionalen Verteilung des Absatzes von E-Pkw zwischen den Mitgliedstaaten gibt. Eine signifikante Zahl an Mitgliedsstaaten wird 2030 nur eine geringe Zahl an E-Pkw im Bestand aufweisen. Deutschland könnte aufgrund der Rahmenbedingungen (ökonomisch, netztechnisch) und der Zahlungsbereitschaft zu den Mitgliedsstaaten gehören, die im Jahr 2030 einen überproportionalen Bestand aufweisen. 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. Hier ist darauf zu verweisen, dass es aufgrund der Wechselwirkungen mit den CO₂-Standards hohe Unsicherheiten hinsichtlich der Wirkung einer zusätzlichen Förderung von E-Fahrzeugen gibt. Es ist auch möglich, dass die Kaufprämie vollständig zu Mitnahmeeffekten führt und keine CO₂-Minderung gegenüber den EU-Flottengrenzwerten entsteht.

j) Vergünstigte Besteuerung von elektrischen Dienstwagen und andere steuerliche Vorteile

Wird ein betrieblicher Dienstwagen auch privat genutzt, wird dieser Vorteil grundsätzlich mit 1 % des inländischen Bruttolistenpreises als Entnahme oder geldwerter Vorteil versteuert (sogenannte Listenpreismethode). Bereits seit 1. Januar 2019 wird für Elektro- und extern aufladbare Hybridelektrofahrzeuge diese Bemessungsgrundlage (der Bruttolistenpreis) halbiert, sodass diese Steuerpflichtigen nur einen geringeren Betrag versteuern müssen. Mit dem „Gesetz zur weiteren steuerlichen Förderung der Elektromobilität und zur Änderung weiterer steuerlicher Vorschriften“ (Deutscher Bundestag 12.12.2019b) wurde diese Regelung bis zum 31. Dezember 2030 verlängert. Extern aufladbare -Hybridelektrofahrzeuge sind nur begünstigt, wenn sie die Voraussetzungen des § 3 EmoG erfüllen. Ab dem Jahr 2022 muss die (rein elektrisch betriebene) Mindestreichweite der geförderten Hybridelektrofahrzeuge 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). Ab dem 1. Januar 2020 wird die Bemessungsgrundlage für Fahrzeuge, die keine Kohlendioxidemissionen aufweisen, (bei Anschaffung ab 1. Januar 2019) nur noch mit einem Viertel angesetzt, sofern der Bruttolistenpreis nicht mehr als 60.000 € beträgt; ansonsten ebenfalls mit der Hälfte der Bemessungsgrundlage. Die Grenze für den Bruttolistenpreis wurde dabei mit dem „Zweite[n] Gesetz zur Umsetzung steuerlicher Hilfsmaßnahmen zur Bewältigung der Corona-Krise“ (Deutscher Bundestag 29.06.2020b) von 40.000 auf 60.000 € angehoben.

Weiterhin wurde die Steuerbefreiung für vom Arbeitgeber gewährte Vorteile für das elektrische Aufladen eines Elektrofahrzeugs oder Hybridelektrofahrzeugs im Betrieb des Arbeitgebers oder eines verbundenen Unternehmens und für die zeitweise zur privaten Nutzung überlassene betriebliche Ladevorrichtung verlängert.

Parametrisierung

Die tatsächliche Ersparnis, die als Verringerung der Bemessungsgrundlage für die Besteuerung eines E-Pkw gegengerechnet werden kann, hängt zentral von zwei Faktoren ab:

- ▶ Dem Bruttolistenpreis des E-Pkw
- ▶ Der individuellen Steuerbelastung des Nutzers des Dienstwagens

Für verschiedene Kombination aus Pkw- und Käufer-Segment ergeben sich jährliche Einsparungen bei den Steuerpflichtigen in der Größenordnung von 150 bis 1.500 € (bei sehr hochpreisigen Pkw auch darüber). Abhängig von der Haltedauer eines Dienstwagens (zwischen 1 und 4 Jahren) ist die Absenkung der Dienstwagenbesteuerung äquivalent zu mittleren Abzügen beim Kaufpreis von 600 bis 6.000 €.

k) Absenkung der EEG-Umlage ab 2021

Die EEG-Umlage gehört zu den sektorübergreifenden Instrumenten, die mit ihren sektorspezifischen Wirkungen bewertet werden müssen. Die EEG-Umlagesenkung wird entsprechend der Beschreibung im Abschnitt 3 im Sektor Verkehr berücksichtigt.

Parametrisierung:

Eine Senkung um ca. 3ct/kWh entspricht beim Laden an Haushaltsstrom einer Energiekostenreduktion für BEV von rund 10 %. Diese wird bei der Kaufentscheidung für E-Pkw sowie bei der Modalwahlentscheidung berücksichtigt.

- l) Kraftfahrzeugsteuer: stärkere Gewichtung der CO₂-Komponente für Pkw und verlängerte Gewährung der Befreiung für erstzugelassene reine Elektrofahrzeuge

Das Siebte Gesetz zur Änderung des Kraftfahrzeugsteuergesetzes vom 16. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2184) sieht vor, für erstzugelassene Pkw die CO₂-Komponente ab 2021 durch progressiv gestaffelte Steuersätze deutlicher zu gewichten, um einen stärkeren Anreiz für emissionsärmere Fahrzeuge zu setzen. Konkret sind im Tarif künftig CO₂-Steuersätze von 2 bis 4 € je Gramm pro Kilometer vorgesehen, die im Bereich von mehr als 95 bis 195 Gramm pro Kilometer jeweils innerhalb von fünf gleichmäßigen Stufen und einer nach oben offenen Stufe gelten.

Die einzelnen Stufen (je g/km bezogen auf die CO₂-Prüfwerte) gliedern sich wie folgt:

- ▶ über 95 bis zu 115 g/km 2,00 €,
- ▶ über 115 bis zu 135 g/km 2,20 €,
- ▶ über 135 bis zu 155 g/km 2,50 €,
- ▶ über 155 bis zu 175 g/km 2,90 €,
- ▶ über 175 bis zu 195 g/km 3,40 €,
- ▶ über 195 g/km 4,00 €.

Dabei werden die CO₂-Werte des Emissionsprüfverfahrens WLTP herangezogen, das die Abgas- und Verbrauchswerte realitätsnäher abbildet. Die Werte des WLTP wirken sich bereits seit dem 1. September 2018 ohne tarifliche Anpassungen direkt auf die Kraftfahrzeugsteuer erstzugelassener Pkw aus.

Bisher waren reine Elektrofahrzeuge mit Erstzulassung bis zum 31. Dezember 2020 für 10 Jahre von der Kraftfahrzeugsteuer befreit. Die Steuerbefreiung soll mit der Änderung der Kraftfahrzeugsteuer für Erstzulassungen, die bis 31. Dezember 2025 erfolgen, verlängert werden. Die Befreiung wird längstens bis 31. Dezember 2030 gewährt. Die Befreiung von der Kraftfahrzeugsteuer entspricht z. B. für batterieelektrische Pkw einer Begünstigung in Höhe von durchschnittlich 50 € pro Jahr, d.h. insgesamt bis zu 500 €. Die Dauer der Befreiung und damit der Gesamtbetrag reduzieren sich je später das Fahrzeug erstmals zugelassen wird.

Für Pkw mit CO₂-Prüfwerten bis zu 95 g/km (d.h. insbesondere Plug-In-Hybride), die bis zum 31. Dezember 2024 erstmals zugelassen werden, sollen 30 € der Jahressteuer nicht erhoben werden, begrenzt bis Ende 2025. Die Begünstigung wird also maximal 5 Jahre gewährt und beläuft sich auf bis zu 150 € für Anfang 2021 zugelassene Pkw. Sie reduziert sich entsprechend, je später das Fahrzeug zugelassen wird.

Das o.g. Änderungsgesetz geht davon aus, dass die zusätzlichen Einnahmen durch die erhöhte CO₂-Komponente bis 2025 auf 345 Mio. € steigen und die Begünstigung für reine Elektrofahrzeuge und Pkw mit CO₂-Prüfwerten bis 95 g/km zu Mindereinnahmen von 180 Mio. € im Jahr 2025 führen.

Parametrisierung:

Bisher lag der CO₂-Steuersatz der Kraftfahrzeugsteuer für Pkw mit Verbrennungsmotor bei 2 € je g/km oberhalb von 95 g/km. Eine höhere Kraftfahrzeugsteuer als bisher ergibt sich ab dem 1. Januar 2021 für erstzugelassene Pkw mit CO₂-Prüfwerten ab 116 g/km.

Nach den Auswirkungen der 2018 bereits eingeführten Steuerbemessung anhand der CO₂-Werte des WLTP wird sich durch den neuen progressiven CO₂-Tarif ab 2021 die durchschnittliche Jahresssteuer für erstzugelassene Pkw mit Verbrennungsmotor weiter erhöhen; unter der theoretischen Annahme einer gleichbleibenden Zusammensetzung der Erstzulassungen bis auf 230 € (insgesamt + 60 %). Die Kraftfahrzeugsteuer wirkt auf die Kosten des Pkw-Haltens und somit mittelbar auf die Antriebswahl.

m) Förderung von umweltfreundlichen Bussen

Im Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung wird im Maßnahmenbündel 3.4.3.2 (Attraktivität des ÖPNV erhöhen) die Modernisierung und klimaschonende Umrüstung von Busflotten durch die Verstärkung der Förderung von Bussen mit elektrischen und wasserstoffbasierten Antrieben sowie Bussen, die mit Biogas betrieben werden, aufgegriffen. Bis 2030 sollten durch eine deutliche Verstärkung der Förderaktivitäten bis zu 50 Prozent der Stadtbusse elektrisch fahren.

Seit 2018 fördert die Bundesregierung die Anschaffung von Elektrobussen mit 80 % der Investitionsmehrkosten (Ladeinfrastruktur mit 40 %). Über den Energie- und Klimafonds werden die in der folgenden Tabelle dargestellten Mittel zur Verfügung gestellt:

Tabelle 81: Haushaltsmittel für Busse mit alternativen Antrieben (Mio. €)

Titel	Zweckbestimmung	2020	2021	2022	2023	2024	Gesamt
6092 / 89309	Förderung des Ankaufs von Bussen mit alternativen Antrieben	39,4	417,4	715,5	466	208	1846

Über die CVD-Richtlinie (siehe Maßnahme x) ist bereits ein ambitionierter Hochlauf der Neuzulassung von Bussen mit alternativen Antrieben vorgeschrieben. Es ist daher von einer starken Wechselwirkung auszugehen.

Parametrisierung

Die Anzahl der geförderten Busse wird aus den zur Verfügung stehenden Fördersummen und der Förderquote abgeleitet. Die Förderung wird vollständig abgerufen und führt damit zu einem schnellen Hochlauf der Neuzulassungen. Es wird dabei eine mittlere Fördersumme von 440.000€ für BEV inklusive Ladeinfrastruktur (Minnich und Mottschall 2019) und 14.000€ für Gasfahrzeuge angenommen (Dünnebeil et al. 2015). Insgesamt werden so 5.500 Fahrzeuge gefördert. 1/3 davon sind Gasfahrzeuge.

Die durch die Förderung angeschafften Fahrzeuge führen nicht zur vollständigen Erfüllung der CVD-Richtlinie (siehe Maßnahme w)). Die Richtlinie erfordert, dass zwischen 2021 und 2025 45% der Busse mit alternativen Antrieben zugelassen werden. Dies entspricht etwa 6.700 Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.

n) Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben

Im Zeitraum von Juli 2018 bis März 2021 bestand mit dem Förderprogramm „Energieeffiziente und/oder CO₂-arme schwere Nutzfahrzeuge“ („EEN“) eine Fördermöglichkeit für die Beschaffung von Lkw mit alternativen Antrieben. Umfasst waren CNG-Lkw (8.000 €), LNG-Lkw (12.000 €, bis Ende 2020) sowie reine Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge (40.000 € für Fahrzeuge ab 12 Tonnen, 12.000 € für kleinere Lkw) (BMVI 22.05.2018)).

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 wurde beschlossen, die Förderung zu verlängern, zu erhöhen und den möglichen Empfängerkreis der Zuwendung zu erweitern. In den vorliegenden Richtlinienentwürfen ist diesbezüglich vorgesehen, auch die Beschaffung von leichten Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben zu fördern.

Aus dem EKF stehen für die Jahre 2021 bis 2024 Haushaltsmittel für die Beschaffung klimafreundlicher Nutzfahrzeuge in Höhe von insgesamt rd. 1,65 Mrd. € zur Verfügung. Hierin enthalten sind 0,2 Mrd. €, die im Ergebnis des Koalitionsausschusses vom 3. Juni 2020 zusätzlich für Investitionen des Bundes in ein „Bus- und LKW-Flotten-Modernisierungsprogramm“ vorgesehen sind. In Umsetzung der Maßnahme 6 der Wasserstoffstrategie sind ebenfalls 0,1 Mrd. € zur Marktaktivierung und Unterstützung von Investitionen in Wasserstoff-Fahrzeuge enthalten.

Tabelle 82: Haushaltsmittel für Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben (Mio. €)

Titel	Zweckbestimmung	2021	2022	2023	2024	Gesamt
6092 / 89308-332	Zuschüsse für die Anschaffung von Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben	216	414	542	482	1654

Im Ergebnis des Koalitionsausschusses vom 3. Juni 2020 heißt es ferner, dass das befristete Flottenaustauschprogramm für Handwerker und KMU für Elektronutzfahrzeuge bis 7,5 t zeitnah umgesetzt wird. Dies erfolgt im Rahmen der Förderrichtlinie Elektromobilität vom 5. Dezember 2017 und umfasst elektrische Fahrzeuge der Klassen N1, N2 und N3. Dafür werden 50 Mio. € vom BMVI bereitgestellt, die im Windhund-Verfahren bewilligt werden. Die Förderung erfolgt als Investitionszuschuss und umfasst 40 % der Investitionsmehrkosten. Sofern das Vorhaben ansonsten nicht durchgeführt werden kann, kann für mittlere und kleine Unternehmen ein Bonus von 10 % bzw. 20 % gewährt werden.

Parametrisierung:

In Verbindung mit der Förderung für Lade- und Tankinfrastruktur (siehe bei p) zum Infrastrukturaufbau) leistet die Förderung der batterie-, brennstoffzellen- und hybridelektrischen Nutzfahrzeuge (NFz) einen Beitrag zu einem schnellen Markthochlauf der klimafreundlicher Nutzfahrzeuge.

Es werden maximal 40 % der Mehrkosten von Gas- und E-NFz gefördert, limitiert auf jeweils 8.000 bis 40.000€ je nach Antriebsart und Gewichtsklasse. Die Förderung besteht seit Mitte 2018 und läuft bis Ende März 2021. Durch die EU-CO₂-Standards für schwere Nutzfahrzeuge besteht bei den regulierten Fahrzeugen (Lkw mit einem Gesamtgewicht von mehr als 16 Tonnen und mit 4x2- und 6x2-Achsenkonfiguration) eine direkte Wechselwirkung mit der Förderung. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund drohender Strafzahlungen die Standards auch ohne Förderungen erfüllt werden.

o) Sonder-AfA für elektrisch angetriebene NFz bis 2030

Mit dem Gesetz zur weiteren steuerlichen Förderung der Elektromobilität und zur Änderung weiterer steuerlicher Vorschriften vom 12.12.2019 (BGBl I S.2451) wird für alle NFz (N1, N2, N3, d.h. LNF und SNF) eine Sonderabschreibung für rein elektrisch angetriebene NFz, d.h. für BEV, H2-BZ und O-BEV, aber nicht OH-LKW, eingeführt. Die Sonderabschreibung, die gegenwärtig aufgrund eines beihilferechtlichen Inkrafttretensvorbehalts noch nicht anwendbar ist, beträgt zusätzlich 50 % der Anschaffungskosten im Anschaffungsjahr. Größere SNF sind über 9 Jahre abzuschreiben, so dass die lineare AfA 11 % beträgt. Mit der Sonderabschreibung erhöht sich die AfA im Erstjahr auf 61 %. Die Abschreibung in den Folgejahren beträgt dann 4,86 %.

Parametrisierung:

Die Sonderabschreibung wirkt im Anschaffungsjahr gewinnmindernd und damit steuermindernd. Unterstellt man NFz-Preise alternativer elektrifizierter NFz in den Jahren 2020 bis 2023 von 250.000 bis 350.000 €, ergeben sich wirtschaftliche Vorteile von bis zu 2.000 € je Fahrzeug für ein beschaffendes Unternehmen.

- p) Förderung des Aufbaus öffentlicher und privater Versorgungsinfrastruktur für elektrifizierte Nutzfahrzeuge

Die mangelnde Verfügbarkeit von Versorgungsinfrastruktur für elektrifizierte NFz ist ein stark hemmender Faktor für eine stärkere Marktdurchdringung.

Die Bundesregierung will den koordinierten Aufbau einer bedarfsgerechten Tank- und Ladeinfrastruktur zur Versorgung der Fahrzeuge auch im schweren Straßengüterverkehr, im ÖPNV und im Schienenpersonennahverkehr fördern. Der Energie- und Klimafonds (EKF) soll hierfür zwischen 2020 und 2024 für alle alternativen Antriebstechnologien insgesamt rd. 5,6 Mrd. € als Zuschüsse zur Errichtung von Tank- und Ladeinfrastruktur (für Pkw und Lkw) bereitstellen.

Die ersten öffentlichen Schnellladesäulen für SNF mit 350+ kW Leistung befinden sich noch im Aufbau, Wasserstoff-Tankstellen dimensioniert für SNF existieren nicht und für Oberleitungs-LKW sind zwei kurze Teststrecken in Betrieb (eine weitere in Vorbereitung). Für den Förderzeitraum bis 2023 lässt sich der Absatz von BEV und OH-LKW in messbaren Stückzahlen anreizen, aber nur wenn die Infrastruktur zeitlich synchron aufgebaut wird. Die Förderung stellt sicher, dass ausreichend öffentliche und private Ladeinfrastruktur für BEV sowie Pendelstrecken für OH-Lkw im Umfang von ca. 300 km bis 2023 errichtet werden und dadurch auch eine größere Zahl dieser SNF im Praxisbetrieb genutzt und getestet werden können.

Ohne die geförderte Testphase wäre die Wahrscheinlichkeit hoch, dass in den Jahren ab 2023/2025 trotz des Drucks durch die CO₂-Standards nicht alle Technologien dem Markt zur Verfügung stünden.

Parametrisierung

Ein ambitionierter Markthochlauf elektrifizierter Nutzfahrzeuge basiert auf einem Dreiklang aus CO₂-differenzierter Maut, Fahrzeug-Förderung und Förderung der Lade-/Tank-Infrastruktur. Ein begrenzter Hochlauf ergibt sich bereits durch die beiden Förder-Instrumente (n) und p)). Bis 2024 werden 300km elektrifizierte Pendelstrecken auf Autobahnen eingerichtet (basierend auf der Methodik aus dem Projekt StratON (Hacker et al. 2020).

- q) 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.

Mit dem „Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 im Steuerrecht“ wurde beschlossen, die Pauschale ab dem 21. Entfernungskilometer auf 35 ct (2021-2023) bzw. 38 ct (2024-2026) anzuheben (Deutscher Bundestag 21.12.2019). Ab dem 21. Entfernungskilometer können Steuerpflichtige, bei denen die Entfernungspauschale keinen steuerlichen Effekt hat, auf Antrag eine „Mobilitätsprämie“ in Höhe von 14 % der Entfernungspauschale erhalten.

Parametrisierung:

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. Dies entspricht 69.000 Pkw-Pendlern. Bei 220 Arbeitstagen und durchschnittlich um 40 km weiterer Entfernung zur Arbeit ergibt sich eine um 1,2 Mrd. km höhere Pkw-Fahrleistung (=+0,2 % in Bezug auf die Gesamt-Pkw-Fahrleistung). Weiterhin wird angenommen, dass sich die

zusätzliche Pkw-Fahrleistung durch das Auslaufen der höheren Entfernungspauschale bis 2030 um 50 % reduziert.

- r) Fördermittel zur Entwicklung strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe sowie von Antriebstechnologien für die Luftfahrt

Erzeugungsanlagen für strombasierte Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien befinden sich in der Entwicklungs- und Marktvorlaufphase. Die Kraftstoffe sind derzeit im Vergleich zu konventionellen, fossilen Kraftstoffen nicht wettbewerbsfähig. Das liegt an hohen Investitions- und Betriebskosten sowie fehlender Mehrzahlungsbereitschaft. Mit Hilfe einer über mehrere Jahre angelegten Bundesförderung kann die Wirtschaftlichkeitsbewertung für diese Anlagen verbessert und der notwendige Markthochlauf von Erzeugungsanlagen unterstützt werden.

Für die Entwicklung regenerativer Kraftstoffe und Förderung von Anlagen zur Erzeugung strombasierter Kraftstoffe, fortschrittlicher Biokraftstoffe sowie von Antriebstechnologien für die Luftfahrt stehen nach aktueller Finanzplanung bis 2024 2 Mrd. € im Energie- und Klimafonds (EKF) zur Verfügung. Hierin enthalten sind 0,8 Mrd. € aus der Wasserstoffstrategie. Zur Aufteilung der Haushaltsmittel für strombasierte und Biokraftstoffe gibt es bislang keine Festlegung,

Parametrisierung:

Die Maßnahme wirkt unterstützend für einen steigenden Anteil von erneuerbaren Kraftstoffen. Da die Kraftstoffe auch auf die THG-Quote anrechenbar sein werden, wird die Maßnahme gemeinsam mit der THG-Quote (Maßnahme v)) quantifiziert.

- s) CO₂-Spreizung der Lkw-Maut

Die Richtlinie 1999/62/EU, zuletzt geändert durch Richtlinie 2013/22/EU, setzt den Rahmen für die Gebührenerhebung für die Benutzung von Straßen durch schwere Nutzfahrzeuge in den Mitgliedstaaten. Seit 2005 wird in Deutschland für Lkw ab einem zulässigen Gesamtgewicht von 12 t eine Lkw-Maut für Fahrten auf Autobahnen erhoben. Im Oktober 2015 wurde die Lkw-Maut auf Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht ab 7,5 t ausgeweitet. Zudem erfolgte eine sukzessive Ausweitung auf Bundesstraßen (in den Jahren 2012 und 2015, seit Juli 2018 auf alle Bundesstraßen). Zum 1. Januar 2019 wurden die Mautsätze dem Wegekostengutachten 2018-2022 entsprechend erhöht. Fernbusse und Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht <7,5 t unterliegen weiterhin nicht der Mautpflicht.

Im Klimaschutzprogramm 2030 hat die Bundesregierung beschlossen eine CO₂-Differenzierung der Lkw-Maut zugunsten klimaschonender Antriebe und die notwendige Novelle der Eurovignettenrichtlinie voranzutreiben. Es soll ein wirksamer CO₂-Aufschlag auf die Lkw-Maut unter Ausnutzung des rechtlichen Spielraums eingeführt werden. Eine nationale Umsetzung (inklusive Entscheidungen zur konkreten Ausgestaltung) kann erst nach Abschluss der Revision der Eurovignettenrichtlinie erfolgen.

Parametrisierung:

Elektrische Lkw werden bis Ende 2023 von der Lkw-Maut befreit. Ab 1.1. 2024 bis 31.12.2030 zahlen Nullemissionsfahrzeuge nur 25 % des Maut-Höchstsatzes in der entsprechenden Fahrzeugklasse. Die Wegekostendeckung wird beibehalten, indem konventionelle Diesel-Lkw einen höheren Mautsatz zahlen (Spreizung). Um wie viel die Infrastrukturkomponente der Lkw-Maut für Diesel-Lkw ansteigt, ergibt sich somit aus dem Anteil der mautbegünstigten Fahrleistung. Beispielsweise steigt im MMS bei einem elektrischen Fahranteil von 12 % die Infrastrukturmaut für konventionelle Lkw um 10 % an, um die Wegekostendeckung zu sichern. Außerdem wird ab 2023 eine CO₂-Komponente in die Lkw-Maut integriert in Höhe des BEHG-Preispfades (s.o.). Eine Doppelbelastung des Straßengü-

terverkehrs durch Maut und CO₂-Preis wird jedoch nicht angenommen, da ein Rückerstattungsmechanismus implementiert werden soll. Durch die Integration des CO₂-Preises in die Maut soll die Wettbewerbsneutralität sichergestellt und graue Importe vermieden werden.

Mit Erdgas betriebene Fahrzeuge ab 7,5 t zGG sind seit dem 01.01.2019 von der Maut befreit. Die ursprünglich bis Ende 2020 befristete Mautbefreiung für Erdgas-Lkw wurde mit dem „Achten Gesetz zur Änderung des Bundesfernstraßengesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften“ (Deutscher Bundestag 29.06.2020a) um drei Jahre, d.h. bis Ende 2023, verlängert. Das BMVI hat die EU-KOM pflichtgemäß über die Verlängerung der Mautbefreiung für Erdgas-Fahrzeuge informiert und befindet sich hierzu mit ihr in Gesprächen.

Im Anschluss an die befristete Mautbefreiung gilt für Erdgas-Lkw ein reduzierter Mautsatz, der um 1,1 Cent/km unter dem für Euro-VI-Fahrzeuge mit Diesel-Antrieb liegt, weil der Mautteilsatz für die verursachten Luftverschmutzungskosten nach § 3 Absatz 1 Nummer 2 des Bundesfernstraßenmautgesetzes nicht erhoben wird.

8.2.2 Ordnungsrecht

t) EU-CO₂-Standards für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge für 2025 und 2030

Im Dezember 2018 wurde auf EU-Ebene die Verordnung zur Fortführung der CO₂-Standards für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge beschlossen (European Parliament (EP); European Council 2019). Demnach sollen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von neuen Pkw bis 2025 um 15 % und bis 2030 um 37,5 % sinken, jeweils bezogen auf das Basisjahr 2021. Für leichte Nutzfahrzeuge soll die Reduktion 15 % (2025) bzw. 31 % (2030) betragen.

Hersteller, die einen hohen Anteil von niedrig emittierenden Pkw („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.

Parametrisierung Pkw:

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-Durchschnitt.

Die CO₂-Standards für Pkw werden im MMS maßgeblich durch den steigenden Anteil von E-Fahrzeugen erreicht. Konventionelle Pkw werden dagegen im Szenario nicht effizienter. Für die Jahre 2020 – 2021 wird davon ausgegangen, dass die Möglichkeit der Mehrfachanrechnung für ZLEV-Fahrzeuge (begrenzt auf insgesamt 7,5 g CO₂/km) von den Herstellern gleichmäßig über beide Jahre genutzt wird.

Unter anderem durch die Bildung von Hersteller-Pools⁸⁹ kann davon ausgegangen werden, dass einige Hersteller die Benchmarks (15 % ZLEV im Jahr 2025, 35 % im Jahr 2030) für die Anhebung der herstellereinspezifischen Zielwerte übertreffen. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Zielwert

⁸⁹ [https://circabc.europa.eu/sd/a/c37a5306-28b9-4753-88aa-b7f3f42c1878/M1%20declarations%20of%20intent%20to%20form%20open%20pools%20\(15.09.2020\).pdf](https://circabc.europa.eu/sd/a/c37a5306-28b9-4753-88aa-b7f3f42c1878/M1%20declarations%20of%20intent%20to%20form%20open%20pools%20(15.09.2020).pdf)

dadurch über die gesamte Neufahrzeugflotte im Jahr 2025 und im Jahr 2030 um 2,5 % erhöht, d.h. die Minderungen nach WLTP liegen dann tatsächlich bei 12,5 % bis 2025 bzw. bei 35 % bis 2030.

Durch die EU-Pkw-CO₂-Standards werden für die Jahre 2025 und 2030 Flottenziele festgelegt; nicht aber für die Zwischenjahre. Vor dem Hintergrund der Erfahrungen mit dem Ziel für 2020/21 – es ist ein deutlicher Sprung der CO₂-Emissionen nach unten zu erwarten – sowie dem nicht-linearen Hochlauf der Elektromobilität ist ein linearer Verlauf in den Zwischenjahren wenig wahrscheinlich. Die „worst case“-Annahme wäre, dass jeweils nur die Mindestziele eingehalten werden, d.h. es in den Zwischenjahren (2022-2024 bzw. 2026-2029) keine CO₂-Reduktion der Neuzulassungen gibt. Es wird eine mittlere Annahme getroffen und davon ausgegangen, dass die CO₂-Emissionen der Neuzulassungen zwischen 2021 und 2024 um mindestens 3 g CO₂/km p.a. sinken und 2025 um weitere 10 g CO₂/km; ähnlich zwischen 2025 und 2030.

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen von Pkw liegen im realen Betrieb höher als die im Testzyklus (früher: NEFZ, seit September 2018: WLTP) gemessenen Werte. Umfangreiche Auswertungen des ICCT (Dornoff et al. 2020) zeigen, dass bis zum Jahr 2018 die Abweichung zwischen NEFZ und Realverbrauch bei Diesel- und Benzinmotoren im Mittel auf 39 % angestiegen ist, mit einer etwas höheren Diskrepanz bei Dieselfahrzeugen. Diese Abweichungen werden in der Modellierung hinterlegt.

Die CO₂-Emissionen nach WLTP spiegeln die realen CO₂-Emissionen besser wider als die CO₂-Emissionen nach NEFZ und lagen im Mittel im Jahr 2018 um einen Faktor 1,21 höher als die CO₂-Emissionen nach NEFZ (Dornoff et al. 2020). Die Realabweichung gegenüber WLTP liegt daher mit 14 % (2018) niedriger als die Realabweichung nach NEFZ. Für den Zeitraum 2021-2030 wird für neu zugelassene verbrennungsmotorische Pkw eine geringfügige Zunahme der Realabweichung gegenüber WLTP um 6 %-Punkte auf durchschnittlich 20 % angenommen. Dies ist vor dem Hintergrund des beim NEFZ zu beobachtenden Anstiegs der Realabweichung sowie der Flexibilitäten, die auch beim WLTP bestehen, als eine eher konservative Annahme zu interpretieren.

Besonders hoch ist die Abweichung zwischen Testzyklus- und Realverbrauch derzeit bei Plug-In-Hybridfahrzeugen. Diese werden nach einer stichprobenartigen Datenauswertung in (Plötz et al. 2020) in Deutschland nur zu 12 % elektrisch gefahren, wenn sie als Dienstwagen genutzt werden, und zu 47 % elektrisch, wenn sie privat genutzt werden. Dies wird in der Modellierung für den Status Quo zu Grunde gelegt. Mit steigender Reichweite der Fahrzeuge wird ein höherer elektrischer Fahranteil berücksichtigt, entsprechend des in (ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) et al. 2020) abgeleiteten Zusammenhangs. Auch wird berücksichtigt, dass bei privat genutzten Pkw der elektrische Fahranteil durch steigende CO₂-Preise sowie verbesserte Ladeinfrastruktur zunimmt: Bei privaten Plug-In-Hybrid-Pkw wird angenommen, dass zwei von fünf Nutzer*innen ihr Fahrzeug jeden zweiten Tag laden ein weiteres Fünftel der Nutzer*innen jeden Tag, so dass sich der elektrische Fahranteil bis 2030 auf 60 % erhöht. Bei Dienstwagen bleibt er mit 14 % niedrig, da es keine ökonomischen Anreize zum Laden der Fahrzeuge gibt.

Parametrisierung leichte Nutzfahrzeuge:

Die Ziele werden überwiegend durch emissionsfreie Fahrzeuge erreicht. Der Anteil von batterieelektrischen Fahrzeugen steigt bis 2025 auf 5 % und bis 2030 auf rund 20 % der Neuzulassungen. Die CO₂-Emissionen der Verbrenner sinken zwischen 2021 und 2030 um rund 10 %.

u) CO₂-Standards für schwere Nutzfahrzeuge

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. Die Regulierung sieht zusätzliche Anreize für niedrig emittierende Lkw vor (in Form von Supercredits bis 2024 bzw. einem Benchmark-System ab 2025), wobei auch die nicht-regulierten Lkw-Größenklassen berücksichtigt werden.

Betroffen sind Lkw mit einem Gesamtgewicht von mehr als 16 Tonnen und mit 4x2- und 6x2-Achsenkonfiguration; dies entspricht knapp 80 % der Treibhausgasemissionen 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).

Parametrisierung:

Für die Modellierung wird angenommen, dass die Ziele überwiegend durch einen zunehmenden Anteil von E-Lkw und zu einem (kleineren) Anteil durch Effizienzsteigerung von konventionellen Lkw erreicht werden. Bis zum Jahr 2030 wird dazu von einer Effizienzsteigerung der konventionellen Lkw von insgesamt rund 11 % gegenüber 2020 angenommen. Dies wird durch eine Kombination aus Optimierungen am Antriebsstrang sowie der Reduktion des Luft- und Rollwiderstands erreicht. Gleichzeitig steigt der Anteil der E-Lkw an den Neuzulassungen auf rund 20 %. Bis zum Jahr 2025 beträgt die Effizienzsteigerung der konventionellen Lkw 6 % und der korrespondierende Anteil der E-Lkw beträgt 8 %. Zudem wird durch Elektrifizierung von derzeit unregulierten Nutzfahrzeugen die Möglichkeit zur Anrechnung über den ZLEV-Faktor ausgeschöpft. Diese Annahmen basieren auf Analysen im Projekt StratES und wurden in Gesprächen mit Herstellern und dem VDA diskutiert.

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. Insgesamt führen die genannten Annahmen zu einer Erfüllung der Standards ohne Inanspruchnahme von Banking oder Borrowing.

v) Nationale Umsetzung RED II: Anpassung der Treibhausgasquote

Die RED II gibt u. a. Rahmenbedingungen für den Einsatz erneuerbarer Energien (z. B. verschiedene Arten an Biokraftstoffen, strombasierten Kraftstoffen, erneuerbarer Strom) im Verkehr nach 2020 vor. Beispielsweise sollen künftig stärker als bisher fortschrittliche Biokraftstoffe, die aus Rest- und Abfallstoffen hergestellt werden, zum Einsatz kommen, während die bisher vorwiegend eingesetzten Biokraftstoffe auf Basis von Nahrungs- und Futtermitteln nicht aufwachsen sollen.

Parametrisierung:

Im MMS werden basierend auf dem Entwurf eines Gesetzes zur Weiterentwicklung der THG-Quote (Deutscher Bundestag 09.03.2021) die in Tabelle 83 dargestellten energetischen Biokraftstoffanteile angesetzt. Nach 2030 bleibt der Biokraftstoffanteil bei 8,9 %.

Tabelle 83: Energetischer Anteil von Biokraftstoffen im Verkehr

	2022	2023	2024	2025	2026	2028	2030
Annex A	0,2 %	0,3 %	0,4 %	0,7 %	1 %	1,7 %	2,6 %
Annex B	1,9 %	1,9 %	1,9 %	1,9 %	1,9 %	1,9 %	1,9 %
Konventionell	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %
biogen gesamt	6,5 %	6,6 %	6,7 %	7,0 %	7,3 %	8,0 %	8,9 %

Quelle: (Deutscher Bundestag 09.03.2021), eigene Darstellung.

Ab dem Jahr 2026 werden im MMS auch strombasierte Flüssigkraftstoffe im Verkehr eingesetzt. Nach dem Referentenentwurf sollen auch solche Kraftstoffe auf die THG-Quote anrechenbar sein. Für strombasiertes Kerosin wird eine Quote von 0,5 % ab 2026, 1 % ab 2028 sowie 2 % ab 2030 angenommen. Die Quote für strombasiertes Kerosin ist separat zur THG-Quote, da diese nur die Inverkehrbringer von Kerosin verpflichtet. Insgesamt wird für strombasierte Flüssigkraftstoffe ein Potenzial von maximal knapp 40 PJ im Jahr 2030 und 70 PJ im Jahr 2035 hinterlegt. Dies entspricht im Jahr 2030 in etwa 10 industriellen Großanlagen mit einer Kapazität von 100.000 t an Kraftstoffproduktion, für die eine „first-of-its-kind“-Anlage erst um das Jahr 2030 erwartet wird (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2020).

Tabelle 84: Einsatz strombasierter Flüssigkraftstoffe im Verkehr

	2026	2028	2030	2035	2040
Kerosin (%) bezogen auf das in Deutschland vertankte Kerosin	0,5 %	1,0 %	2,0 %	2,0 %	2,0 %
Kerosin (PJ)	2,3	4,8	9,7	10,0	10,3
Diesel/Benzin (%) bezogen auf den Gesamtkraftstoffverbrauch	0,2 %	0,4 %	1,6 %	4,0 %	4,9 %
Diesel/Benzin (PJ)	4,1	7,8	29,1	59,0	58,5
Strombasiert gesamt (PJ)	6,5	12,6	38,8	69,1	68,8

Quelle: eigene Darstellung Öko-Institut.

w) Umsetzung der Clean Vehicle Directive

Die novellierte Clean Vehicle Directive (Richtlinie (EU) 2019/1161 zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge) schreibt feste Mindestziele für die öffentliche Beschaffung sauberer leichter und schwerer Nutzfahrzeuge (Klassen M₁₋₃ sowie N₁₋₃) fest. Busse im ÖPNV werden aufgrund der Nutzung alternativer Antriebe als sauber definiert, die Hälfte der insgesamt anzuschaffenden sauberen Busse muss emissionsfrei sein. Saubere Busse müssen im ersten Bezugszeitraum zwischen August 2021 und Ende 2025 einen Anteil an den Neubeschaffungen von 45 % und im zweiten Referenzzeitraum zwischen 2026 und 2030 von insgesamt 65 % ausmachen.

Parametrisierung:

Es wird angenommen, dass die CVD-Richtlinie erfüllt wird. Nach Ausschöpfung der Fördermittel für emissionsarme Busse (siehe Maßnahme m) oben) müssen in den Jahren 2024 und 2025 noch etwa weitere 3000 emissionsarme Busse angeschafft werden, um das Ziel von durchschnittlich 45 % der Neuzulassungen zu erreichen. Im Jahr 2025 liegt der Anteil dann bei rund 53 % und steigt weiter linear an bis auf 73 % im Jahr 2030, sodass im Zeitraum 2025 bis 2030 ebenfalls die geforderte Quote von 65 % erreicht wird.

Zudem wird angenommen, dass aufgrund der höheren Investitionskosten, 2/3 der „sauberen“ Beschaffungen aus emissionsfreien Fahrzeugen besteht. Bei den elektrischen Bussen wird im Vergleich zu den konventionellen Bussen eine um 20 % niedrigere Fahrleistung angenommen, da sie bevorzugt auf innerstädtischen Routen eingesetzt werden.

x) Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen und alternative Antriebe

Die Maßnahme zur Nutzung von Landstrom entstammt dem Klimaschutzprogramm 2030 (Maßnahmenbündel 3.4.3.7). Häufig wird der während der Liegezeiten von Binnenschiffen in Häfen benötigte Strom noch an Bord durch den Betrieb von Hilfsmotoren erzeugt. Der verpflichtende Einsatz von

Landstrom während der Liegezeiten in der Binnenschifffahrt wird derzeit von der Bundesregierung geprüft.

Am 09.04.2020 trat die Richtlinie über Zuwendungen zur Marktaktivierung alternativer Technologien für die umweltfreundliche Bordstrom- und mobile Landstromversorgung von See- und Binnenschiffen in Kraft. Hierfür stehen mit der Finanzplanung 2020 9 Mio. € für die Jahre 2020 bis 2023 zur Verfügung. Fördergegenstand sind Investitionen in die bordseitige Aus- und Umrüstung von See- und Binnenschiffen mit umweltfreundlichen Bordstromversorgungssystemen oder in die Beschaffung mobiler (containerisierter, rollender oder schwimmender) Landstromversorgungssysteme gefördert, bei denen Energiespeicher, Energiewandlersysteme, Plug-In Systeme oder Stromübergabesysteme bzw. Systemkombinationen zum Einsatz kommen.

Die Zuständigkeit für Infrastrukturmaßnahmen und damit für die Errichtung und den Betrieb von Landstromanlagen in Binnen- und Seehäfen liegt bei den Bundesländern. Der Bund gewährt Finanzhilfen zur Deckung der Kosten für die Errichtung von Landstromanlagen an Liegeplätzen der See- und Binnenschifffahrt.

Das Konjunkturprogramm 2020 sieht zusätzliche Investitionen von insgesamt 1 Mrd. € in eine Saubere Schifffahrt vor (Maßnahme 35k, z. B. Umstellung auf LNG, Effizienzverbesserungen). Zum Jahresbeginn 2021 wurde ein neues Förderprogramm zur nachhaltigen Modernisierung von Küstenschiffen gestartet, das eine Reduzierung von Luftschadstoffen und Treibhausgasen sowie eine verbesserte Energieeffizienz von Küstenschiffen zum Ziel hat.

Des Weiteren wurde eine neue technologieoffene Förderrichtlinie zur nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen erarbeitet, die zum 1. Januar 2021 in Kraft treten soll. Nach dieser neuen Richtlinie wird die Förderung von Binnenschiffen substanziell erweitert. So sollen zum Beispiel rein elektrische Antriebe, Hybridantriebe und Motoren, die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden, mit einer Förderquote von bis zu 80 % bezuschusst werden.

Die vorbenannten Instrumente sind ebenfalls Teil des im Mai 2019 beschlossenen Masterplans Binnenschifffahrt (BMVI 2019).

Tabelle 85: Haushaltsmittel für alternative Antriebe in der Binnenschifffahrt (Mio. €)

Titel	Zweckbestimmung	2020	2021	2022	2023	2024
892 62	Zuschüsse für Investitionen zur Förderung von umweltfreundlicher Bordstrom- und mobiler Landstromversorgung für See- und Binnenschiffe	5	2,2			
683 13	Förderprogramm Motoren und Modernisierung für die Binnenschifffahrt	6	30			

Parametrisierung:

Es wird angenommen, dass bis 2030 50 % der Binnenschiffe Landstrom nutzen. 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 0,5 %.

y) Binnenschifffahrt: Abschaffung der Kanalgebühren

Zum 1.1.2019 wurde die Abschaffung der Kanalgebühren („Binnenschiffs-Maut“) wirksam. Mit dem KSPr 2030 wurde die Abschaffung entfristet.

Parametrisierung:

Die Abschaffung der Kanalgebühren bedeutet eine Verringerung der Kosten der Binnenschifffahrt um 45 Mio. €. Es wird angenommen, dass sich durch die Maßnahme die Transportkosten in der Binnenschifffahrt um knapp 5 % reduzieren (bei angenommenen Transportkosten i.H.v 2 ct/km nach Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost (WSD Ost) (2007). Bei einer Preiselastizität von -0,7 (Puwein 2009) ergibt sich daraus eine Zunahme der Binnenschifffahrt um gut 3 %. Es wird eine Verlagerung vom Lkw angenommen.

z) Förderung der Umstellung von Flugzeugflotten

Die beschleunigte Umstellung von Flugzeugflotten auf Modelle neuester Bauart wird durch 1 Mrd. € unterstützt (Konjunkturpaket 35I)

Parametrisierung:

Es wird angenommen, dass 80 neue Flugzeuge gefördert werden. Es werden durchschnittliche Jahresemissionen von rund 44.000 t CO₂ pro Flugzeug angenommen (Deutsche Lufthansa AG (Lufthansa) 2020b), welche durch die Neuanschaffungen um 25 % sinken (Deutsche Lufthansa AG (Lufthansa) 2020a). Aufgrund von bereits vor der Fördermaßnahme beschlossenen umfangreichen Flottenerneuerungsprogrammen sowie der durch die Corona-Krise beschleunigten Stilllegung älterer Flugzeuge, wird von einem Mitnahmeeffekt von 50 % ausgegangen.

8.2.3 Flankierende Instrumente

Die folgenden flankierenden Instrumente werden im Modell nicht explizit parametrisiert und abgebildet; sie wirken insofern unterstützend für die anderen Maßnahmen.

aa) Gebühren für Bewohnerparkausweise

Mit dem „Achten Gesetz zur Änderung des Bundesfernstraßengesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften“ vom 29. Juni 2020 (Deutscher Bundestag 29.06.2020a) haben die Länder mit § 6 Abs. 5a des Straßenverkehrsgesetzes eine Ermächtigungsgrundlage erhalten, um die Gebührensätze für das Ausstellen von Parkausweisen für Bewohner städtischer Quartiere mit erheblichem Parkraumangel eigenständig regeln zu können.

bb) Beschleunigung von Planung und Umsetzung neuer Infrastrukturen

Mit dem im Frühjahr 2020 in Kraft getretenen Maßnahmengesetzvorbereitungsgesetz wurde eine Genehmigung von Schienenverkehrsprojekten durch Gesetz ermöglicht. Damit soll die Akzeptanz für solche Projekte insgesamt erhöht werden.

Raumordnungsverfahren werden durch das im Dezember 2020 in Kraft getretene Investitionsbeschleunigungsgesetz vereinfacht und mit dem Planfeststellungsverfahren enger verzahnt. Ersatzneubauten wie z. B. Brücken wurden durch das im Frühjahr 2020 in Kraft getretene Planungsbeschleunigungsgesetz III von einer Genehmigungspflicht freigestellt. Weitere Kategorien, in denen auf eine Genehmigung verzichtet werden kann, enthält das oben genannte Investitionsbeschleunigungsgesetz. So wird darin z. B. auch die Ausstattung einer Schienenstrecke mit einer Oberleitung unter bestimmten Bedingungen genehmigungsfrei gestellt.

Als Maßnahme zur schnelleren Umsetzung von Investitionsprojekten schlägt der Koalitionsausschuss im Konjunkturpaket (Maßnahme 11) eine temporäre Vereinfachung vor, etwa durch eine Verkürzung der Vergabefristen bei EU-Vergabeverfahren und die Anpassung der Schwellenwerte für

beschränkte Ausschreibungen und freihändige Vergaben. Auf europäischer Ebene soll ein Programm zur Entbürokratisierung, zur Beschleunigung des Planungsrechts, zur Vereinfachung des Vergaberechts und zur Reform des Wettbewerbsrechts angestoßen werden. Dies deckt sich mit einem Vorstoß der EU, die Umsetzung von Verkehrsinfrastrukturprojekten zu beschleunigen (EC COM(2018) 277). Durch diese Instrumente soll die zeitnahe Fertigstellung neuer Verkehrs- und Energieinfrastrukturen sichergestellt werden.

cc) Unterstützung bei der Transformation der Automobilindustrie

Die Transformation zu nachhaltiger Mobilität wird durch Förderung von Forschung und Entwicklung unterstützt. Reallabore und Modellprojekte erproben den Wandel in der Praxis (KSPr 3.4.1.5). Ziel ist der Kompetenz- und Technologieausbau entlang der gesamten Wertschöpfungskette, besonders in der Zulieferindustrie. Dies ist besonders in Hinblick auf mögliche Wertschöpfungspotentiale relevant. Die neu gegründete Nationale Leitstelle E-Mobilität koordiniert den Hochlauf der Ladeinfrastruktur (Maßnahmenbündel 3.4.3.9 im KSPr 2030). Der Aufbau einer nationalen Batteriezellproduktion wird gefördert und die Zulieferer in der Transformation gestützt (KSPr 3.4.4.10).

dd) Novelle der Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung

Mit der Novelle der Verordnung werden sowohl das bestehende Pkw-Label als auch die Regelungen für wichtige Verbraucherinformationen bei der Werbung für neue Pkw neu gefasst. Das Pkw-Label informiert vor allem über den Energieverbrauch und CO₂-Angaben eines Neufahrzeugs. Energie- und CO₂-Angaben werden im Zuge der Novellierung auf den Testzyklus WLTP umgestellt. Weiterhin werden beispielsweise elektrische Reichweiten sowie Energiekosten dargestellt.

Durch diese Regelungen werden dem potenziellen Käufer wichtige entscheidungsrelevante Informationen zur Verfügung gestellt. In der Folge kann er sich auf besserer Grundlage für ein Fahrzeug mit geringeren CO₂-Emissionen entscheiden. Die Anpassung auf WLTP führt zu einer realistischeren Darstellung der CO₂-Emissionen und des Energieverbrauchs von neuen PKW und könnte somit ebenfalls zu angepassten Kaufentscheidungen führen. Die Novellierung der Pkw-EnVKV ist noch nicht abgeschlossen.

ee) Steigerung des Anteils umweltschonend betriebener Kraftfahrzeuge im Fuhrpark des Bundes

Der Anteil von Kraftfahrzeugen mit alternativen und umweltschonenden Antriebstechnologien an den Neu- und Ersatzbeschaffungen soll gemäß Klimaschutzprogramm 2030 auf möglichst 40 % bis 2025 und auf möglichst 100 % bis 2030 steigen.⁹⁰ Darunter fallen Batterieelektrofahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge, von außen aufladbare Hybridelektrofahrzeuge, die die Mindestkriterien nach § 3 EmoG erfüllen, sowie Fahrzeuge, die nachweislich zu 100 % mit Biogas betrieben werden. Dabei soll im Jahr 2030 der Anteil von Plug-in-Hybriden in den Fuhrparks des Bundes nicht größer als 50 % sein.

ff) Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen, innovative Mobilitätsformen ermöglichen

Die Anpassung des Personenbeförderungsgesetzes (PBefG) und die Etablierung von Experimentierklauseln schaffen den Rahmen für (neue) digital gestützte Mobilitätsdienstleistungen infolge von Sharing, Vernetzung, Automatisierung und Künstlicher Intelligenz. Zudem sollen bis zum Ende der Legislatur straßenverkehrsrechtlicher Grundlagen geändert werden, um einen Rechtsrahmen für das autonome Fahren in festgelegten Betriebsbereichen zu schaffen.

⁹⁰ Ausgenommen hiervon sind Sonderfahrzeuge und handelsübliche Fahrzeuge, die im Zusammenhang mit der Wahrnehmung von Aufgaben der Landes- und Bündnisverteidigung, Einsätzen und einsatzgleichen Verpflichtungen der Bundeswehr eingesetzt werden.

Der Aufbau schneller Mobilfunknetze (insbesondere 5G-Netz) und die Etablierung zuverlässiger Datenschutzkonzepte ermöglichen die Automatisierung und Vernetzung von Verkehrsmitteln und Verkehrsinfrastruktur sowie neue Mobilitätsdienstleistungen und -konzepte. Insbesondere Ride-Sharing-Konzepte können die Multi-Modalität stärken und die Pkw-Fahrleistungen verringern. Praxisnahe Demonstrationsvorhaben und der Einsatz künstlicher Intelligenz auf digitalen Testfeldern sollen automatisierte Mobilität fördern und die System-Effizienz verbessern (Maßnahmenbündel KSP 3.4.3.12).

Als Folge der Digitalisierung können verkehrliche Routinen verändert werden. Neue digitale Bedienkonzepte ermöglichen eine Integration von ÖPNV- und Sharing-Angeboten. Durch die Vernetzung und Automatisierung kann der Verkehrsfluss und das Parkraummanagement verbessert werden. Digitalisierung fördert auch die Nutzung von Home-Office und virtuellen Meetings. Werden die aufkommenden Möglichkeiten zielgerichtet reguliert, kann es zu substanziellen Einsparungen der Treibhausgasemissionen kommen. Dabei müssen Rebound-Effekte vermieden werden.

8.3 Annahmen und Parameter

Die folgende Tabelle stellt die im Maßnahmen-Kapitel hergeleiteten Annahmen zur Parametrisierung der Maßnahmen im Überblick dar.

Tabelle 86: Überblick über die Maßnahmen im Verkehrssektor

Maßnahme	Quelle	Enthalten im KSPR-Szenario?	Parametrisierung
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Wärme und Verkehr (BEHG)	KSPR 2030	Ja	Exogener CO ₂ -Preispfad
Luftverkehrsteuer	KSPR 2030	Ja	LuftVStG führt zu höheren Ticketpreisen: +10 % nationale und +2,5 % internationale Flüge
MWSt Bahn-Fernverkehr	KSPR 2030	Ja	Absenkung von 19 auf 7 %, entspricht 10 % Preissenkung
Elektrifizierung Schienenverkehr	KSPR 2030	Ja	Elektrifizierungsgrad steigt von 61 % (2019) auf 70 % (2030)
Stärkung Schienenpersonenfernverkehr, Deutschlandtakt und Digitalisierung	KSPR 2030	Ja	Zeiteinsparung Reisende im SPFV von 5 % bis 2030
Mittelerhöhung GVFG + Regionalisierungsmittel, Verbesserung der Angebotsqualität und Attraktivität des ÖPNV	KSPR 2030 / Konjunkturpaket	Ja	Mittelerhöhung um ca. 21 Mrd. € bis 2031 wirkt auf Verlagerung. Regionalisierungsmittel aus KPr (2,5 Mrd.) zum Verlustausgleich, ohne zusätzliche Verlagerung
Stärkung Schienengüterverkehr	KSPR 2030	Ja	Bis zum Jahr 2034 können ca. 182 Mrd. tkm auf der Schiene transportiert werden und bis zum Jahr 2040 ca. 200 Mrd. tkm.
Ausbau von Radinfrastruktur (Wege und Abstellanlagen)	KSPR 2030	Ja	zusätzlich 900 Mio. € insgesamt bis 2023 für den Radverkehr
Kaufprämie und Infrastrukturförderung E-Pkw	KSPR 2030/ Konjunkturpaket	Ja, aber im KSPR 2030 niedrigere Kaufprämie	Umsetzung gemäß Förderrichtlinie (Bundesanteil Kaufprämie bis zu 6.000 €), Begrenzung der Mittel auf die Gesamtsumme (4,69 Mrd. €, bis längstens 2025). Infrastrukturförderung: Anteile der insgesamt für Pkw

Maßnahme	Quelle	Enthalten im KSPR-Szenario?	Parametrisierung
			und Lkw im EKF zur Verfügung stehenden 5,6 Mrd. €
Absenkung der Dienstwagenbesteuerung für E-Pkw bis 2030	KSPR 2030/ Konjunkturpaket	Ja, aber im KSPR geringere Absenkung	Jahressteuergesetz 2019: Privat genutzte E-Dienstwagen werden statt mit 1 % des Listenpreises mit der Hälfte des Listenpreises (PHEV) oder eines Viertels des Listenpreises (BEV, FCEV wenn Listenpreis <= 60.000 €) versteuert.
Absenkung der EEG-Umlage ab 2021	KSPR-2030 / Konjunkturpaket	Ja	Begrenzung EEG-Umlage auf 6,5 ct/kWh (2021) und 6,0 ct/kWh (2022)
Stärkere Gewichtung der CO ₂ -Komponente der Kraftfahrzeugsteuer ab 2021	KSPR 2030	Ja	Gemäß Kraftfahrzeugsteuergesetz
Förderung von elektrischen Bussen	KSPR 2030 / Konjunkturpaket	Ja	1,85 Mrd. € Fördermittel insgesamt (2020-2024)
Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben	KSPR 2030 / Konjunkturpaket	Ja	Laut Finanzplanung stehen 1,65 Mrd. € für 2021 bis 2024 zur Verfügung.
Sonder-AfA für elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge bis 2030	KSPR 2030	Ja, aber nur bis 7,5 t, jetzt alle NFz	Jahressteuergesetz 2019 (Sonder-Afa i.H.v. zusätzlich 50 % im Anschaffungsjahr bis 2030)
Förderung des Aufbaus der Versorgungsinfrastruktur für elektrifizierte Nutzfahrzeuge	KSPR 2030 / Konjunkturpaket	Ja, in geringerer Höhe	Anteil der im EKF zur Verfügung stehenden Mittel für Tank- und Ladeinfrastruktur für Pkw und Lkw i.H.v. 5,6 Mrd. €
Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler	KSPR 2030	Ja	Gesetz zur Umsetzung des KSPR 2030 im Steuerrecht: Vorübergehende Erhöhung der Entfernungspauschale führt zu Erhöhung der Fernpendler

Maßnahme	Quelle	Enthalten im KSPR-Szenario?	Parametrisierung
Entwicklung regenerativer Kraftstoffe und Förderung von Anlagen zur Erzeugung strombasierter Kraftstoffe, insbesondere zur Erzeugung von strombasiertem Kerosin und fortschrittlicher Biokraftstoffe	KSPR 2030	Ja	Laut Finanzplanung stehen hierfür 2,14 Mrd. € für 2021 bis 2024 zur Verfügung.
CO ₂ -Spreizung der Lkw-Maut und Einführung eines CO ₂ -Aufschlags	KSPR 2030	Nein	Ab 2023 Integration CO ₂ -Aufschlag in Höhe des BEHG-Pfades in die Lkw-Maut. Nullemissionsfahrzeuge werden mit bis zu 75 % gegenüber dem Maut-Höchstsatz begünstigt.
Fortschreibung EU-CO ₂ -Standards für Pkw und LNF	EU / KSPR 2030	Ja	Pkw: Ziel von -37,5 % ggü. 2021. LNF: Ziel von -31 % ggü. 2021. Zielerreichung vorwiegend über E-Fahrzeuge.
EU-CO ₂ -Standards für SNF	EU / KSPR 2030	Ja	
Nationale Umsetzung RED II: Anpassung der Treibhausgasquote	EU / KSPR 2030	Ja	Der Anteil von Biokraftstoffen steigt bis 2030 auf 8,9 % und es werden 30 PJ strombasierte Kraftstoffe eingesetzt. ⁹¹
Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen	KSPR 2030	Ja	Bis 2030 nutzen 50 % der Binnenschiffe Landstrom
Binnenschifffahrt: Abschaffung Kanalgebühren	KSPR 2030	Ja	Einsparung von 45 Mio. € p.a. für die Binnenschifffahrt
Förderung Umstellung von Flugzeugflotten	Konjunkturpaket	Nein	1 Mrd. € zur beschleunigten Umstellung und damit Anschaffung von 80 neuen Flugzeugen
Gebühren für Bewohnerparkausweise		Nein	Flankierend

⁹¹ Konkretisierung der Ausgestaltung ggü. dem Maßnahmenbericht.

Maßnahme	Quelle	Enthalten im KSPR-Szenario?	Parametrisierung
Unterstützung bei der Transformation der Automobilindustrie		Nein	Flankierend
Änderung der Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung		Nein	Flankierend
Steigerung des Anteils umweltschonend betriebener Kraftfahrzeuge im Fuhrpark des Bundes	KSPR 2030	Nein	Flankierend
Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen und innovative Mobilitätsformen ermöglichen	KSPR 2030	Ja	Flankierend
Maßnahmengesetzvorbereitungsgesetz	KSPR 2030	Nein	Flankierend
Planungsbeschleunigungsgesetz III	KSPR 2030	Nein	Flankierend

Quelle: Eigene Zusammenstellung

8.4 Ergebnisse

8.4.1 Verkehrsnachfrage

Personenverkehr

Tabelle 87 stellt die Entwicklung der Personenverkehrsnachfrage im MMS bis 2040 dar. Daten bis 2018 sind aus „Verkehr in Zahlen“ (BMVI 2018) übernommen.⁹²

Der Pkw-Verkehr bleibt im MMS bis 2030 in etwa auf vergleichbarem Niveau zu heute. Dabei spielen zwei gegenläufige Faktoren eine Rolle: Einerseits wird entsprechend der Referenzentwicklung der NPM davon ausgegangen, dass sich der bisherige Trend zu steigendem Pkw-Besitz und steigenden Fahrleistungen (ohne Maßnahmen) fortsetzen würde; andererseits wirken die durch den CO₂-Preis steigenden Kraftstoffkosten etwas dämpfend auf die Nachfrage. Nach 2030 steigt der Pkw-Verkehr weiter leicht an, was u. a. an den niedrigeren Kilometerkosten von elektrischen Pkw liegt.

Die Verkehrsnachfrage im öffentlichen Personenverkehr ist zwischen 2010 und 2018 nach Daten des statistischen Bundesamts um durchschnittlich rund 1,2 % p.a. gestiegen. Im MMS nimmt der öffentliche Personenverkehr zwischen 2018 und 2030 um jährlich durchschnittlich 1,5 % zu. Dazu trägt die Kombination aus steigendem CO₂-Preis und der Förderung des öffentlichen Verkehrs bei. Besonders der Schienenverkehr nimmt zu (+30 % zwischen 2018 und 2030). Bei SSU (+16 %) und Bussen (+7 %) fällt der Anstieg geringer aus, wobei auch der Rückgang des Reisebusverkehrs eine Rolle spielt, während der Linienbusverkehr stärker zunimmt.

⁹² Nach der Erhebung „Mobilität in Deutschland 2017“ ist der Besetzungsgrad von Pkw seit der letzten Erhebung (2008) zurückgegangen. Dadurch sind die Pkw-Personenkilometer bereits im Basisjahr (2018) niedriger als in vorigen Projektionen. Eine Wirkung auf die CO₂-Emissionen hat dies jedoch nicht, da die Pkw-Fahrleistung davon unberührt ist.

Beim Luftverkehr ist einerseits der nationale, d.h. innerdeutsche, Luftverkehr dargestellt. Zusätzlich sind die aus Deutschland abgehenden internationalen Flüge ausgewiesen, deren Treibhausgasemissionen allerdings nicht Teil der nationalen Klimaschutzverpflichtungen sind. Hier wird davon ausgegangen, dass das Vor-Corona-Niveau im Jahr 2022 wieder erreicht wird.

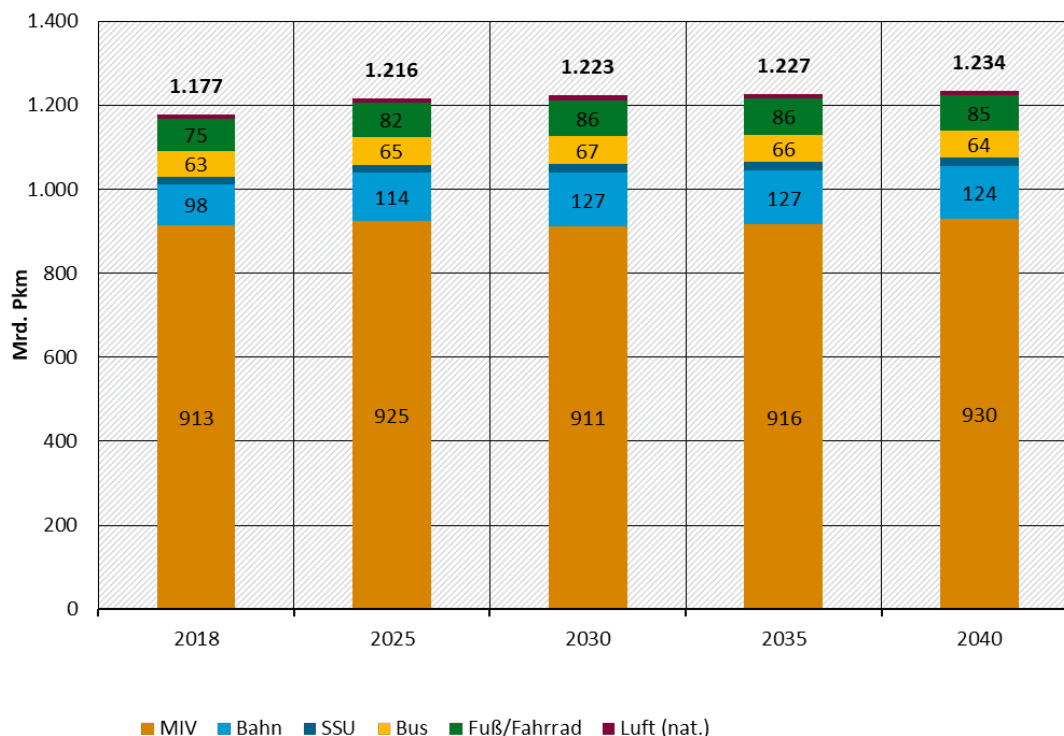
Tabelle 87: Verkehrsnachfrage Personenverkehr im MMS in Mrd. pkm

	2010	2018	2025	2030	2035	2040
Pkw	884	895	906	893	899	914
Kraftrad	19	18	18	18	17	17
ÖPV – Bahn	84	98	114	127	127	124
ÖPV - SSU ⁹³	16	18	19	20	20	20
ÖPV – Bus	62	63	65	67	66	64
Flugzeug (national)	11	10	10	11	11	12
Rad/Fuß	67	75	82	86	86	85
Gesamt national	1.142	1.177	1.216	1.223	1.227	1.234
Flugzeug (international)	182	238	287	323	359	395
Gesamt	1.324	1.415	1.503	1.546	1.587	1.629

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

⁹³ Straßen-, Stadt-, und U-Bahnen.

Abbildung 34: Personenverkehrsnachfrage im MMS, 2018-2040



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

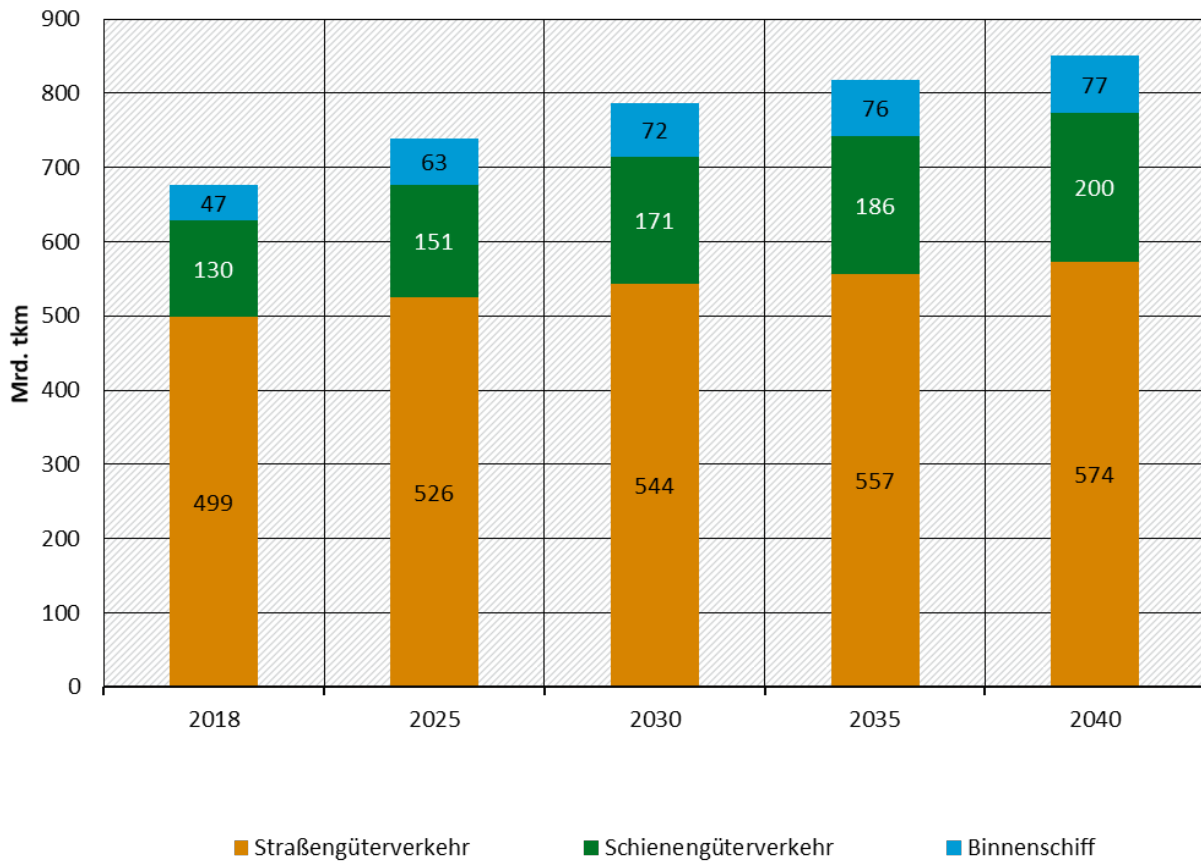
Güterverkehr

Abbildung 35 und Tabelle 88 stellen die Entwicklung der Güterverkehrsnachfrage im MMS bis 2040 dar. Daten bis 2018 sind aus „Verkehr in Zahlen“ übernommen. Der Güterverkehrsaufwand insgesamt nimmt im Szenario zwischen 2018 und 2030 um durchschnittlich 1,3 % p.a. zu, was der Wachstumsrate zwischen 2010 und 2018 entspricht. Im Zeitraum 2030 bis 2040 liegt der Anstieg bei 0,8 % p.a.

Der Schienengüterverkehr hat zwischen 2010 und 2018 ein deutliches Wachstum von durchschnittlich 2,4 % p.a. verzeichnet, mit besonders hohen Wachstumsraten in den letzten Jahren. Im MMS nimmt der Schienengüterverkehr zwischen 2018 und 2030 weiter deutlich zu um 1,3 % p.a. Der Schienenverkehr erreicht im Jahr 2030 mit 171 Mrd. tkm einen Modalanteil in Höhe von 22 % und im Jahr 2040 mit 200 Mrd. tkm einen Anteil von 23,5 %.

Die Verkehrsnachfrage in der Binnenschifffahrt ist seit 2010 zurückgegangen. Im MMS wird von einer Erholung der Nachfrage ausgegangen, auf 72 Mrd. tkm im Jahr 2030 und 77 Mrd. tkm im Jahr 2040.

Abbildung 35: Güterverkehrsnachfrage im MMS, 2018-2040



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Tabelle 88: Verkehrsnachfrage Güterverkehr im MMS in Mrd. tkm

	2010	2018	2025	2030	2035	2040
Straße	441	499	526	544	557	574
Schiene	107	130	151	171	186	200
Binnenschiff	62	47	63	72	76	77
Flugzeug (national)	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06
Gesamt national	610	676	740	787	818	851
Flugzeug (international)	11	13	14	16	17	19
Gesamt	621	689	754	803	835	869

Quelle: Eigene Berechnungen

Fahrleistungen im Straßenverkehr

Für die Fahrleistungen im Straßenverkehr wird bis 2018 das Fahrleistungsgerüst aus TREMOD 6.01 verwendet. Die Fahrleistungen bei Lkw steigen im Zeitraum 2018-2030 um rund 1 % p.a.⁹⁴. und bei leichten Nutzfahrzeugen um rund 0,7 % p.a. Bei Pkw ist die Fahrleistung im Jahr 2030 auf ähnlichem Niveau wie 2018. Zwischen 2030 und 2040 nimmt die Fahrleistung bei Lkw um 0,6 % p.a. zu und bei leichten Nutzfahrzeugen um 0,8 % p.a.

Tabelle 89: Fahrleistungen im MMS in Mrd. km

	2010	2018	2025	2030	2035	2040
Pkw	595	642	650	641	645	655
LNF	39	52	55	57	60	63
Lkw 3,5-12t zGG	11	10	11	12	13	14
Lkw >12t zGG	46	51	55	58	60	63

Quelle: Eigene Berechnungen

Seeverkehr

Für den Seeverkehr wurde die Entwicklung aus Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht (Öko-Institut und Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) 2015) hinterlegt. Der Seeverkehr nimmt im Zeitraum 2018-2040 um 57 % zu.

Tabelle 90: Verkehrsnachfrage Seeverkehr im MMS in Mrd. tkm

	2010	2018	2025	2030	2035	2040
Hochseeschifffahrt	1.742	2.152	2.580	2.930	3.152	3.386

Quelle: (Öko-Institut und Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) 2015)

⁹⁴Bei Lkw wird entsprechend der Referenzentwicklung der NPM bis 2030 ein leichter Rückgang bei der Auslastung der Fahrzeuge hinterlegt, welcher durch eine Verschiebung von Massengütern zu Stückgut und Einheitsladung zu Stande kommt. Der Anstieg der Fahrleistung fällt bei Lkw daher etwas höher aus als der Anstieg der Verkehrsleistung.

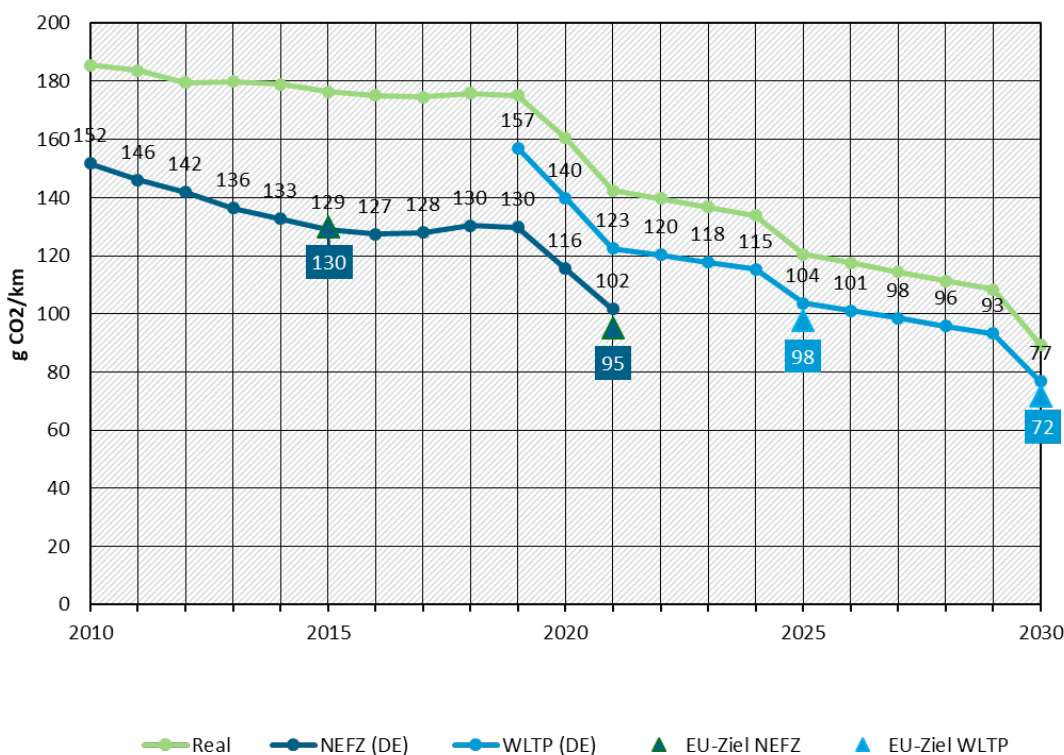
8.4.2 Antriebstechnologien

Pkw

Die CO₂-Emissionen neu zugelassener Pkw reduzieren sich bis 2030 entsprechend der EU-CO₂-Emissionsstandards deutlich. Das EU-Ziel einer Reduktion von 37,5 % bis 2030 (gegenüber 2021) entspricht 72 g CO₂/km nach WLTP⁹⁵. Das tatsächlich EU-weit zu erreichende Ziel für 2030 erhöht sich je nach Anteil der ZLEV auf bis zu 77 g CO₂/km.

Im MMS reduzieren sich die CO₂-Emissionen von in Deutschland neu zugelassenen Pkw im Jahr 2025 auf 98 g CO₂/km (WLTP) und im Jahr 2030 auf 72 g CO₂/km. Gemäß der hinterlegten Annahmen (siehe Abschnitt 8.3) ist der Reduktionspfad nicht linear, sondern der Großteil der Reduktion erfolgt bei Inkrafttreten der verschärften Zielwerte in den Jahren 2025 und 2030. Nach 2030 wird keine weitere Reduktion angenommen.

Abbildung 36: CO₂-Emissionen neu zugelassener Pkw, 2010-2030



Quelle: Eigene Berechnungen

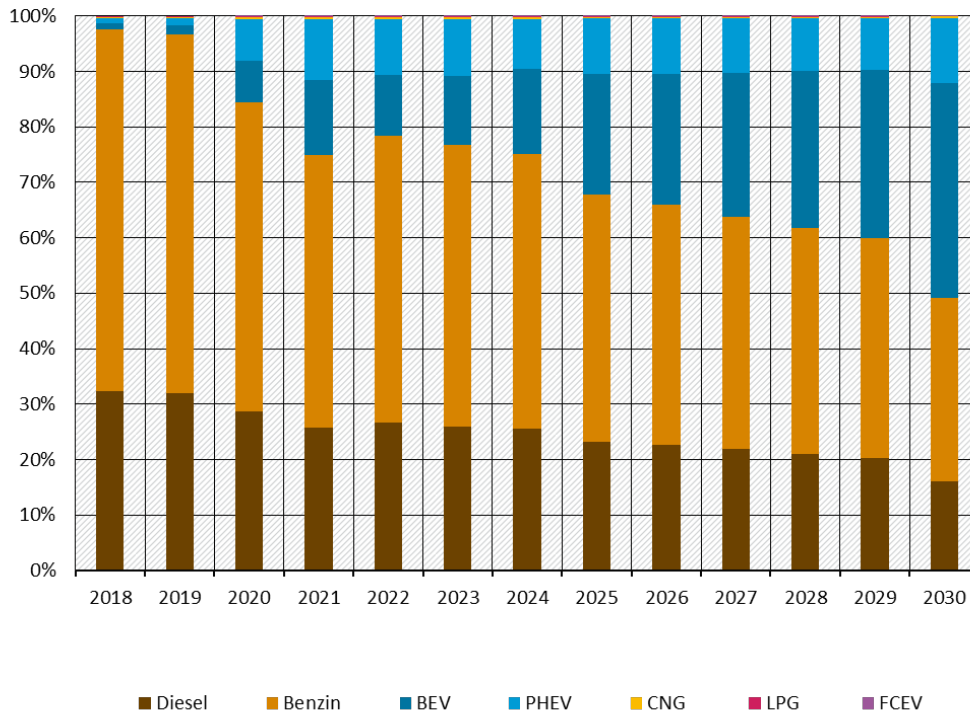
Die CO₂-Standards für Pkw werden im MMS maßgeblich durch den steigenden Anteil von E-Fahrzeugen erreicht. Konventionelle Pkw werden dagegen im Szenario nicht effizienter.

Im MMS steigt der Anteil der batterieelektrischen Pkw an den Neuzulassungen bis zum Jahr 2030 auf 39 % und der Anteil von Plug-In-Hybriden auf 11 %. Im Jahr 2021 führt u. a. die erhöhte Kaufprämie (verdoppelter Bundesanteil) zu einem Anteil von 14 % batterieelektrischen Fahrzeugen und 11 % Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen.

Im Jahr 2030 sind 8,5 Mio. batterieelektrische und Plug-In-Hybridfahrzeuge im Bestand, davon 2/3 rein elektrisch.

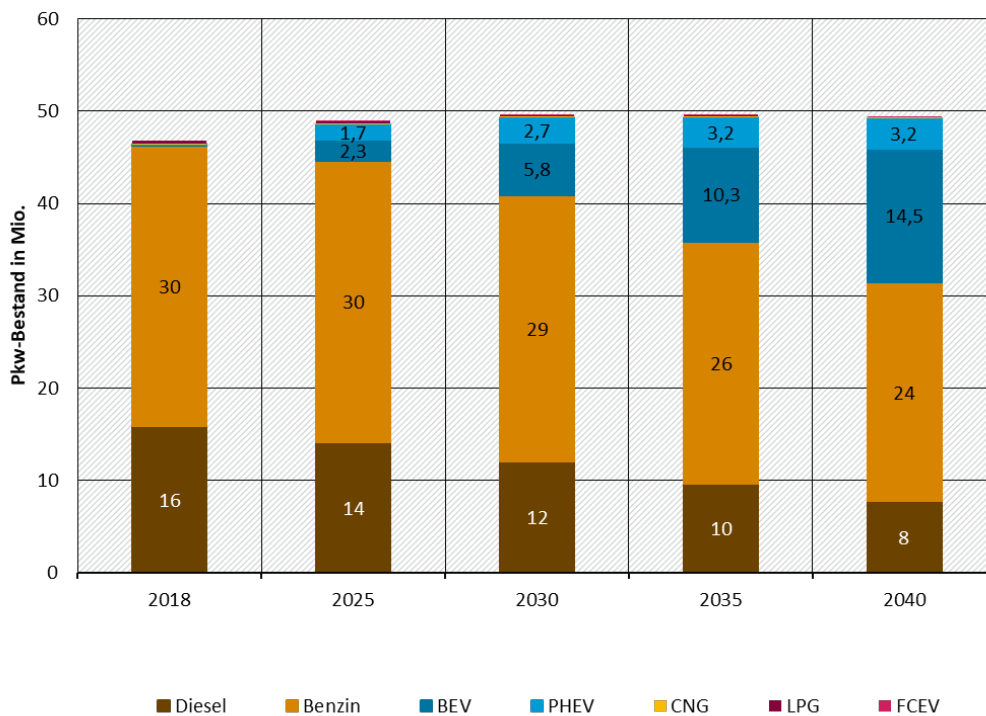
⁹⁵ Dabei ist ein Umrechnungsfaktor von 1,21 zwischen NEFZ und WLTP hinterlegt.

Abbildung 37: Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen nach Antrieben, 2018-2030



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 38: Pkw-Bestand nach Antrieben, 2018-2040

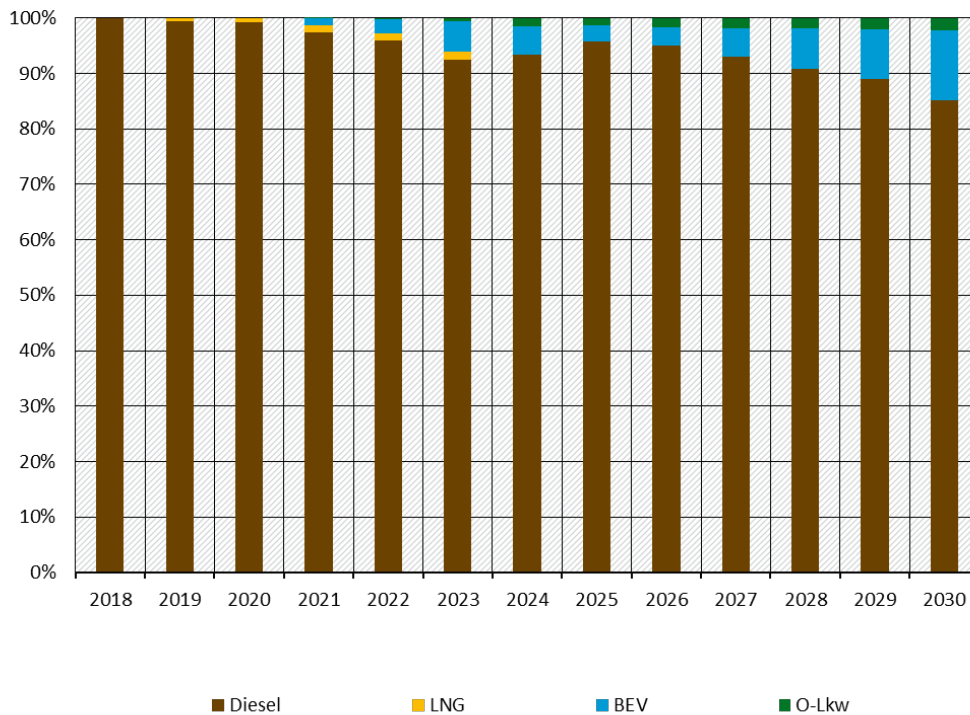


Quelle: Eigene Berechnungen

Lkw

Der Anteil elektrischer Antriebe an den Lkw-Neuzulassungen (>3,5t zGG) nimmt im MMS bis zum Jahr 2030 auf 15 % zu. Die Förderung beim Kauf von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben zeigt dabei bis 2024 bereits eine Wirkung.

Abbildung 39: Anteil alternativer Antriebe an den Lkw-Neuzulassungen (>3,5t zGG), 2018-2030

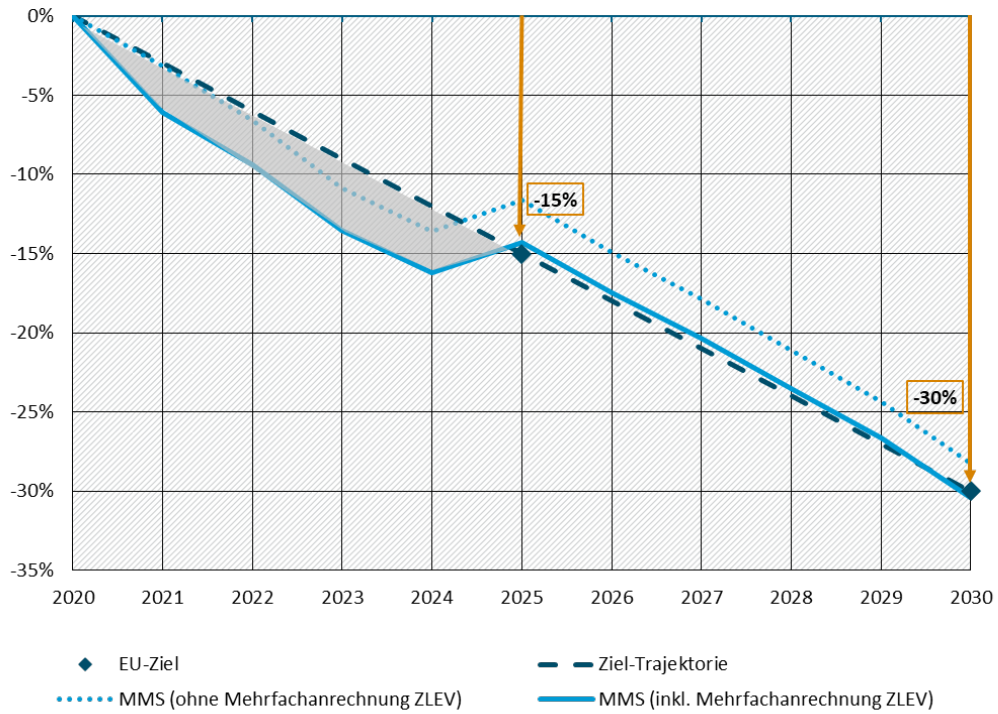


Quelle: Eigene Berechnungen

Die EU-Regulierung zur Emissionsminderung von schweren Nutzfahrzeugen schreibt eine Minderung der spezifischen Emissionen gegenüber dem Basisjahr 2020 von 15 % ab dem Jahr 2025 und 30 % ab dem Jahr 2030 vor. In den Vorjahren können gegenüber der linearen Ziel-Trajektorie durch eine Übererfüllung sogenannte „Early Credits“ gesammelt werden, welche auf das Ziel im Jahr 2025 angerechnet werden können. Zudem kann durch eine schnelle Elektrifizierung (von regulierten und unregulierten Nutzfahrzeugen) über den sogenannten ZLEV-Faktor eine zusätzliche Minderung angerechnet werden.

Im MMS wird durch die ambitionierte Elektrifizierung unter Ausschöpfung des ZLEV-Faktors der Zielwert von -15 % im Jahr 2025 fast erreicht. Da in den Jahren 2021-2024 Early Credits gesammelt werden, wird das Ziel der Regulierung im Marktmittel erfüllt. In den folgenden Jahren 2026-2029 erfolgt eine weitere Reduktion der Emissionen und das Ziel für das Jahr 2030 wird (auch ohne das Sammeln von weiteren Credits) erreicht. Der Anstieg der Emissionen der Neuzulassungen zum Jahr 2025 ist vor allem durch das Auslaufen der Kaufprämie begründet - der Anteil der E-Lkw an den Neuzulassungen geht zurück und somit steigen die durchschnittlichen Emissionen der Neuzulassungen kurzzeitig an.

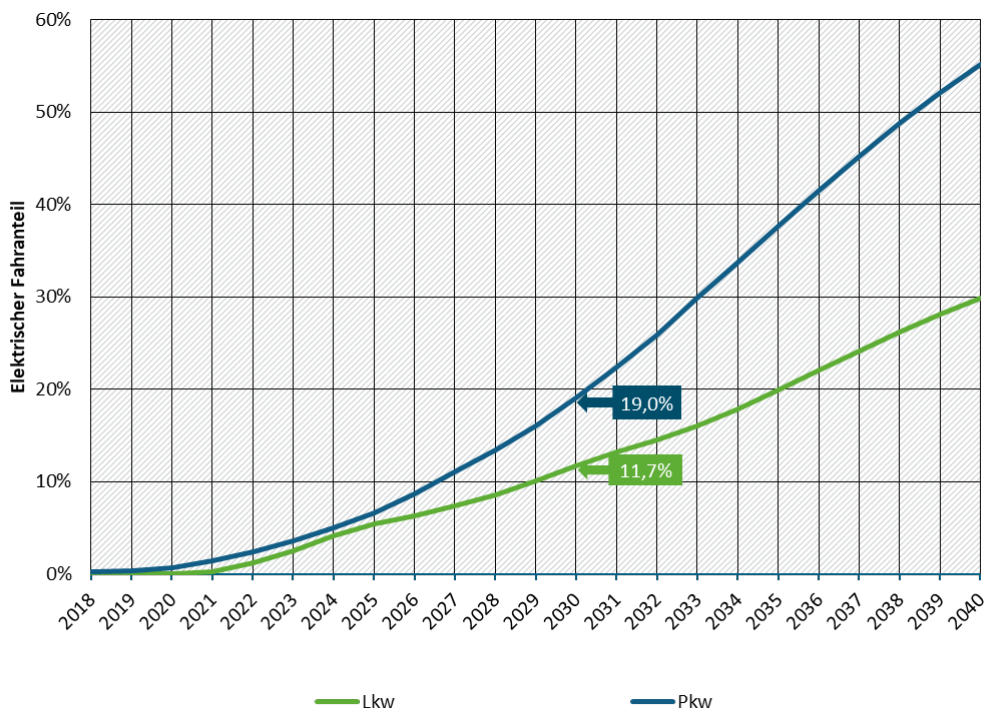
Abbildung 40: Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen neu zugelassener Lkw



Quelle: Eigene Berechnungen

Elektrische Fahranteile

Die sukzessive Elektrifizierung des Bestandes an Pkw und Lkw führt zu einem ansteigenden elektrischen Fahranteil. Im Jahr 2030 wird knapp jeder fünfte Kilometer mit Pkw elektrisch zurückgelegt (16 % BEV und 3 % PHEV). Bei den Lkw beträgt der Anteil rund 12 % (9 % BEV und 3 % O-Lkw). In den folgenden Jahren steigt der Anteil weiter deutlich an.

Abbildung 41: Entwicklung des elektrischen Fahranteils von Lkw und Pkw

Quelle: Eigene Berechnungen

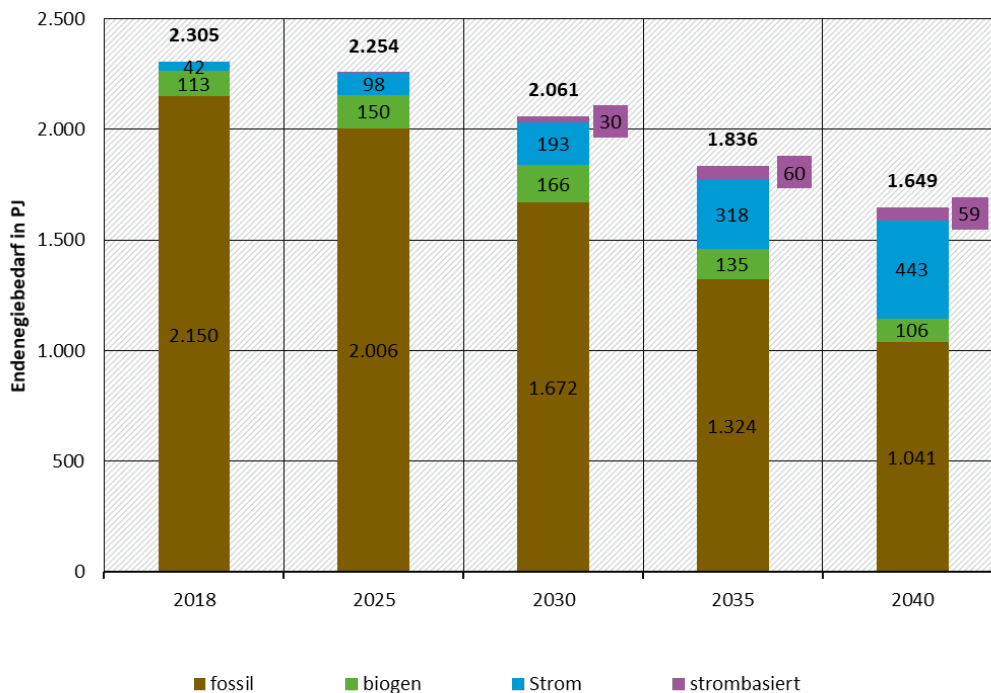
8.4.3 Entwicklung des Endenergieverbrauchs

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Verkehrssektors ist in Abbildung 42 sowie in Tabelle 91 dargestellt. Gegenüber 2018 geht der Endenergieverbrauch des nationalen Verkehrs bis zum Jahr 2030 um 10,6 % zurück. Bis zum Jahr 2040 wird gegenüber 2018 ein Rückgang des Endenergieverbrauchs des nationalen Verkehrssektors um 28,5 % erreicht. Ursache dafür ist vor allem die zunehmende Elektrifizierung, welche trotz des Anstiegs der Fahrleistungen im Straßenverkehr zu einer Effizienzsteigerung führt. Der Einsatz fossiler Kraftstoffe geht bis 2030 um 22 % und bis 2040 um 52 % gegenüber 2018 zurück.

Der Einsatz von Biokraftstoffen nimmt bis 2030 entsprechend des steigenden Anteils auf 166 PJ zu und sinkt nach 2030 auf Grund der ab dann als konstant angenommenen Beimischung leicht. Die vorgeschriebene Mindestquote für fortschrittliche Biokraftstoffe bis 2030 wird bevorzugt über den Einsatz von Biogas erfüllt, da dies die kostengünstigste Erfüllungsoption darstellt. Daher wird bis 2030 das fossile Erdgas vollständig durch Biogas ersetzt.

Der wachsende Anteil elektrischer Fahrzeuge sowie der ebenfalls zunehmende Schienenverkehr führt zu einem steigenden Stromverbrauch des Verkehrssektors in Höhe von insgesamt 193 PJ im Jahr 2030 und 443 PJ im Jahr 2040.

Abbildung 42: Endenergieverbrauch im nationalen Verkehr, 2018-2040



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Tabelle 91: Endenergieverbrauch des Verkehrssektors (ohne Sonderverkehre) im MMS in PJ

Energieträger	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Benzin	1.330,5	992,4	692,7	687,2	585,8	472,2	369,7
Diesel	827,8	1.122,7	1.410,6	1.275,4	1.055,6	823,5	645,7
LPG	0,1	2,4	13,6	9,4	7,2	5,4	3,7
Erdgas	-	3,1	6,0	10,3	-	-	-
(Bio-)Ethanol	-	6,8	31,1	44,6	43,1	35,7	28,3
Biodiesel	-	72,5	80,6	82,7	104,4	83,4	65,8
Biogas	-	-	1,4	22,9	18,6	15,6	11,7
Power-to-Liquid	-	-	-	-	29,6	59,4	58,9
Wasserstoff	-	-	-	0,0	0,0	0,1	0,1
Strom	49,2	58,7	42,2	97,9	193,2	318,0	442,9
Kerosin (nat. Luftverkehr)	31,2	30,5	27,2	24,0	23,4	22,7	21,9
Steinkohlen	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Summe(national)	2.239	2.289	2.306	2.255	2.061	1.836	1.649
Kerosin (Int. Luftverkehr)	164,5	314,0	410,4	440,8	460,8	477,2	490,8

Energieträger	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Seeschifffahrt: Diesel und LNG	81,4	90,3	55,5	34,0	36,6	35,9	35,1
Summe international	246	404	466	475	497	513	526
Summe gesamt	2.485	2.694	2.772	2.730	2.559	2.349	2.175

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts. Diesel inklusive andere Mineralölprodukte.

8.4.4 Bewertung der Einzelmaßnahmen

Die Einzelmaßnahmen werden jeweils gegenüber einem Szenario ohne die jeweilige Maßnahme bewertet. Stichjahr für die Bewertung ist 2020, d.h. vor 2020 wird die jeweilige Maßnahmenausgestaltung als identisch angenommen und es ergibt sich erst ab frühestens 2020 eine Minderungswirkung durch die Einzelmaßnahme. Die folgende Tabelle stellt die Maßnahmen, ihre Ausgestaltung im MMS, sowie die Annahme zur Ausgestaltung im Vergleichsszenario ohne die jeweilige Maßnahme (Ohne-Maßnahmen-Szenario, OMS) dar.

Tabelle 92: Parametrisierung der Einzelmaßnahmen im Verkehr im MMS

Bezeichnung der Maßnahme	Ausgestaltung im MMS	Ausgestaltung im Vergleichsszenario (Ohne-Maßnahmen-Szenario)	Parametrisierung / Wirkung
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Wärme und Verkehr (BEHG)	CO ₂ -Preis ab 2021. Exogener CO ₂ -Preisfad (125 €/t in 2030)	Kein CO ₂ -Preis	Wirkt auf Fahrzeugwahl und Verkehrsnachfrage
Luftverkehrsteuer	Erhöhung der LuftVSt zum 1.1.2020. Dies führt zu höheren Ticketpreisen: +10 % nationale und +2,5 % internationale Flüge	Beibehaltung der LuftVSt-Sätze aus 2019	Preiselastizitäten von -0,9 (national) und -0,76 (international) => Nachfragereduktion von 9 % (national) bzw. 2 % (international)
MWSt Bahn-Fernverkehr	Absenkung MwSt. im Bahn-Fernverkehr von 19 auf 7 % zum 1.1.2020 (Preissenkung von 10 %)	Beibehaltung 19 % MwSt. im Bahn-Fernverkehr	Preiselastizität von -0,3 => Nachfragesteigerung um 3 %
Elektrifizierung Schienenverkehr	Elektrifizierungsgrad steigt von 61 % (2019) auf 70 % (2030)	Elektrifizierungsgrad verbleibt auf dem Stand von 2018	Durch die stärkere Elektrifizierung halbiert sich die in Dieseltraktion zurückgelegte Betriebsleistung im Schienenverkehr bis 2030 gegenüber 2018
Stärkung Schienenpersonenfernverkehr, Deutschlandtakt und Digitalisierung	Zeiteinsparung Reisende im SPFV von 5 % bis 2030 und 10 % bis 2040	Keine Zeiteinsparung Reisende	Reisezeitelastizität von -0,6=> Erhöhung der Nachfrage SPFV um 3 % (2030) bzw. 6 % (2040)

Bezeichnung der Maßnahme	Ausgestaltung im MMS	Ausgestaltung im Vergleichsszenario (Ohne-Maßnahmen-Szenario)	Parametrisierung / Wirkung
Mittelerhöhung GVFG + Regionalisierungsmittel, Verbesserung der Angebotsqualität und Attraktivität des ÖPNV	GVFG-Mittel: 1 Mrd. € ab 2021, 2 Mrd. € ab 2025, ab 2026 1,8 % p.a. Dynamisierung. Regionalisierungsmittel: Erhöhung um 464 € auf 9.754 € in 2023 => insgesamt 21 Mrd. € zusätzlich im Zeitraum 2021-2031	GVFG-Mittel bleiben bei 333 Mio. €; Regionalisierungsmittel werden mit 1,8 % p.a. dynamisiert, aber nicht zusätzlich erhöht	Durch den Mittelanstieg wird eine Ausweitung des ÖV-Angebots erreicht. Auf Basis der Kostenstruktur des ÖV und dem Verhältnis von staatlicher ÖV-Finanzierung und ÖV-Angebot wird daraus eine Angebotsausweitung bestimmt.
Stärkung Schienengüterverkehr	Bis zum Jahr 2034 können ca. 182 Mrd. tkm auf der Schiene transportiert werden und bis zum Jahr 2040 ca. 200 Mrd. tkm.	Es werden (entsprechend der Referenzentwicklung der NPM) rund 30 Mrd. tkm weniger auf der Schiene transportiert als im MMS	
Ausbau von Radinfrastruktur (Wege und Abstellanlagen)	Zusätzlich 900 Mio. € Bundesmittel insgesamt bis 2023 für den Radverkehr	Zeine zusätzlichen Mittel für den Radverkehr	Bewertung entsprechend der Methodik im Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (Verlagerung: 0,9 pkm je investiertem €) => Radverkehr nimmt um 2 % zu (0,8 Mrd. pkm) (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2020)
Kaufprämie und Infrastrukturförderung E-Pkw	Umsetzung gemäß Förderrichtlinie (Bundesanteil Kaufprämie bis zu 6.000 €), Begrenzung der Mittel auf die Gesamtsumme (4,69 Mrd. €).	Ab 2020 keine Kaufprämie für E-Pkw mehr	Berücksichtigung in der TCO der Pkw-Käufer bis zur Ausschöpfung der Mittel (bis Ende 2021) => im MMS werden 2020/21 insgesamt 1,15 Mio. E-Pkw (BEV und PHEV) gekauft und damit rd. 40 % mehr als ohne Kaufprämie.
Absenkung der Dienstwagenbesteuerung für E-Pkw bis 2030	Privat genutzte E-Dienstwagen werden bis 2030 statt mit 1 % des Listenpreises mit der Hälfte des Listenpreises (PHEV) oder eines Viertels des Listenpreises (BEV, FCEV wenn Listenpreis <= 60.000 €) versteuert.	Privat genutzte elektrische Dienstwagen werden wie konventionelle Pkw mit 1 % versteuert	Berücksichtigung bei der Kaufentscheidung von Dienstwagen => Bis 2030 werden im Modell 0,3 Mio. xEV zusätzlich zugelassen
Absenkung der EEG-Umlage ab 2021	EEG-Umlage wird ab 2021 reduziert (Größenordnung 2-3 ct, siehe Kapitel 3).	Keine Absenkung der EEG-Umlage	Wirkt auf Fahrzeugwahl und Verkehrsnachfrage
Stärkere Gewichtung der CO ₂ -Komponente der Kraftfahrzeugsteuer ab 2021	Gemäß Kraftfahrzeugsteuergesetz (stärkere Progression nach CO ₂ , Begünstigung PHEV und BEV)	Kfz-Steuer wird in der bis Ende 2020 gültigen Form fortgesetzt (2 €/g CO ₂ ab	Berücksichtigung in der TCO der Pkw-Käufer

Bezeichnung der Maßnahme	Ausgestaltung im MMS	Ausgestaltung im Vergleichsszenario (Ohne-Maßnahmen-Szenario)	Parametrisierung / Wirkung
		95 g, keine Ermäßigung für BEV und PHEV)	
Förderung von elektrischen Bussen und Clean Vehicle Directive	1.846 Mio. € Fördermittel insgesamt (2020-2024) und Umsetzung Clean Vehicle Directive	Keine Förderung von E-Bussen	Der Anteil emissionsarmer Linienbusse an den Beschaffungen liegt gemäß CVD im Mittel bei 45 % (2021-25, 1. Referenzzeitraum) bzw. 65 % (2026-2030, 2. Referenzzeitraum), davon 80 % elektrisch und 20 % Erdgas. Ab 2038 nur noch E-Busse.
Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben	Gefördert werden elektrische Antriebe (ab 2021 keine Gasantriebe mehr) mit bis zu 40 % der Mehrkosten, maximal 40.000 €.	Keine Förderung von E-Lkw	Berücksichtigung in der TCO der Lkw-Käufer
Sonder-AfA für elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge bis 2030	Jahressteuergesetz 2019 (Sonder-Afa i.H.v. zusätzlich 50 % im Anschaffungsjahr bis 2030)	Keine Sonder-Afa	Berücksichtigung in der TCO der Lkw-Käufer
Förderung des Aufbaus der Versorgungsinfrastruktur für elektrifizierte Nutzfahrzeuge	Anteil der im EKF zur Verfügung stehenden Mittel für Tank- und Ladeinfrastruktur für Pkw und Lkw i.H.v. 5,6 Mrd. €	Kein Aufbau Tank- und Ladeinfrastruktur Lkw	
Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler	Gesetz zur Umsetzung des KSPR 2030 im Steuerrecht: Vorübergehende Erhöhung der Entfernungspauschale bis 2026	Keine Erhöhung der Entfernungspauschale	Durch die Erhöhung der Entfernungspauschale liegt die Pkw-Fahrleistung im Jahr 2025 um 1,2 Mrd. km und im Jahr 2030 um 0,6 Mrd. km höher.
CO ₂ -Spreizung der Lkw-Maut	Ab 2023 Integration CO ₂ -Aufschlag in die Lkw-Maut. Für Nullemissionsfahrzeuge wird der Mautteilsatz für Infrastrukturkosten um mit bis zu 75 % gegenüber dem Maut-Höchstsatz abgesenkt.	Keine CO ₂ -Spreizung der Lkw-Maut	Berücksichtigung in der TCO der Lkw-Käufer sowie in den Lkw-Nutzerkosten
Fortschreibung EU-CO ₂ -Standards für Pkw und LNF	EU-Regulierung	Pkw-Standards bleiben auf dem Niveau von 2021 (95 g CO ₂ /km). LNF-Standards bleiben auf dem Niveau von 2020 (147 g CO ₂ /km).	CO ₂ -Standards werden im Modell als Obergrenze für die CO ₂ -Emissionen neuer Fahrzeuge berücksichtigt

Bezeichnung der Maßnahme	Ausgestaltung im MMS	Ausgestaltung im Vergleichsszenario (Ohne-Maßnahmen-Szenario)	Parametrisierung / Wirkung
EU-CO ₂ -Standards für SNF	EU-Regulierung	Keine Standards für SNF.	CO ₂ -Standards werden im Modell als Obergrenze für die CO ₂ -Emissionen neuer Fahrzeuge berücksichtigt
Entwicklung regenerativer Kraftstoffe sowie nationale Umsetzung RED II: Anpassung der Treibhausgasquote	EU-Regulierung	Biokraftstoffanteil bleibt bei 6,5 %; kein Einsatz strombasierter Kraftstoffe	Biokraftstoffanteil steigt bis 2030 auf 8,9 %. Der Einsatz strombasierter Kraftstoffe steigt auf rd. 40 PJ im Jahr 2030 und 70 PJ im Jahr 2035 inklusive Luftverkehr.
Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen	Bis 2030 nutzen 50 % der Binnenschiffe Landstrom	Binnenschiffe nutzen keinen Landstrom	Dieserverbrauch in der Binnenschifffahrt reduziert sich um 1 %
Binnenschifffahrt: Abschaffung Kanalgebühren	Einsparung von 45 Mio. € p.a. für die Binnenschifffahrt	Keine Abschaffung der Kanalgebühren	Erhöhung der Verkehrsnachfrage um 2,2 Mrd. tkm (Preiselastizität -0,7)
Umstellung von Flugzeugflotten	1 Mrd. € Förderung zur Anschaffung von emissionsarmen Flugzeugen	Keine Förderung	Vorzeitige Anschaffung von 80 Flugzeugen mit 25 % niedrigeren Emissionen

Quelle: Zusammenstellung Öko-Institut

Die Berechnung der Einzelmaßnahmen erfolgt über Modellläufe in TEMPS, indem die jeweilige Maßnahme aus dem MMS herausgenommen wird. Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen werden damit überwiegend modellendogen in TEMPS berücksichtigt. Dennoch kann es Überschneidungseffekte zwischen Einzelmaßnahmen geben. Wo Überschneidungseffekte auftreten, wird die Bruttowirkung der Einzelmaßnahme mit einem Instrumentenfaktor multipliziert, um die Nettowirkung zu erhalten. Instrumentenfaktoren werden abgeleitet, indem die Gesamtwirkung in einem Szenario ohne alle Maßnahmen mit der Summe der Einzelmaßnahmenwirkungen verglichen wird.

Wechselwirkungen treten insbesondere auf bei den Maßnahmen zur Förderung des Markthochlaufs von elektrischen Pkw (CO₂-Standards, Kaufprämie, Dienstwagenbesteuerung, Kfz-Steuer, CO₂-Preis, Absenkung der EEG-Umlage) sowie den Maßnahmen zur Förderung des Markthochlaufs von elektrischen Lkw (CO₂-Standards, Kaufprämie, CO₂-Spreizung der Lkw-Maut, CO₂-Preis, Absenkung der EEG-Umlage). Bei einigen Maßnahmen ergeben sich Unterschiede zur „Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung“ vom Oktober 2020. Grund dafür sind Anpassungen bei den Eingangsdaten und Annahmen in der Modellierung sowie Wechselwirkungen von Maßnahmen untereinander. Beispielsweise wurde bei der Wirkung des CO₂-Preises zusätzlich berücksichtigt, dass bei höheren CO₂-Preisen der elektrische Fahranteil der Plug-In-Hybride steigt. Außerdem hat der CO₂-Preis (vor allem langfristig nach 2030) durch den Ausbau der Infrastruktur für elektrische Lkw einen stärkeren Effekt als ohne eine solche Infrastruktur. Tabelle 93 stellt den Minderungsbeitrag der Einzelmaßnahmen dar.

Tabelle 93: Emissionsminderungswirkung von Einzelmaßnahmen im Verkehr (national) im MMS

Wirkung von Minderungsmaßnahmen im MMS	Instrumententyp	Wirkungsbeginn	2025	2030	2035	2040
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Wärme und Verkehr (BEHG)	E	2021	3,45	7,75	12,32	15,39
Luftverkehrsteuer	E	2020	0,09	0,09	0,09	0,08
MWSt Bahn-Fernverkehr	E	2020	0,12	0,10	0,08	0,06
Elektrifizierung Schienenverkehr	F	2020	0,16	0,46	0,46	0,44
Stärkung Schienenpersonenfernverkehr, Deutschlandtakt und Digitalisierung	F	2020	0,06	0,10	0,12	0,11
Mittelerhöhung GVFG + Regionalisierungsmittel, Verbesserung der Angebotsqualität und Attraktivität des ÖPNV	F	2020	0,21	0,29	0,24	0,19
Stärkung Schienengüterverkehr	F	2020	0,33	0,68	0,90	0,96
Ausbau von Radinfrastruktur (Wege und Abstellanlagen)	F	2021	0,06	0,08	0,06	0,04
Kaufprämie E-Pkw	F	2020	0,09	0,08	0,04	0,01
Absenkung der Dienstwagenbesteuerung für E-Pkw bis 2030	E	2020	0,06	0,15	0,14	0,04
Stärkere Gewichtung der CO ₂ -Komponente der Kraftfahrzeugsteuer ab 2021	E	2021	0,29	0,20	0,08	0,09
Absenkung der EEG-Umlage ab 2021	E	2021	0,74	1,82	2,58	2,0
Förderung von elektrischen Bussen	F	2020	0,31	0,83	1,33	1,76
Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben	F	2020	0,63	0,18	0,06	0,02
Sonder-AfA für elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge bis 2030	E	2020	0,07	0,29	0,14	0,06
Förderung des Aufbaus der Versorgungsinfrastruktur für elektrifizierte Nutzfahrzeuge	F	2020	0,00	0,00	0,00	0,00

Wirkung von Minderungsmaßnahmen im MMS	Instrumententyp	Wirkungsbeginn	2025	2030	2035	2040
Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler	E	2021	-0,19	-0,09	-0,01	0,00
CO ₂ -Spreizung der Lkw-Maut	E	2023	0,42	1,59	0,49	0,11
Fortschreibung EU-CO ₂ -Standards für Pkw und LNF	R	2022	0,98	4,93	9,62	10,37
EU-CO ₂ -Standards für SNF	R	2021	2,53	5,70	8,85	12,13
Entwicklung regenerativer Kraftstoffe sowie nationale Umsetzung RED II: Anpassung der Treibhausgasquote	R	2022	0,79	5,53	7,10	6,43
Binnenschifffahrt: Nutzung von Landstrom in Häfen	R	2021	0,01	0,02	0,02	0,02
Binnenschifffahrt: Abschaffung Kanalgebühren	E	2019	0,11	0,11	0,09	0,06
Summe der betrachteten Maßnahmen			11,3	30,9	44,8	50,6

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Erklärung der Instrumententypen: Tabelle A 1 im Anhang A1

Tabelle 94: Emissionsminderungswirkung von Einzelmaßnahmen (international)

Wirkung von Minderungsmaßnahmen im MMS	Instrumententyp	Wirkungsbeginn	2025	2030	2035	2040
			Mio. t CO ₂ -Äq			
Umstellung von Flugzeugflotten	E	2021	0,40	0,37	0,33	0,30
Luftverkehrsteuer	E	2021	0,45	0,40	0,35	0,29
Summe der betrachteten Maßnahmen			0,85	0,77	0,68	0,59

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Erklärung der Instrumententypen: Tabelle A 1 im Anhang A1

8.4.5 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor gehen im MMS bis zum Jahr 2030 auf 126,4 Mio. t CO₂-Äq zurück. Das Klimaschutzziel in Höhe von 85 Mio. t im Jahr 2030 wird um 41,4 Mio. t CO₂-Äq verfehlt. In den Jahren 2025-2029 liegt die Abweichung vom Sektorziel gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 bei durchschnittlich rund 32 Mio. t CO₂-Äq.

Tabelle 95: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS

Kategorie	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO ₂ -Äq										
Inländischer ziviler Luftverkehr	0,9	1,2	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7
Straßenverkehr	142,3	148,7	154,3	152,5	150,0	147,0	142,8	138,9	133,7	129,7	122,2
<i>davon MIV</i>	93,2	98,7	102,1	100,9	99,0	96,8	93,5	90,2	86,4	83,4	78,4
<i>davon Lkw/LNF</i>	47,7	47,7	49,5	49,0	48,4	47,8	47,0	46,4	45,3	44,4	42,2
Schieneverkehr	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5
Binnenschifffahrt	1,6	1,7	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0
Gesamt	145,6	152,2	158,8	157,0	154,4	151,4	147,2	143,2	138,0	134,0	126,4
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	150	145	139	134	128	123	117	112	105	96	85
Abweichung vom Sektorziel*	-4,4	7,2	19,8	23,0	26,4	28,4	30,2	31,2	33,0	38,0	41,4
Nachrichtlich:											
Internationaler ziviler Luftverkehr ⁹⁶		23,1	31,3	31,7	32,2	32,6	32,8	33,1	33,2	33,5	33,4
Internationaler Schiffsverkehr		2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6
Gesamt inkl. nachrichtlich		177,7	192,5	191,2	189,1	186,5	182,5	178,9	173,8	170,1	162,4

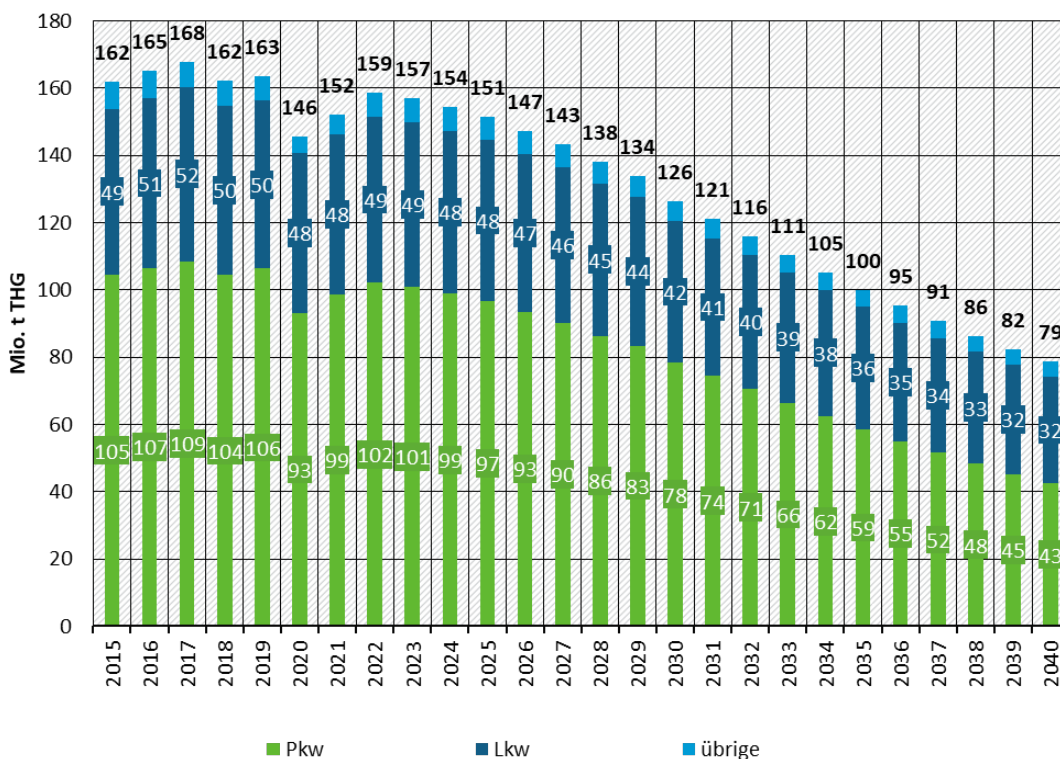
Quelle für die Jahre 2021-2030: Modellrechnungen Öko-Institut

⁹⁶ Alle abgehenden grenzüberschreitenden Flüge, sowohl in EU- als auch in Nicht-EU-Länder.

Anmerkung: Die Werte für das Jahr 2020 wurden der Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2021) entnommen.

Anmerkung: Die Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen sind in Anhang A.2 zu finden.

Abbildung 43: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor im MMS, 2018-2040



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Zwischen 2018 und 2025 vollzieht sich der Rückgang der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor mit durchschnittlich rund 1,5 Mio. t CO₂-Äq jährlich noch relativ langsam, was auf die steigende Verkehrsnachfrage bei erst allmählich zunehmender Elektrifizierung zurückzuführen ist. Nach 2025 gehen die Treibhausgasemissionen mit durchschnittlich rund 5 Mio. t CO₂-Äq jährlich deutlich zügiger zurück, bis auf 78,7 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2040. Im Verkehrssektor dominieren dabei die CO₂-Emissionen; die sonstigen Treibhausgase spielen mit gut 1 % eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 96: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
CO₂-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	160,7	158,6	160,3				
MMS				149,6	124,8	98,8	77,7

CH₄-Emissionen

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Entwicklung 1990 – 2018	1,7	0,3	0,2				
MMS				0,2	0,2	0,2	0,1
N₂O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	1,5	1,0	1,7				
MMS				1,6	1,4	1,1	0,9
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018	163,9	160,0	162,3				
MMS				151,4	126,4	100,1	78,7
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018		-2,4	-1,0				
MMS				-7,6	-22,9	-38,9	-52,0
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 2005 in %						
Entwicklung 1990 – 2018			1,4				
MMS				-5,4	-21,0	-37,4	-50,8

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), Modellrechnungen Öko-Institut

Anmerkung: In der Abgrenzung des Klimaschutzplans 2050: ohne internationalem Luft- und Seeverkehr und ohne Sonderverkehre

9 Landwirtschaft

9.1 Landwirtschaft (insbes. Verdauung, Düngewirtschaft und Böden)

In diesem Kapitel werden die Projektionen für die CRF-Quellgruppe 3 „Landwirtschaft“ vorgestellt. Angaben zur Entwicklung der Emissionen aus den Energieverbräuchen der Landwirtschaft (CRF-Quellgruppe 1.A.4.c), die gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz zum Sektor Landwirtschaft gezählt werden, finden sich im anschließenden Kapitel 9.2.

9.1.1 Methodik

Die Projektion für die Umfänge der Flächennutzung, Tierhaltung und der Erträge erfolgt auf Basis der Thünen-Baseline 2020 – 2030 (Haß et al. 2020). Für die Erstellung dieser agrarökonomischen Projektionen für Deutschland werden eine Reihe von agrarökonomischen Modellen im Verbund eingesetzt: das allgemeine Gleichgewichtsmodell MAGNET, das partielle Gleichgewichtsmodell AGMEMOD, das regionalisierte Programmierungsmodell RAUMIS und das Betriebsgruppenmodell FARMIS. Zur Abbildung der Treibhausgasemissionen wird das landwirtschaftliche Emissionsmodell GAS-EM eingesetzt.

Die Thünen-Baseline stellt keine Prognose der Zukunft dar, sondern beschreibt die erwarteten Entwicklungen auf Basis der im Februar 2020 vorliegenden Daten und Informationen, z. B. zu bereits beschlossenen Politikänderungen, und unter bestimmten Annahmen zur Entwicklung exogener Einflussfaktoren, z. B. der Weltmarktpreise. Als Ergebnis werden durchschnittliche mittelfristige Entwicklungen dargestellt. Jahresspezifische Auswirkungen unvorhersehbarer Ereignisse werden nicht berücksichtigt. Methodische Grundlagen und Annahmen für die Baseline sind in Haß et al. (2020) und für die Emissionsberechnungen durch GAS-EM in Haenel et al. (2020) beschrieben. Die angewendeten Berechnungsmethoden und Emissionsfaktoren in GAS-EM basieren auf der Submission 2020. Aufgrund methodischer Änderungen zur Submission 2021 können die Ergebnisse der Vorjahresschätzung nicht zusammen mit den Projektionsergebnissen in eine Reihe gestellt werden. Zur Erstellung einer methodisch konsistenten Zeitreihe wurden die Emissionen für das Jahr 2020 deshalb auf Grundlage der Aktivitätsdaten der Vorjahresschätzung, aber mit den Methoden der Submission 2020 berechnet.

Die Angaben der historischen Aktivitätsdaten und Emissionen für die Jahre 1990, 2005 und 2018 stammen aus der Submission 2020, wie sie in Haenel et al. (2020) dokumentiert sind. Das Zieljahr der Baseline-Projektion ist das Jahr 2030. Aufbauend auf die Aktivitätsumfänge der Baseline-Projektion werden im hier abgebildeten MMS die durch Maßnahmen ausgelösten Veränderungen berücksichtigt. Die Aktivitätsumfänge werden für die Jahre 2035 und 2040 statisch fortgeschrieben. Für das Jahr 2025 wurden die Aktivitätsumfänge auf Grundlage des Basisjahrs 2016-18 und der Projektion für das Jahr 2030 interpoliert. Die nachträglich ergänzten Emissionssummen, die auf Basis der Aktivitätsdaten aus der Vorjahresschätzung für das Jahr 2020 berechnet wurden, liegen aufgrund von Rückgängen der Rinderbestände, mäßigen Erträgen der Feldfrüchte und niedriger Stickstoffdüngung bereits in etwa auf Höhe der Schätzung für 2025. Entsprechend der Annahmen in der Thünen-Baseline wird davon ausgegangen, dass die Ertragsentwicklung dem langjährigen Trend folgt, und die durch extreme Trockenheit bedingten Ertragsrückgänge insbesondere im Jahr 2018 eine Ausnahme-situation darstellen.

9.1.2 Maßnahmen

Für die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft wird auf vom Johann Heinrich von Thünen-Institut erstellte Projektion von 2020 bis 2030 aufgebaut (Haß et al. 2020). Die Berechnungen für die Quellgruppe Landwirtschaft erfolgen mit dem für die Emissionsberichterstattung eingesetzten Modell GAS-EM des Thünen-Instituts für Agrarklimaschutz.

Die ökonomischen Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft ergeben sich vorwiegend aus der Marktentwicklung, aus der Förderpolitik der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP) und aus dem Ordnungsrecht. Hinzu kommen Entscheidungen aus der Ressourcen- und Energiepolitik, die beeinflussen, in welchem Maße die Stoff- und Energienutzung von Anbauprodukten und Reststoffen aus der Landwirtschaft stattfindet, mit Auswirkungen auf die Flächennutzung und auf die Emissionen in diesem Sektor.

Ein wichtiges Element der Umsetzung der GAP in Deutschland ist die vollständige Entkopplung aller wettbewerbsverzerrenden Direktzahlungen. Weiterhin berücksichtigt die Thünen-Baseline die Folgen der im Jahr 2015 beendeten Milchquotenregelung, und die daraus und aus der Marktentwicklung resultierende Ausdehnung der Milchproduktion.

Mit der im Dezember 2013 beschlossenen GAP-Reform, die für den Finanzierungszeitraum 2014-2020 gilt, wurde das sogenannte Greening der Direktzahlungen an die Landwirte eingeführt. Das Greening ist obligatorisch und bindet den Erhalt von 30 Prozent der Direktzahlungen an die Erhaltung des Dauergrünlands, an Anforderungen zur Anbaudiversifizierung im Ackerland und an die Ausweisung einer Flächennutzung im Umweltinteresse („Ökologische Vorrangflächen“) auf 5 Prozent der Ackerfläche (dazu zählen Landschaftselemente, Pufferstreifen, aber auch der Anbau von Leguminosen und Zwischenfrüchten ohne Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, etc.) in Betrieben mit mehr als 15 ha Ackerfläche.

Das Greening wird in Deutschland seit dem 1. Januar 2015 angewendet. Der Erhalt von Dauergrünland hat unmittelbare Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz der Landwirtschaft. Die Wirkungen werden in der Quellgruppe LULUCF berichtet. Die beiden anderen Greening-Anforderungen können in begrenztem Maße ebenfalls zu Emissionsreduktionen in der Landwirtschaft beitragen (z. B. durch Bindung von Luftstickstoff bei Ausdehnung des Anbaus von Leguminosen, Verringerung der N-Düngung durch Ausdehnung von Stilllegungsflächen). Die Einrichtung „Ökologischer Vorrangflächen“ zielt vorrangig auf den Erhalt der Biodiversität ab. Die im Mai 2018 von der Europäischen Kommission vorgelegten Vorschläge für die GAP nach 2020 sehen eine Überführung von Greening und Cross Compliance-Anforderungen in die neue „Konditionalität“ vor. Da es dazu noch keine abschließenden Beschlüsse gibt, können konkrete Auswirkungen der nächsten GAP-Reform, die erst 2023 in Kraft treten wird, nicht berücksichtigt werden.

In der zweiten Säule der Agrarpolitik werden in der aktuellen Förderperiode die bisherigen Agrarumweltmaßnahmen als „Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen“ fortgeführt, der ökologische Landbau wird über eine eigene Maßnahme gefördert. Die Fortschreibung der Fördermaßnahmen der zweiten Säule der EU-Agrarpolitik basiert auf der Annahme, dass der Finanzierungsrahmen und die Programmplanung für den Zeitraum 2014 bis 2020 über das Jahr 2020 hinaus entsprechend fortgeschrieben werden können, da zum Zeitpunkt des Berichtes noch keine detaillierten Informationen über die weitere Ausgestaltung der 2. Säule vorlagen.

9.1.2.1 Quantifizierte Maßnahmen

- a) Die **Düngeverordnung (DüV)** wurde im Juni 2017 novelliert und im April 2020 geändert. Die geänderte DüV 2020 umfasst u. a. neue und erhöhte Anforderungen in den Bereichen Düngeplanung, Sperrfristen für die Ausbringung von Düngemitteln im Herbst und Winter, Abstände zu

oberirdischen Gewässern, Düngung auf geneigten Flächen sowie strenge Vorgaben in mit Nitrat belasteten Gebieten, z. B. Absenkung der Stickstoffdüngung um 20 %. Diese lassen einen effizienteren und ressourcenschonenderen Einsatz von Stickstoff und somit einen Rückgang des Stickstoffüberschusses erwarten. Damit geht auch eine Verminderung der Lachgasemissionen aus der Düngung einher.

- b) Im Klimaschutzprogramm 2030 werden in Kap. 3.4.5.1 („Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen und gezielte Verminderung der Lachgasemissionen, Verbesserung der Stickstoffeffizienz“) neben einem konsequenten Vollzug der DüV eine Reihe weiterer Maßnahmen genannt: Die Stoffstrombilanzverordnung wird derzeit evaluiert und soll weiterentwickelt und ab dem Jahr 2021 für weitere Betriebe verpflichtend eingeführt werden. Die Stoffstrombilanz soll zur Umsetzung des Ziels in der Nachhaltigkeitsstrategie beitragen, **die N-Gesamtbilanz für Deutschland im Jahr 2030 auf 70 kg N / ha Landwirtschaftsfläche zu begrenzen**. Weiterhin sollen im Rahmen eines neuen Investitions- und Zukunftsprogramms für die Landwirtschaft“ moderne Ausbringtechniken für flüssige Wirtschaftsdünger gefördert werden, um eine weitere Verbesserung der Effizienz zu erreichen. Des Weiteren soll zur **Umsetzung der NEC-Richtlinie** das Nationale Luftreinhalteprogramm in Hinblick auf die Reduktion von Ammoniakemissionen umgesetzt werden (vgl. Kap. 1.1 Sektorübergreifende Maßnahmen, NEC-Richtlinie (EU) 2016/2284).
- c) Im Klimaschutzprogramm 2030 wird in Kap. 3.4.5.1 („Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen ...“) eine **Erhöhung des Anteils gasdicht gelagerter Gülle aus der Rinder- und Schweinehaltung auf 70 Prozent** festgelegt. Dies soll durch die in Kap. 3.4.5.2 beschriebene Stärkung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und landwirtschaftlichen Reststoffen und weiteren, in Kap. 3.4.5.4 (Verringerung der Treibhausgasemissionen in der Tierhaltung) vorgestellten Maßnahmen erreicht werden. Vorgesehen ist ein Mix von Fördermaßnahmen und weiterentwickelten, ordnungsrechtlichen Vorgaben. Zum einen soll ein neues Fördersystem für Biogas-Neuanlagen den Ausbau der Wirtschaftsdüngervergärung in Biogasanlagen stärken, für Altanlagen sollen Optionen zur Anschlussnutzung angeboten werden, und es sollen gasdichten Gärrestelager gefördert und Hemmnisse für eine Vergärung von Wirtschaftsdüngern abgebaut werden. Die Förderung erfolgt weiterhin über das EEG, zusätzlich ist eine Förderung aus dem Energie- und Klimafonds (EKF) in Höhe von jährlich 60 Mio. € geplant (zunächst für 2021 bis 2023). Bei Bedarf können diese Maßnahmen im Rahmen des Überprüfungsmechanismus des Bundes-Klimaschutzgesetzes weiterentwickelt werden. Darüber hinaus soll eine ordnungsrechtliche Vorgabe für die gasdichte Lagerung von Gärresten in Biogas-Bestands- und Neuanlagen in Verbindung mit einer Übergangszeit für Förderungen zur Umsetzung beitragen. Für große Tierhaltungsanlagen sollen ordnungsrechtlichen Auflagen zur gasdichten Lagerung von Wirtschaftsdüngern eingeführt werden.
- d) Gemäß Klimaschutzprogramm 2030 Kap. 3.4.5.3 „**Ausbau des Ökolandbaus**“ werden Rechtsvorschriften zugunsten besonders umweltfreundlicher Verfahren wie dem ökologischen Landbau weiterentwickelt und die rechtliche und finanzielle Förderung optimiert. Dazu werden die notwendigen Fördergelder ausgebaut und sichergestellt. Durch Umsetzung der Zukunftsstrategie Ökologischer Landbau werden zusätzliche Wachstumsimpulse entlang der gesamten Wertschöpfungsketten gesetzt, und die Forschungsförderung des ökologischen Landbaus wird verstetigt und weiterentwickelt. Ziel der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2016) ist ein Flächenanteil von 20 Prozent ökologischer Landbau an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche. Eine Fortschreibung des erhöhten Flächenzuwachses des ökologischen Landbaus im Zeitraum 2015 bis 2019 würde zu einem Flächenanteil zwischen 17 und 18 % im

Jahr 2030 führen. Bei Verstärkung der Förderung wird bis zum Jahr 2030 von einer Ausdehnung der ökologisch bewirtschafteten Landwirtschaftsfläche von 9,7 Prozent im Jahr 2019 auf 20 Prozent im Jahr 2030 ausgegangen. Der Ausbau des Flächenanteils des ökologischen Landbaus trägt in erster Linie durch den Verzicht auf Stickstoff-Mineraldünger zur Minderung des Stickstoffeinsatzes und der Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden bei.

9.1.2.2 Weitere flankierende, nicht quantifizierte Maßnahmen

- e) Im Klimaschutzprogramm 2030 Kap. 3.4.5.4 „Verringerung der Treibhausgasemissionen in der Tierhaltung“ ist bis zum Jahr 2021 die Erarbeitung einer Gesamtstrategie zur Verringerung der Emissionen aus der Tierhaltung geplant. Dazu gehören ein Leitbild für die Nutztierhaltung unter Berücksichtigung der Klimaziele des Pariser Übereinkommens, die Entwicklung von verbindlichen Zielen – qualitative Tierwohl- und quantitative Umweltziele sowie ein Konzept zu deren Umsetzung und die Integration der nationalen Nutztierhaltungsstrategie in die Gesamtstrategie zur Verringerung der Emissionen aus der Tierhaltung. Quantitative Ziele und Informationen zur konkreten Ausgestaltung und Umsetzung liegen derzeit noch nicht vor. Des Weiteren soll für die gasdichte Lagerung von unvergorenen Wirtschaftsdüngern in Verbindung mit der Installation einer Gasfackel eine Machbarkeitsprüfung erfolgen.

Im Klimaschutzprogramm 2030 werden in Kap. 3.4.5.1 („Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen und gezielte Verminderung der Lachgasemissionen, Verbesserung der Stickstoffeffizienz“) Nitrifikationshemmstoffe als Maßnahmenoptionen benannt, hierzu besteht jedoch noch Forschungsbedarf.

9.1.3 Annahmen und Parameter

Basierend auf den oben genannten Annahmen werden die Projektionen für die Jahre 2025, 2030, 2035 und 2040 abgeleitet. Tabelle 97 zeigt die historische und projizierte Entwicklung der Aktivitätsdaten zum Tierbestand für die Jahre 1990-2040. Aufgrund der in der Thünen-Baseline erwarteten, positiven Entwicklung der Milchpreise steigt die Milchproduktion an, und die Bestände der Milchkühe gehen gegenüber 2018 bis 2030 nur in geringem Maße zurück. Die Bestände der übrigen Rinder gehen ebenfalls nur leicht zurück. Der Bestand der Schweine nimmt etwas ab, und die Geflügelbestände steigen gegenüber 2018 leicht an. Die Bestände von Schafen und Ziegen nehmen deutlicher ab.

Tabelle 97: Entwicklung der Tierbestände 1990-2040

	1990	2005	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Anzahl in 1.000 bzw. 1.000 Stallplätze								
Milchkühe	6.355	4.236	4.101	3.921	4.082	4.025	4.025	4.025
andere Rinder	13.133	8.800	7.848	7.380	7.670	7.427	7.427	7.427
Schweine (ohne Saugferkel)	26.502	22.743	22.019	21.556	21.916	21.510	21.510	21.510
Geflügel	113.879	120.560	175.200	175.540	177.921	180.176	180.176	180.176
Pferde	499	508	429	416	439	441	441	441

	1990	2005	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Schafe und Ziegen	3.356	2.813	1.991	1.919	1.825	1.716	1.716	1.716

Quelle: Haenel et al. (2020), Thünen-Baseline (Haß et al. 2020), Berechnungen des Thünen-Instituts.

Anmerkung: Die Zählung von (belegten) Stallplätzen ist im Falle von Tierkategorien mit kurzer Haltungs- bzw. Mastdauer relevant (z. B. Mastschweine, Mastgeflügel). Die im Jahr erzeugte Anzahl liegt dann höher als die Anzahl an Stallplätzen.

Seit 1990 hat der N-Mineraldüngereinsatz bis 2018 trotz steigender Erträge um gut 30 % abgenommen. Die Wirtschaftsdüngermenge ist gleichzeitig zurückgegangen, die N-Zufuhr über Gärrückstände aus Energiepflanzen ist dagegen deutlich gestiegen. Insgesamt hat sich die über diese organischen Düngemittel zugeführte N-Menge von 1990 bis 2018 um knapp 10 % erhöht. Neben dem Rückgang der Landwirtschaftsfläche um über 5 % zwischen 1990 und 2018 ist dies angesichts steigender pflanzenbaulicher Erträge auf einen gesteigerten N-Ausnutzungsgrad zurückzuführen. Daneben spielen für die Abnahme der Mineraldüngermenge die Preisentwicklung für Mineraldünger in Relation zu den Agrarpreisen, Extensivierungsmaßnahmen und die Ausweitung des ökologischen Landbaus eine Rolle. Die N-Einsatzmenge geht den Annahmen zufolge von 2018 bis 2030 etwas zurück, gleichzeitig geht die Zufuhr von organischen Düngemitteln aufgrund des starken Rückgangs der in der Biogasproduktion eingesetzten Energiepflanzen um über 10 % zurück. Die Abnahme des Energiepflanzeneinsatzes für die Biogasproduktion um über 60 % ist eine Folge der laut Klimaschutzprogramm 2030 angestrebten Ausweitung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen. Der Stickstoffeintrag aus Ernteresten in die landwirtschaftlichen Böden steigt von 2018 bis 2030 deutlich an, was auf die besonders geringen Erntemengen im Trockenjahr 2018 und auf die gemäß Annahmen der Thünen-Baseline weiter steigenden pflanzlichen Erträge und Nebenproduktmengen zurückzuführen ist. Die Fläche der landwirtschaftlich genutzten organischen Böden nimmt aufgrund der Maßnahmen zum Schutz von Moorböden ab.

Tabelle 98: Entwicklung ausgewählter Aktivitätsdaten für landwirtschaftliche Böden 1990-2040

	1990	2005	2018	2020	2025	2030	2035	2040
1.000 t Stickstoff								
Mineraldüngereinsatz	2.164	1.778	1.497	1.372	1.637	1.439	1.439	1.439
Wirtschaftsdüngerausbringung (tierische Ausscheidungen)	1.183	978	1.013	991	1.022	1.033	1.033	1.033
Weideausscheidungen	219	154	144	139	140	135	135	135
Gärrückstände aus Energiepflanzen (Ausbringung)	0	46	299	293	187	116	116	116
Ernterückstände	486	588	503	579	620	656	656	656
1.000 Hektar								

	1990	2005	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Entwässerte organische Böden	1.244	1.246	1.219	1.212	1.182	1.120	1.112	1.104

Quelle: Haenel et al. (2020) Thünen-Baseline (Haß et al. 2020), Berechnungen des Thünen-Instituts.

9.1.4 Ergebnisse

9.1.4.1 Bewertung der Einzelmaßnahmen

In der Bewertung werden die folgenden Maßnahmen berücksichtigt:

1. Umsetzung der Düngeverordnung 2020
2. Erhöhung des Anteils gasdicht gelagerter Gülle aus der Rinder- und Schweinehaltung auf 70 Prozent
3. Umsetzung der NEC-Richtlinie (Reduzierung der NH₃-Emissionen bis 2030 um 29 % gegenüber 2005)
4. Ausbau des Ökolandbaus auf 20 % der Landwirtschaftsfläche im Jahr 2030
5. Senkung N-Saldo durch Umsetzung der Stoffstrombilanz-Verordnung auf den Zielwert der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie für 2030 von 70 kg Gesamtbilanzsaldo (5-Jahresmittel)
6. Moorbodenschutz (nur Wirkungen auf N₂O-Emissionen)

Die Maßnahmen 1. bis 5. haben alle Auswirkungen auf die N₂O-Emissionen, die durch die Düngung beeinflusst werden. Daher kommt es zu Interaktionen zwischen den Maßnahmen und Überschneidungen der Wirkungen. Zur Wirkungsabschätzung wurden die Maßnahmen in der angegebenen Reihenfolge in einzelnen Schritten nacheinander in GAS-EM implementiert und dadurch der jeweils entstehende, zusätzliche Effekt ermittelt. Die ausgewiesene Wirkung der einzelnen Maßnahmen hängt aufgrund der Interaktionen von der gewählten Maßnahmenkombination und Reihenfolge der Berechnung ab und kann bei anderer Kombination und Reihenfolge unterschiedlich ausfallen. Die Maßnahme Moorbodenschutz wird im Bereich LULUCF umgesetzt und trägt zur Senkung der Lachgasemissionen aus Torfmineralisierung in drainierten organischen Böden bei. Diese Emissionen werden gemäß IPCC-Richtlinien nicht unter der Emissionskategorie LULUCF, sondern unter „Landwirtschaft“ berichtet, daher sind die Wirkungen auf die Lachgasemissionen hier zu berücksichtigen.

Die Abschätzung der Wirkung der Einzelmaßnahmen des MMS erfolgt gegenüber einem Ohne-Maßnahmen-Szenarios (OMS). Im Rahmen des OMS wird unterstellt, dass die betroffene Einzelmaßnahme nicht existiert und somit keine Wirkung entfalten kann. Die folgende Tabelle 99 beschreibt die Annahmen des OMS für die untersuchten Einzelmaßnahmen.

Tabelle 99: Ausgestaltung des Vergleichsszenarios (OMS) zur Quantifizierung der Wirkung der Einzelmaßnahmen in der Quellgruppe Landwirtschaft

Einzelmaßnahme	Ausgestaltung Vergleichsszenario (Ohne-Maßnahmen-Szenario)
Umsetzung der Düngeverordnung 2020	Es kommt zu keiner weiteren Verbesserung der N-Ausnutzung, die N-Mineraldüngung je Hektar Landwirtschaftsfläche liegt im Jahr 2030 um 19 kg höher als mit Umsetzung der Düngeverordnung 2020 (s. Haß et al. (2020), Tabelle 3.2 auf S. 42).
Erhöhung des Anteils gasdicht gelagerter Gülle (Biogasanlagen) aus der Rinder- und Schweinehaltung auf 70 Prozent	Statt eines Anstiegs des Anteils der in Biogasanlagen genutzten Gülle stagniert dieser auf dem Niveau von 2018.

Einzelmaßnahme	Ausgestaltung Vergleichsszenario (Ohne-Maßnahme-Szenario)
Umsetzung der NEC-Richtlinie gemäß den Maßnahmen im Nationalen Luftreinhalteprogramm	Es kommt gegenüber 2018 zu keiner weiteren Senkung der Ammoniakemissionen der Landwirtschaft durch Maßnahmen zur Luftreinhaltung (verbesserte Technologie, Anlagen und Management).
Ausbau des Ökolandbaus auf 20 % der Landwirtschaftsfläche im Jahr 2030	Statt eines verstärkten Ausbaus des Flächenanteils des ökologischen Landbaus erreicht der Anteil an der Landwirtschaftsfläche im Jahr 2030 14 %.
Senkung N-Saldo durch Umsetzung der Stoffstrombilanz-Verordnung	Ohne zusätzliche Begrenzung der N-Überschüsse liegt die N-Mineraldüngung je Hektar Landwirtschaftsfläche im Jahr 2030 um 8 kg höher.
Moorbodenschutz	Es werden nach 2018 keine neuen Projekte zum Moorbodenschutz umgesetzt.

Quelle: Thünen-Institut, eigene Darstellung.

Tabelle 100 zeigt die möglichen direkten Minderungen an Treibhausgasemissionen gegenüber dem in Tabelle 98 beschriebenen Vergleichsszenario ohne Maßnahmen an, die aus der Umsetzung der Einzelmaßnahmen resultieren können. Es wird angenommen, dass die Umsetzung der Stoffstrombilanz-Verordnung erst nach 2025 wirksam wird. Die Umsetzung der Düngeverordnung und der Stoffstrombilanz-Verordnung tragen zur Verbesserung der N-Ausnutzung in der Landwirtschaft bei und ziehen eine Senkung der N-Mineraldüngung und damit verringerte Lachgasemissionen nach sich. Die Maßnahmen zur Umsetzung der NEC-Richtlinie unterstützen die Verbesserung der N-Ausnutzung durch Senkung der gasförmigen Stickstoff-Verluste aus Tierställen, Wirtschaftsdüngerlagerung und Ausbringung stickstoffhaltiger Dünger. Gleichzeitig tragen sie zur Absenkung der indirekten Lachgasemissionen aus atmosphärischer Stickstoff-Deposition bei.

Die Erhöhung des Anteils gasdicht gelagerter Gülle erfolgt den Annahmen zufolge durch einen verstärkten Einsatz von Gülle in vorhandenen Biogasanlagen sowie durch Ausbau von Gülle-betriebenen Neuanlagen. Dazu müssen die Förderinstrumente des EEG und der Agrarinvestitionsförderung sowie immissionsschutz- und baurechtliche Vorgaben konsequent auf das Ziel einer emissionsminimierten Lagerung von Gülle ausgerichtet werden. Zudem wird angenommen, dass durch den erhöhten Gülleeinsatz der Einsatz von Energiepflanzen in Altanlagen bis 2030 deutlich zurückgefahren wird. Die Maßnahme der gasdichten Güllelagerung wirkt vor allem auf die Minimierung der Methan- und Lachgasemissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung.

Der Ausbau des Ökolandbaus wirkt durch den Verzicht auf Stickstoff-Mineraldünger und verringerte Erträge und Erntereste reduzierend auf die Lachgasemissionen. Dabei wird angenommen, dass der Ökolandbau entsprechend der im Jahr 2016 beobachteten Strukturen der Flächennutzung und Tierhaltung weiterhin wächst. Beispielsweise wird der Anteil von Grünland an der Landwirtschaftsfläche von ca. 50 % fortgeschrieben, ebenso die im Vergleich zu konventionellen Landwirtschaftsbetrieben höheren Anteile an Klee gras und extensiven Ackerkulturen an der Ackerfläche. Weiterhin werden die relativen Ertragsunterschiede zwischen ökologischem und konventionellem Landbau fortgeschrieben. Es wird angenommen, dass mit der Umstellung auf ökologischen Landbau keine Abstockung des Tierbestandes verbunden ist, da kaum Betriebe mit sehr hoher Viehbesatzdichte umgestellt werden. Durch den ökologischen Landbau wird vor allem die extensive Rinderhaltung unterstützt.

Die Maßnahme Moorbodenschutz wird im Kapitel zu LULUCF (Kapitel 11.2) näher beschrieben.

Tabelle 100: Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen in der Quellgruppe Landwirtschaft

Einzelmaßnahme	Instrumententyp ⁹⁷	2025	2030	2035	2040
kt CO ₂ -Äq					
Umsetzung der Düngeverordnung 2020	R	1.073	2.515	2.515	2.515
Erhöhung des Anteils gasdicht gelagerter Gülle aus der Rinder- und Schweinehaltung auf 70 Prozent	E	1.581	3.083	3.083	3.083
Umsetzung der NEC-Richtlinie	R, E	352	879	879	879
Ausbau des Ökolandbaus auf 20 % der Landwirtschaftsfläche im Jahr 2030	E	372	629	629	629
Senkung N-Saldo durch Umsetzung der Stoffstrombilanz-Verordnung	R	0	880	880	880
Moorbodenschutz	E, O	45	74	98	122
Summe		3.423	8.060	8.084	8.108

Quelle: Thünen-Institut, eigene Darstellung.

9.1.4.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Tabelle zeigt die historische und projizierte Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Jahre 1990-2040. Die wichtigsten Teil-Quellgruppen sind Fermentation (3A, Methanemissionen aus der Verdauung), Düngewirtschaft (3B, Methan- und Lachgasemissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung) und Landwirtschaftliche Böden (3D, Lachgasemissionen aus der N-Düngung und N-Umsetzungen im Boden). Bei den Teil-Quellgruppen 3G, 3H und 3I handelt es sich um CO₂-Freisetzungen aus Kalk, Harnstoff und anderen Düngemitteln und unter der Teil-Quellgruppe Andere (3J) werden Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestlager) berichtet.

Bis zum Jahr 2018 wurden die Emissionen der Landwirtschaft um knapp 20 % gegenüber 1990 reduziert. Sie lagen damit 1 % unter dem Niveau des Jahres 2005. Bis zum Jahr 2030 sinken die Emissionen im MMS um 28 % gegenüber 1990. Die Emissionen sind 2030 im MMS etwa 11 % niedriger als im Jahr 2005. Die Emissionen gehen von 2018 bis 2030 um 6,2 Mio. t CO₂-Äq zurück, davon entfallen

⁹⁷ Eine Erläuterung der Instrumententypen kann Tabelle A 1 im Anhang entnommen werden.

3,7 Mio. t auf Methan und 2,5 auf Lachgas. Wichtige Treiber, die zu einer Senkung der landwirtschaftlichen Emissionen beitragen, sind die zunehmende Güllevergärung in Biogasanlagen in Verbindung mit gasdichter Lagerung und einem Rückgang des Energiepflanzeneinsatzes als Gärsubstrat für die Biogasproduktion, ein Rückgang der Einsatzmenge an chemisch-synthetischen N-Düngern und der Ammoniakemissionen, sowie ein leichter Rückgang der Rinder- und Schweinebestände. Dem steht u. a. eine Zunahme der Milchproduktion und der N-Mengen in Ernteresten gegenüber, von denen emissionssteigernde Wirkungen ausgehen.

Tabelle 101: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft zwischen 1990 und 2040 im MMS nach Teil-Quellgruppen und Gasen

	1990	2005	2018	2020	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂ -Äq							
CO₂-Emissionen								
Kalkung (3G)	2,2	1,4	2,1	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0
Harnstoffanwendung (3H)	0,5	0,6	0,6	0,4	0,7	0,6	0,6	0,6
Andere kohlenstoffhaltige Düngemittel (3I)	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
CO₂-Emissionen gesamt	3,2	2,3	2,9	2,6	2,9	2,8	2,8	2,8
CH₄-Emissionen								
Fermentation (3A)	35,4	25,9	25,1	24,1	25,0	24,7	24,7	24,7
Düngerwirtschaft (3B)	8,1	7,0	6,1	5,9	5,1	3,7	3,7	3,7
Andere (3J)	0,0	0,2	1,3	1,3	0,8	0,5	0,5	0,5
CH₄-Emissionen gesamt	43,5	33,2	32,5	31,3	30,9	28,9	28,9	28,9
N₂O-Emissionen								
Düngerwirtschaft (3B)	3,9	3,4	3,2	3,1	2,7	2,1	2,1	2,1
Landwirtschaftliche Böden (3D)	28,8	25,2	24,6	23,9	25,0	23,6	23,5	23,5
Andere (3J)	0,0	0,1	0,3	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0
N₂O-Emissionen gesamt	32,7	28,7	28,1	27,3	27,8	25,6	25,6	25,6
Summe CO₂+CH₄+N₂O								
Quellgruppe Landwirtschaft (3) gesamt	79,3	64,2	63,6	61,2	61,6	57,3	57,3	57,3
<i>ggü. 1990</i>	0 %	-19 %	-20 %	-23 %	-22 %	-28 %	-28 %	-28 %
<i>ggü. 2005</i>	24 %	0 %	-1 %	-5 %	-4 %	-11 %	-11 %	-11 %

Quelle: (Umweltbundesamt (UBA) 2020), Berechnungen des Thünen-Instituts.

9.2 Energieverbräuche der Landwirtschaft

9.2.1 Methodik

Nach der Sektorabgrenzung des Klimaschutzplans werden die energiebedingten Emissionen der Landwirtschaft, die unter der CRF Kategorie 1.A.4.c berichtet werden, dem Landwirtschaftssektor zugeordnet. In der Inventar-Logik werden diese Emissionen dem GHD-Sektor zugeordnet und müssen daher für die nachfolgenden Berechnungen aus dem GHD-Energieverbrauch herausgerechnet werden.

Der Energieverbrauch der Landwirtschaft wurde durch ein Excel-basiertes Modell bestimmt, das die Landwirtschaft entsprechend der CRF-Klassifizierung in drei Subsektoren aufteilt. Der Energieverbrauch aus der Stromnachfrage wird weiterhin im Energiesektor erfasst:

- ▶ CRF 1.A.4.c.i Stationäre Feuerungsanlagen der Landwirtschaft (z. B. Heizungsanlagen von Gebäuden, Gewächshäusern und Ställen sowie Biogasanlagen),
- ▶ CRF 1.A.4.c.ii Mobile Quellen der Land- und Forstwirtschaft (z. B. Traktoren, Mähdrescher und Harvester, aber auch Motorsägen),
- ▶ CRF 1.A.4.c.iii Fischerei.

Für jeden der drei Subsektoren unterscheidet das Modell zwischen verschiedenen fossilen, biogenen und strombasierten Brennstoffen sowie weiteren Energieträgern (z. B. Strom und Solarthermie). Szenarioentwicklungen können dabei einzeln für jeden Brennstoff abgebildet werden. 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 Gewächshäuser, 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 bilden 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.

Vor allem in Bezug auf die stationären Feuerungsanlagen (CRF 1.A.4.c.i) bestehen große Unsicherheiten hinsichtlich der Datengrundlage. Die eingesetzten Energiemengen können daher nur schätzungsweise den einzelnen Anwendungen (Gewächshäuser, Trocknung, Stallheizungen) zugeordnet werden und ein großer Anteil verbleibt im Bereich der sonstigen Wärmenachfrage.

9.2.2 Annahmen und Parameter

Mit der Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparungen in der Landwirtschaft und Gartenbau besteht ein wesentliches Förderinstrumentarium für die Energieeffizienz und für den Brennstoffwechsel zu erneuerbaren Energien in den Betrieben. Im Rahmen des Programms wird sowohl die Beratung als auch die Investition in Einzelmaßnahmen, Modernisierung und Neubau/Neuanschaffung von Gebäuden, Geräten und Maschinen gefördert. Gleichzeitig können weitere Förderprogramme wie das EEG oder das Marktanzreizprogramm zum Ausbau der Erneuerbaren Energien aber auch die Bundesförderung für effiziente Gebäude durch die Betriebe in Anspruch genommen werden, die auch anderen Sektoren zugänglich sind. Zusätzlich betrifft die Einführung eines CO₂-Preises für die Bereiche Wärme und Verkehr auch den landwirtschaftlichen Energieverbrauch und

wirkt unterstützend. Dies in Kombination mit fehlenden Daten zur aktuellen Situation macht eine Abschätzung auf Basis der verfügbaren Fördermittel schwierig. Die Abschätzungen zu den Energieeinsparungen beruhen daher auf Annahmen zum Durchdringungsgrad und der technisch möglichen Energieeinsparung. Die Werte werden sowohl für die Entwicklung von heute bis ins Jahr 2030 als auch für den Zeitraum von 2030 bis 2040 verwendet. Dies sind im Einzelnen:

- ▶ Gewächshäuser.
- ▶ 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 etc.): Durchdringungsgrad 25 %, Effizienzsteigerung 30 %.
- ▶ Sonstiges (wahrscheinlich überwiegend landwirtschaftliche Wohngebäude): Übertragung durchschnittlicher Einsparungen aus anderen Maßnahmen.
- ▶ Methanschluß: Es wird angenommen, dass durch eine regelmäßige Wartung und verbesserte Steuerung der Biogasanlagen die Methanemissionen um bis zu 10 % vermieden werden können.
- ▶ Mobile Innenwirtschaft: Durchdringungsgrad 34 %, Effizienzsteigerung 10 %, zusätzlich Umstellung der mobilen Maschinen auf elektrische Antriebe.
- ▶ Außenwirtschaft schwere Landmaschinen: Durchdringungsgrad 34 %, Effizienzsteigerung 10 % z. B. durch konservierende Bodenbearbeitung, Precision farming, energieeffizientes Fahren, aber auch Kauf von effizienteren Maschinen.

9.2.3 Ergebnisse

9.2.3.1 Entwicklung des Energieverbrauchs

Abbildung 44 und Tabelle 102 zeigen die Entwicklung des Energieverbrauchs des KSP-Sektors Landwirtschaft im Zeitraum von 1990 bis 2040. Seit der Wiedervereinigung im Jahr 1990 sank der Energieverbrauch kontinuierlich und erreichte um das Jahr 2005 ein Minimum. Seither stieg der Energieverbrauch wieder an, was vor allem auf zwei Effekte zurückzuführen ist: Zum einen wird ein Teil des Brennstoffeinsatzes in Biogasanlagen in der Landwirtschaft bilanziert statt im Sektor der Energieumwandlung⁹⁸, zum anderen führte eine verstärkte Mechanisierung zu einem steigenden Bestand an Traktoren und anderen Landmaschinen.

⁹⁸ Die Biogasanlagen stehen in den landwirtschaftlichen Betrieben. Damit fällt die Wärme dort an und wird auch vor Ort genutzt. Mit der zusätzlichen Wärmequelle stieg auch die Wärmenachfrage. Ein Großteil der Wärme wird daher für Trocknungsprozesse in der Landwirtschaft genutzt, aber auch die Nutzung der Wärme in privaten Haushalten nimmt zu (DBFZ-Report 32, 2019).

Abbildung 44: Entwicklung des Energieverbrauchs im KSP-Sektor Landwirtschaft im MMS

Quelle: (UBA 2020a, 2020b; Eurostat 2020), Modellrechnungen Öko-Institut

Im Landwirtschaftssektor wird ein Teil des Biogaseinsatzes berichtet, der zur Erzeugung von Strom und Wärme in KWK-Anlagen von Biogasanlagen dient. Zwischen 2005 und 2018 ist der Biogaseinsatz stark angestiegen und 2018 machte er 39 % des stationären Energieverbrauchs der Landwirtschaft aus.

Mit Ausnahme der Biogasanlagen verbrauchte im Jahr 2018 die stationäre Landwirtschaft 28 PJ an Brennstoffen. Bis zum Jahr 2030 sinkt dieser Verbrauch auf 24 PJ und 21 PJ im Jahr 2040. Außerdem werden Verbrennungsprozesse teilweise durch den zunehmenden Einsatz von Umweltwärme, Solarenergie und Strom verdrängt. Im Saldo führen die Maßnahmen zu einer deutlichen Reduktion des stationären Energieverbrauchs außerhalb der Biogasanlagen (siehe Tabelle 102).

Die Entwicklung des Biogaseinsatzes ist vor allem durch die Entwicklung der Biogasanlagen und damit von Maßnahmen und Annahmen (insbesondere Erneuerbare-Energien-Gesetz) für die Energiewirtschaft bestimmt, siehe insbesondere Kapitel 5.1.2.1 und 5.1.3.2.

Bei den Fahrzeugen und mobilen Maschinen der Land- und Forstwirtschaft wird im Mit-Maßnahmen-Szenario der Trend des steigenden Gesamtenergieverbrauchs gestoppt. Bis 2030 sinkt der Energieverbrauch gegenüber 2018 durch eine Steigerung der Energieeffizienz oder besserer Fahrzeuge um 3 % und bis 2040 um 7 %. Ein Teil der fossilen Kraftstoffe wird durch biogene Kraftstoffe und strombasierte synthetische Kraftstoffe (Power-to-Liquid) ersetzt. Zudem werden auch elektrische Antriebe genutzt. Daher sinkt der Einsatz fossiler Kraftstoffe sogar um 5 % bis 2030 und um 15 % bis 2040.

Der Anteil der Fischerei war historisch am gesamten Energieverbrauch des KSP-Sektors Landwirtschaft unbedeutend und insgesamt rückläufig.⁹⁹ Entsprechend wurde auch für die Zukunft ein rückläufiger Trend angenommen.

Tabelle 102: Entwicklung des Energieverbrauchs im KSP-Sektor Landwirtschaft im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
PJ							
Kohlen	30	1	0	0	—	—	—
Heizöl	31	21	12	10	9	9	9
Erdgas	9	11	11	10	9	7	5
Diesel	58	44	57	54	53	51	48
Benzin & LPG	4	5	3	2	1	1	1
Feste Bio- masse	10	5	4	4	4	4	5
Biokraftstoffe	—	1	3	3	3	4	4
Biogas	—	1	29	25	22	23	23
Power-to-Li- quid	—	—	—	—	—	1	2
Umwelt- wärme	—	—	—	0	1	1	2
Solarenergie	0	0	0	0	0	0	0
Strom	20	20	18	19	19	20	20
Summe	160	108	137	128	123	121	119
davon statio- när (inkl. Strom und Erneuerbare)	100	60	76	70	65	65	64
davon mobil (inkl. Strom)	60	47	59	58	57	56	55
davon Fische- rei	1	1	2	1	0	0	0
davon Brenn- stoffe	141	88	119	109	103	100	97

Quelle: (UBA 2020a, 2020c; Eurostat 2020), Modellrechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Energieverbräuche, die in der Tabelle als 0 PJ dargestellt sind, existieren, sind aber kleiner als 0,5 PJ. Im Gegensatz dazu sind nichtexistierende Energieverbräuche als „—“ dargestellt.

⁹⁹ Zwischen 2015 und 2018 stieg laut UBA 2020a, 2020c der Energieeinsatz in der Fischerei um den Faktor fünf. Dieser Anstieg ist fundamental nicht begründbar und ist wohl ein statistisches Artefakt, das für die Modellierung ignoriert wurde.

9.2.3.2 Bewertung der Einzelmaßnahmen

Die Bewertung der Einzelmaßnahmen erfolgt im MMS gegenüber dem Jahr 2018. Es wird davon ausgegangen, dass ohne die genannten Maßnahmen der Energieeinsatz in der Land- und Forstwirtschaft auf dem Niveau von 2018 bleibt und auch die Erneuerbaren nicht weiter ausgebaut werden. Für die Berechnung der Emissionsminderungen wird sowohl die Ausweitung der Energieeffizienz als auch der Brennstoffwechsel hin zu mehr Erneuerbaren Energien berücksichtigt. Die gesamten Emissionsminderungen werden der Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparungen in der Landwirtschaft und Gartenbau zugeordnet, da eine Aufteilung auf die anderen Maßnahmen schwierig ist.

Tabelle 103: Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen im Bereich der energiebedingten Emissionen aus der Landwirtschaft

Maßnahme	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂ -Äq			
Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO ₂ -Einsparungen in der Landwirtschaft und Gartenbau	0,5	0,8	1,1	1,5

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

9.2.3.3 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Tabelle 104 zeigt die Entwicklung der mit den Energieverbräuchen des KSP-Sektors Landwirtschaft verbundenen Emissionen.

Tabelle 104: Entwicklung der energetischen Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂ -Äq						
Stationäre Quellen	6,0	2,4	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2
Mobile Quellen	4,5	3,5	4,2	4,1	4,0	3,8	3,6
Fischerei	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	10,6	5,9	6,2	5,7	5,4	5,1	4,8

Quelle: (UBA 2020a, 2020c; Eurostat 2020), Modellrechnungen Öko-Institut

Zwischen 1990 und 2018 konnten die Emissionen von 10,6 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 1990 um 41 % auf 6,2 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2018 reduziert werden. Dieser Rückgang ist vor allem auf die stationären Quellen zurückzuführen. Im Jahr 2040 betragen die Emissionen aus stationären Quellen nur noch etwa ein Fünftel der Emissionen des Jahres 1990.

Die Emissionen aus mobilen Quellen, also Traktoren und übrigen Maschinen, sind zwischen 1990 und 2005 um mehr als ein Fünftel gesunken, seither aber wieder fast auf das Ausgangsniveau gestiegen. Im MMS wird diese Entwicklung gestoppt und die Emissionen sinken wieder, liegen aber auch im Jahr 2040 noch höher als im Jahr 2005.

Die Emissionen der Fischerei waren und bleiben auch in Zukunft unbedeutend.

9.3 Gesamtergebnisse Landwirtschaft

In Tabelle 105 werden für den Zeitraum 2020 bis 2030 auf Basis der Angaben in Tabelle 101 sowie Tabelle 104 interpolierte Jahreswerte für den Sektor Landwirtschaft gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz ausgewiesen (Quellgruppe 3 Landwirtschaft plus Teil-Quellgruppe 1.A.4.c Stationäre und Mobile Feuerung in Land- und Forstwirtschaft und in der Fischerei). Der ausgewiesene jährliche Verlauf der Emissionsentwicklung ist nicht belastbar. Die Werte für das Jahr 2025 für die Quellgruppe Landwirtschaft wurden durch Interpolation zwischen dem Basiszeitraum 2016-18 der Thünen-Baseline und dem Zieljahr 2030 ermittelt. Die Werte für das Jahr 2020 wurden erst später aus den Aktivitätsdaten der Vorjahresschätzung ermittelt und ergänzt. Sie weisen ein gegenüber 2018 um 2,6 Mio. t CO₂-Äq verringertes Emissionsniveau aus und liegen damit bereits unterhalb des für 2025 erwarteten Emissionsniveaus und 2,8 Mio. t CO₂-Äq unterhalb des Sektorziels für 2020.

Unabhängig von den Unsicherheiten bezüglich der jährlichen Emissionshöhe lassen die Projektionsrechnungen für das MMS erwarten, dass das Sektorziel Landwirtschaft voraussichtlich schon vor dem Jahr 2025 verfehlt wird. Die Minderungslücke wächst bis 2030 auf 6,8 Mio. t CO₂-Äq an.

Tabelle 105: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS

Kategorie	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO ₂ -Äq										
Verbrennung von Brennstoffen	6,0	5,9	5,9	5,8	5,8	5,7	5,7	5,6	5,5	5,5	5,4
Fermentation bei der Verdauung	24,1	24,3	24,5	24,6	24,8	25,0	24,9	24,9	24,8	24,7	24,7
Wirtschaftsdünger-Management	9,0	8,8	8,5	8,3	8,0	7,7	7,3	7,0	6,6	6,2	5,8
Landwirtschaftliche Böden	23,9	24,1	24,4	24,6	24,8	25,0	24,7	24,5	24,2	23,9	23,6
Kalkung	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Harnstoffanwendung	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
Andere kohlenstoffhaltige Dünger	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Anderes	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5
Gesamt	67,2	67,2	67,2	67,3	67,3	67,3	66,4	65,5	64,6	63,7	62,8

Kategorie	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	70	68	67	66	65	63	62	61	59	57	56
Abweichung vom Sektorziel*	-2,8	-0,8	0,2	1,3	2,3	4,3	4,4	4,5	5,6	6,7	6,8

Quelle: (UBA 2020a), Modellrechnungen Thünen-Institut und Öko-Institut

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

In Tabelle 106 wird die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz Emissionsberechnungen zwischen 1990 und 2040 zusammenfassend dargestellt. Zur Interpretation der Entwicklung siehe Kapitel 9.1.4.2 und 9.2.3.3.

Tabelle 106: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
CO ₂ -Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	13,5	8,1	8,8				
MMS				8,4	8,0	7,7	7,3
CH ₄ -Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	43,7	33,2	32,8				
MMS				31,1	29,0	29,0	29,0
N ₂ O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	32,7	28,8	28,2				
MMS				27,9	25,7	25,7	25,7
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018	89,9	70,1	69,8				
MMS				67,3	62,8	62,4	62,0
Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018		-22,0	-22,3				

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
MMS				-25,1	-30,2	-30,6	-31,0
Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 2005 in %						
Entwicklung 1990 – 2018			-0,4				
MMS				-4,0	-10,5	-11,0	-11,5

Quelle: (UBA 2020a), Modellrechnungen Thünen-Institut und Öko-Institut

10 Abfallwirtschaft und Sonstiges

10.1 Methodik

Die Berechnung der Treibhausgasemissionen im Abfallsektor (CRF-Kategorie 5) erfolgt mit dem Waste_Mod-Modell des Öko-Instituts. In dem modularen Abfallmodell werden alle Emissionskategorien der UNFCCC-Berichterstattung abgebildet.

Das erste Modul berechnet die Emissionen aus der Ablagerung von Abfällen auf Deponien basierend auf dem vom IPCC entwickelten und vom Öko-Institut erweiterten Multi-Phasen-Abfallmodell (Emissionen aus abgelagerten Abfällen auf Deponien, Quellgruppe 5.A). Darin wird die aktuelle Situation der Altdeponien auf der Basis der in der Vergangenheit erfolgten Ablagerungen von Abfällen, deren Zusammensetzung und Potenzial zur Bildung von Treibhausgasemissionen ebenso berücksichtigt, wie der Stand der Umsetzung der Abfälle und die bisher schon entstandenen Emissionen. Neben den Altdeponien werden die Emissionen aus der Ablagerung von Rückständen aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) auf Deponien im o.g. Modell einbezogen. Zusätzlich können die Minderungswirkungen der Maßnahmen zur Deponiebelüftung berücksichtigt werden.

Die Berechnung der Emissionseinsparungen durch die Deponiebelüftung erfolgt nach einer im Auftrag des UBA ermittelten Methodik 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. In der Modellierung werden die ausgewiesenen Emissionsreduktionen aus den Daten des PtJ¹⁰⁰ zur Treibhausgasminderung aus der Deponiebelüftung anteilig auf die Entwicklung des Anteils des Degradable Organic Carbons (DOCm) des Abfallmodells umgelegt.

Im zweiten Modul werden die Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung berechnet. Die Daten zu Emissionen aus Bioabfallbehandlungsanlagen und mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen werden in Bezug zum Anlagendurchsatz berechnet. Hierzu werden die während der Bearbeitung vorliegenden aktuellen Daten zur Abfallstatistik von DESTATIS und aktuelle Studien zur Anlagentechnik ausgewertet. Die Entwicklung des Anlagendurchsatzes erfolgt in Abhängigkeit von umgesetzten oder geplanten Maßnahmen zur getrennten Erfassung und Verwertung von Abfällen im Rahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, wird aber auch beeinflusst von Maßnahmen des Klimaschutzplans zur Reduktion von Lebensmittelabfällen. 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 aus dem aktuellen Treibhausgasinventar für Methan und Lachgas verknüpft.

Die Quellkategorie 5.C Emissionen aus der Abfallverbrennung wird im deutschen Treibhausgas-Inventar als NO (not occurring) berichtet, da sie energetisch verwertet werden und damit im Energiesektor unter 1.A.1.a berichtet werden.

Im dritten Modul werden für die Unterquellgruppen kommunale und industrielle Abwasserbehandlung (5.D) und andere (5.E) die einwohnerspezifischen Rahmendaten eingesetzt und die Emissionsfaktoren aus dem aktuellen Inventarbericht entsprechend der Annahmen zur Entwicklung der Proteinaufnahme und dem Anschlussgrad an die öffentliche Kanalisation fortgeschrieben.

¹⁰⁰ Aufstellung des Projektträgers Jülich zu den im Rahmen der Initiative „Investive Klimaschutzmaßnahmen - Klimaschutz bei stillgelegten Siedlungsabfalldeponien“ bewilligten Deponiebelüftungsprojekten in den Jahren 2013 bis 2020 (Stand 31.10.2020).

10.2 Maßnahmen

Im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges werden entsprechend der Systematik des Nationalen Treibhausgasinventars nur die nicht-energetischen Treibhausgasemissionen der Abfallwirtschaft adressiert (CRF Kategorie 5). Dazu zählen die Methanemissionen aus der Ablagerung von Abfällen insbesondere auf sog. Altdeponien), Methan- und Lachgasemissionen aus der biologischen Abfallbehandlung, sowie aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen. Zudem werden Methan- und Lachgasemissionen aus der Abwasserbehandlung berücksichtigt.

Einige Aktivitäten im Abfallbereich, wie der Betrieb von Müllverbrennungsanlagen oder Recyclingmaßnahmen führen i.d.R. zu Emissionen oder Einsparungen in anderen Sektoren. Emissionsreduktionen durch die Steigerung des Recycling-Anteils beispielsweise wirken sich nicht auf die Treibhausgasemissionen im Sektor Abfall (CRF Kategorie 5) aus, sondern in den Sektoren Energie und Industrie, wenn z. B. aufgrund zunehmender Anteile beim Recycling weniger dieser Abfälle verbrannt werden. Maßnahmen wie das Verpackungsgesetz oder auch die Gewerbeabfallverordnung werden daher nicht im Bereich der Abfallwirtschaft (CRF Kategorie 5) analysiert, sondern werden in den Sektoren Energie und Industrie mitbilanziert.

Die maßgeblichen klimawirksamen regulatorischen Rahmenbedingungen für den Abfallsektor waren seit 1993 das Wirken der Technischen Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall, TaSi) nachfolgend seit 2001 der Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) und nachfolgend ab 2009 der Deponieverordnung, die Regelungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) von 1996 bzw. ab 2012 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG), sowie die Regelungen der Gewerbeabfallverordnung und der Verpackungsverordnung nachfolgend des Verpackungsgesetzes von 2017.

10.2.1 Ordnungsrecht

a) Deponieverordnung

Die relevanten rechtlichen Regelungen entstammen insbesondere der Abfallablagerungsverordnung von 2001, die ab dem 1. Juni 2005 die Ablagerung unbehandelter Organik haltiger Abfälle (und damit der für die Ausgasung von Methan verantwortlichen organischen Stoffe) unterbindet und eine anderweitige Entsorgung – Abfallvorbehandlung – z. B. thermische Behandlung durch energetische Verwertung (insbesondere) oder mechanisch-biologische Abfallbehandlung erfordert. Die Regelungen der Abfallablagerungsverordnung sind 2009 in die Deponieverordnung eingeflossen, die auch die diesbezüglichen Regelungen der TaSi ersetzt.

Parametrisierung:

Für die Ablagerung von vorbehandelten Abfällen auf Deponien wird angenommen, dass diese bezogen auf die Menge je Einwohner unverändert bleiben, in der Summe demzufolge entsprechend der Entwicklung der Einwohnerzahl folgen. 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 Ablagerung von Abfällen auf Deponien bildet neben der Ausgasung der auf Deponien abgelagerten organischen Materialien über die Zeit auch die Erfassung von Deponiegas ab. Der Anteil des Deponiegases wird daher konstant fortgeschrieben, weitere Ausgestaltungen zum Deponiegas erfolgen unter d) Förderung von Technologien zur optimierten Erfassung von Deponiegasen in Siedlungsabfällen.

b) Kreislaufwirtschaftsgesetz

Am 30.3.2011 hat die Bundesregierung die Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes beschlossen. Das Gesetz ist am 1. Juni 2012 in Kraft getreten. Durch Umsetzung der fünfstufigen Abfallhierarchie der EU-Abfallrahmenrichtlinie wird dem Recycling eine höhere Bedeutung als der energetischen Verwertung beigemessen. Dies führt zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen in anderen Sektoren wie dem Industrie- und im Energiesektor. Für die Verringerung der Emissionen des Abfallsektors sind vor allem die organischen Abfälle relevant. Gemäß der Novelle dieser Richtlinie aus dem Jahr 2018 müssen ab dem Jahr 2025 mindestens 55 % aller Siedlungsabfälle recycelt werden. Seit 1.1.2015 sind zudem nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz überlassungspflichtige Bioabfälle aus privaten Haushaltungen flächendeckend getrennt zu erfassen und zu verwerten. Seitdem haben zahlreiche weitere Landkreise und Kommunen die getrennte Bioabfallerfassung und -verwertung neu eingeführt. Eine vollständige Getrenntfassung ist jedoch noch nicht umgesetzt. Bislang sind ca. 55 % der Einwohner Deutschlands an die getrennte Bioabfallerfassung angeschlossen.

Parametrisierung:

Für die Entwicklung der getrennt erfassten Abfallmengen des Bioabfalls werden die Potenzialschätzungen aus der Studie „UBA (2019): BioRest. Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem“ (UBA 2019) für Biogut und Grüngut aus dem BAU-Szenario für das Jahr 2030 übernommen. Damit wird 2030 für Biogut mit 6,5 Mio. t Frischmasse (FM) (4,19 Mio. t FM 2015) und für Grüngut mit 5,5 Mio. t FM (4,65 Mio. t FM 2015) gerechnet. Alle weiteren Mengen werden gegenüber der aktuellen Statistik konstant gehalten. Annahmen zur Reduktion von Lebensmittelabfällen werden unten getroffen.

Die Aufteilung zwischen Kompostierung und Vergärung wird bis zum Jahr 2040 von den heutigen Anteilen schrittweise auf 50 % zu 50 % angepasst. Derzeit werden 38 % vergoren und 62 % kompostiert. Auf Grund der gesteigerten Nachfrage nach Bioenergie auf Abfall- und Reststoffen wird eine Erhöhung der Abfallvergärung vorausgesetzt. Dabei wird auf die Emissionsfaktoren aus der UBA-Studie Texte 39/2015 (UBA 2015) zurückgegriffen und der Mittelwert für Vergärungsanlagen und Vergärungsanlagen mit Nachrotte genutzt. Damit reduziert sich der CH₄-Emissionsfaktor für Vergärung von 2.800 g CH₄/t Bioabfall auf 1.760 bis 2030 und für N₂O von 67 auf 40 g N₂O/t Bioabfall.

10.2.2 Ökonomische Instrumente und finanzielle Förderung**c) Förderung der Deponiebelüftung**

Seit 2013 wird die direkte Deponiebelüftung zur Reduktion des Methanbildungspotenzials im Rahmen der NKI-Kommunalrichtlinie gefördert. Durch Weiterführung und Intensivierung dieser Maßnahme, wie im Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 beschrieben, insbesondere durch intensivere Information und Motivation der betroffenen Akteure sowie Erhöhung der maximalen Zuwendung, wurden bis Oktober 2018 43 beantragte Projekte genehmigt. Am 1.1.2019 ist die neue Kommunalrichtlinie in Kraft getreten, die mit der Fassung vom 22. Juli 2020 noch geringfügige Änderungen erfahren hat. Zwischenzeitlich, d.h. bis zum 31.03.2021, wurden weitere 32 Vorhaben gestartet, die alle bis zum September 2022 beendet sein sollen. Anträge können noch bis zum 31.12.2022 gestellt werden. Die Laufzeit der Förderung ist in der Regel 18 Monate. Innerhalb des Programms sollen die letzten Belüftungsmaßnahmen 2025 genehmigt werden und im Jahr 2027 beginnen. Danach können nach dem Maßnahmenprogramm 2030 ordnungsrechtliche Maßnahmen in Kraft treten.

Parametrisierung:

Für die Erreichung der Klimaziele ist die Förderung von großen Projekten zur Deponiebelüftung entscheidend (Minderungspotenzial ca. 50.000 t CO₂-Äq/Deponie/a). Im Rahmen der Modellierung wird angenommen, dass ab dem Jahr 2021 bis zum Jahr 2029 pro Jahr sieben Projekte in diesem Umfang realisiert werden können.

Die Berechnung der Deponiebelüftung erfolgt nach einer derzeit im Auftrag des UBA ermittelten Methodik 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.

In der Modellierung auf Basis des Abfallmodells werden die Anzahl der Deponien mit Deponiebelüftung und die Annahmen zur Emissionsreduktionen (7*50.000 t CO₂-Äq /a) anteilig auf die Entwicklung des Anteils des Degradable Organic Carbons (DOCm) im Abfallmodell berechnet. Dabei wird die Zusammensetzung des Deponiegases (ca. 50 % Methan) berücksichtigt und der Anteil des DOCm der aerob abgebaut werden kann. Dadurch sind die als Ergebnis der Modellierung ausgewiesenen Emissionsreduktionen der Methanemissionen geringer als die Emissionsreduktionen auf Basis der Eingangsdaten.

d) Förderung von Technologien zur optimierten Erfassung von Deponiegasen in Siedlungsabfällen

Im Rahmen der Kommunalrichtlinie wird neuerdings auch die optimierte Sammlung der Gase auf Deponien gefördert, wodurch eine Verbesserung der bestehenden Gaserfassung um mindestens 25 % erreicht werden soll, oder mindestens 60 % des anfallenden Gases erfasst werden müssen.

Parametrisierung:

Für die Parametrisierung werden die Annahmen aus dem Klimaschutzprogramm 2030 übernommen. Es wird mit einer Förderung der optimierten Gaserfassung in sieben Projekten jährlich gerechnet (Minderungspotenzial pro Jahr ca. 0,025 Mio. t CO₂-Äq /Projekt).

10.2.3 Flankierende und informatorische Instrumente

e) Reduktion von Lebensmittelabfällen

Als sektorübergreifende Maßnahme wird im Klimaschutzprogramm 2030 die Reduktion der Lebensmittelabfälle genannt. Die Bundesregierung hat im Februar 2019 eine Nationale Strategie zur Reduzierung der Lebensmittelverschwendung beschlossen, mit dem Ziel die Lebensmittelabfälle bis 2030 zu halbieren. Während der Treibhausgasmindeeffekt dieser Maßnahme in anderen Sektoren schwer zu quantifizieren ist, wirkt diese Maßnahme direkt auf die Emissionen des Abfallsektors.

Parametrisierung:

Nach einer aktuellen Studie des Thünen-Instituts wird von einem durchschnittlichen jährlichen Lebensmittelabfallaufkommen von 75 kg/Einwohner in den Haushalten ausgegangen (Schmidt et al. 2019). Hinzu kommen ca. 20 kg Lebensmittelabfälle pro Einwohner aus der Außer-Hausverpflegung. Eine Reduktion um 50 % bis zum Jahr 2030 würde insgesamt zu einer Reduktion um jährlich 47 kg/Einwohner führen. Allerdings ist unsicher, ob die bestehenden Instrumente (Informationskampagnen, Dokumentation etc.) ausreichen, um eine solche Reduktion herbeizuführen. Daher wird für das Jahr 2030 mit einer 50 %-igen 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. Damit sinkt das Bioabfallaufkommen, was in biologischen Abfallbehandlungsanlagen behandelt wird.

10.3 Annahmen und Parameter

Für die Berechnung der Emissionen des Abfallsektors werden folgende Annahmen getroffen:

Emissionen aus abgelagerten Abfällen aus Deponien

Durch die Förderung für kommunale Klimaschutz-Modellprojekte ist zukünftig die Förderung der Deponiebelüftung von größeren Deponien mit Einsparpotenzialen von jeweils ca. 50.000 t CO₂-Äq pro Jahr möglich. 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.

Der Berechnung dieser Maßnahme liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- a) Im Rahmen der Modellierung wird angenommen, dass ab dem Jahr 2021 bis zum Jahr 2029 pro Jahr sieben Projekte mit jährlichen Einsparpotenzialen von 50.000 t CO₂-Äq pro Deponie realisiert werden können.
- b) Für die Förderung der optimierten Gaserfassung wird mit sieben Projekten jährlich gerechnet (Minderungspotenzial pro Jahr ca. 0,025 Mio. t CO₂-Äq /Projekt).

Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung

Der Berechnung der Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- a) Steigerung der getrennt erfassten Abfallmengen des Bioabfalls bis 2030 auf 6,5 Mio. t Biogut (heute 4,9 Mio. t) und 5,5 Mio. t Grüngut (heute 5,4 Mio. t).¹⁰¹ Darüberhinausgehende Mengen an Bioabfällen bleiben konstant.
- b) Reduktion der Lebensmittelabfälle bis 2030 von 95 kg/Einwohner/Jahr um 24 kg/Einwohner/Jahr. Das entspricht einer Reduktion um 25 % ggü. heute.¹⁰² Auch wenn Teile der Lebensmittelabfälle auch zukünftig über den Restmüll entsorgt werden, wird für die Quantifizierung angenommen, dass die Reduktion der Lebensmittelabfälle Auswirkungen auf die Höhe des separat gesammelten Bioabfalls hat. Damit sinkt das Bioabfallaufkommen, das in biologischen Abfallbehandlungsanlagen behandelt wird.
- c) Schrittweise Steigerung der Vergärungsanteile von heute 38 % am gesamten Bioabfallaufkommen auf 50 % bis zum Jahr 2040 auf Grund der gesteigerten Nachfrage nach Bioenergie aus Abfall- und Reststoffen.
- d) Anpassung der Emissionsfaktoren für die erweiterten Anlagenkapazitäten für die Abfallvergärung in Folge technischer Verbesserungen (z. B. durch geringere CH₄-Leckageraten etc.). Auf Basis der UBA Texte 39/2015 (UBA 2015) wird der Mittelwert für Vergärungsanlagen und Vergärungsanlagen mit Nachrotte angesetzt: 1.760 g CH₄/t Bioabfall (heute 2.800 g CH₄/t Bioabfall), für N₂O 40 g N₂O/t Bioabfall (heute 67 g N₂O/t Bioabfall).

¹⁰¹ Basierend auf den Potenzialschätzungen aus der Studie „BioRest. Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem“ (UBA 2019) für Biogut und Grüngut aus dem BAU-Szenario für das Jahr 2030.

¹⁰² Die durchschnittlichen Lebensmittelabfälle liegen bei 75 kg/Einwohner/Jahr in den Haushalten, hinzu kommen ca. 20 kg/Einwohner/Jahr aus der Außer-Haus Verpflegung (Schmidt et al. 2019). 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 eine solche Reduktion herbeizuführen. Daher wird für das Jahr 2030 mit einer 50 %-igen Zielerreichung gerechnet.

10.4 Ergebnisse

10.4.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen und Gasen

Im MMS sinken die Methan-Emissionen bis zum Jahr 2040 auf 101 kt CH₄. Gegenüber 1990 wird damit ein Rückgang der CH₄-Emissionen von -93,1 % erreicht, ggü. 2005 ein Rückgang von - 87,5 % (siehe Tabelle 107).

Während die CH₄-Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung, der Abwasserbehandlung und der Mechanisch-biologischen Abfallbehandlung ggü. 2018 annähernd konstant bleiben, sinken die CH₄-Emissionen aus abgelagerten Abfällen drastisch. Neben dem Ablagerungsverbot für organische Abfälle seit 2005 wirken hier die Maßnahmen zur Deponiebelüftung und zur optimierten Gaserfassung.

Die CH₄-Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung werden durch die Bevölkerungsentwicklung, die Ausweitung der separaten Bioabfallsammlung, der Reduktion der Lebensmittelabfälle und des Wechsels von der Kompostierung zur Abfallvergärung beeinflusst und schwanken daher geringfügig über die Zeit.

Tabelle 107: Entwicklung der Methanemissionen im Abfallsektor 1990 – 2040 in kt CH₄

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Ablagerung von Abfällen auf Deponierung	1.368,0	762,4	303,1	183,1	116,0	72,5	50,3
Biologische Abfallbehandlung	1,0	19,5	28,8	29,0	28,7	28,8	28,9
Abwasserbehandlung	105,6	29,8	21,9	22,0	22,0	22,0	22,0
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	NO, NE	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Gesamte Methanemissionen	1474,6	812,1	354,0	234,2	166,9	123,5	101,3
ggü. 1990 in %		-44,9	-76,0	-84,1	-88,7	-91,6	-93,1
ggü. 2005 in %			-56,4	-71,2	-79,5	-84,8	-87,5

Quelle: (UBA 2020a), Modellrechnungen Öko-Institut

Im MMS sinken die N₂O-Emissionen bis zum Jahr 2040 auf 2,9 kt N₂O. Gegenüber 1990 wird damit ein Rückgang der N₂O-Emissionen von -40,4 % erreicht, ggü. 2005 ein Rückgang von -13,9 % (Tabelle 108).

Im Bereich der N₂O-Emissionen wurde wesentliches Minderungspotenzial vor allem im Bereich der Abwasserbehandlung bereits seit 1990 erschlossen. Gleichzeitig stiegen die Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung in Folge des gestiegenen Abfallaufkommens. Ggü. 2018 bleiben die N₂O-Emissionen weitestgehend konstant. Im Bereich der biologischen Abfallbehandlung sinken die Emissionen geringfügig, vor allem durch den Wechsel von Kompostierung zur Abfallvergärung und die Verbesserung der Anlagen für zusätzliche Vergärungskapazitäten.

Tabelle 108: Entwicklung der Lachgasemissionen im Abfallsektor 1990 – 2040 in kt N₂O

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Biologische Abfallbehandlung	0,1	0,8	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
Abwasserbehandlung	4,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	NO, NE	0,9	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Gesamte Lachgasemissionen	4,8	3,3	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9
ggü. 1990 in %		-30,7	-38,8	-39,1	-39,6	-39,9	-40,4
ggü. 2005 in %			-11,7	-12,1	-12,8	-13,3	-13,9

Quelle: (UBA 2020a), Modellrechnungen Öko-Institut

Nach den Projektionen des MMS überschreiten die Emissionen des Abfallsektors im Jahr 2030 das Sektorziel gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz 2021. Durch eine Ausweitung der Maßnahmen zur Deponiebelüftung, der optimierten Gaserfassung und der Reduktion der Lebensmittelabfälle reduzieren sich die Emissionen bis 2030 deutlich, das Sektorziel von 4 Mio. t CO₂-Äq wird jedoch um rund 1 Mio. t CO₂-Äq überschritten (vgl. Tabelle 109).

Tabelle 109: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 2020 und 2030 im MMS

Kategorie	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO ₂ -Äq										
Abfallablagerung auf Deponien	6,8	6,1	5,7	5,3	4,9	4,6	4,2	3,9	3,5	3,2	2,9
Bioabfallbehandlung	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Abwasserbehandlung	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
Andere Bereiche	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gesamt	8,9	8,2	7,9	7,5	7,1	6,7	6,4	6,0	5,7	5,4	5,0
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	9	9	8	8	7	7	6	6	5	5	4

Kategorie	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Abweichung vom Sektorziel*	-0,1	-0,8	-0,1	-0,5	0,1	-0,3	0,4	0,0	0,7	0,4	1,0

Quelle für die Jahre 2021-2030: Modellrechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Die Werte für das Jahr 2020 wurden der Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2021) entnommen.

Anmerkung: Die Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen sind in Anhang A.2 zu finden.

Bis zum Jahr 2050 sinken die Emissionen des Abfallsektors auf 3,4 Mio. t CO₂-Äq. Gegenüber 1990 beträgt die Minderung -91,2 %, ggü. 2005 -84,1 % (Tabelle 110). Im Abfallsektor sind damit wesentliche Anstrengungen zur Reduktion der Emissionen schon frühzeitig eingeleitet und umgesetzt worden. Vor allem mit dem Ablagerungsverbot organischer Abfälle seit dem Jahr 2005 gehen auch heute noch Emissionsminderungen einher. Mit der Ausweitung der Deponiebelüftung und der optimierten Gaserfassung wird weiteres technisches Minderungspotenzial schon im MMS realisiert und auch die Reduktion von Lebensmittelabfällen trägt zu Emissionsminderungen im Abfallsektor bei.

Tabelle 110: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Abfallwirtschaft und Sonstige nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
CH ₄ -Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	36,9	20,3	8,8				
MMS				5,9	4,2	3,1	2,5
N ₂ O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	1,4	1,0	0,9				
MMS				0,9	0,9	0,9	0,9
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018	38,3	21,3	9,7				
MMS				6,7	5,0	4,0	3,4
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018		-44,4	-74,6				
MMS				-82,4	-86,8	-89,7	-91,2
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 2005 in %						
Entwicklung 1990 – 2018			-54,3				

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
MMS				-68,4	-76,3	-81,5	-84,1

Quelle: (UBA 2020a), Modellrechnungen Öko-Institut

10.4.2 Bewertung der Einzelmaßnahmen

Die Bewertung der Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen erfolgt im MMS gegenüber einem Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS). Das OMS bezieht die Entwicklung der Emissionen aus der Ablagerung von Abfällen auf Deponien inklusive der Deponieverordnung ein, aber nicht die Emissionsminderungen aus der Deponiebelüftung und der optimierten Gaserfassung. Darüber hinaus werden im OMS die Auswirkungen des erhöhten Bioabfallaufkommens in Folge des Kreislaufwirtschaftsgesetzes berücksichtigt, aber nicht die Reduktion der Lebensmittelabfälle. Die Minderungsabschätzungen erfolgen daher für die Maßnahmen zur Deponiebelüftung und optimierten Gaserfassung, als auch für die Reduktion der Lebensmittelabfälle. Insgesamt können bis zum Jahr 2040 mit den genannten Maßnahmen Minderungswirkungen von 1,2 Mio. t CO₂-Äq erzielt werden. Ca. 90 % der Minderungen werden über die Maßnahme zur Deponiebelüftung und optimierten Gaserfassung erzielt. Im Bereich der Lebensmittelabfallvermeidung liegt das Einsparpotenzial im Abfallsektor bei der angenommenen Ausgestaltung bei ca. 0,1 Mio. t CO₂-Äq. Diese Treibhausgase lassen sich reduzieren, wenn weniger Abfall anfällt, der behandelt werden muss. Insgesamt kann die Vermeidung von Lebensmittelabfällen zu einer weit höheren Reduktion der Emissionen führen, wenn dadurch weniger Lebensmittel produziert, transportiert und gelagert werden müssen.

Tabelle 111: Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen im Abfallsektor

Maßnahme	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂ -Äq			
Förderprogramm zur Ausweitung der Deponiebelüftung und Optimierung der Gaserfassung	0,37	0,89	1,14	1,06
Vermeidung von Lebensmittelabfällen	0,07	0,11	0,11	0,11
Summe der Einzelmaßnahmen	0,44	1,01	1,25	1,17

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

11 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)

11.1 Methodik und Annahmen und Parameter

Die Berichterstattung für den Sektor LULUCF im Waldbereich wurde für den Inventarbericht 2021 verbessert. Entsprechende Änderungen konnten für diesen Projektionsbericht noch nicht übernommen werden und sind mit Vorlage des nächsten Projektionsberichtes beabsichtigt. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die Waldentwicklung gemäß den Inventardaten von der projizierten Entwicklung zurückliegender Projektionsberichte abweicht. Die Senkenleistung des Waldes und somit des gesamten LULUCF-Sektors war erheblich niedriger projiziert worden als in der Kohlenstoffinventur 2017 festgestellt. Dies ist u. a. methodisch bedingt. Eine Überprüfung der zugrunde gelegten Annahmen und Szenarien sowie die Anpassung und Weiterentwicklung der Modellierungswerkzeuge für den Wald ist für den nächsten Bericht beabsichtigt. Die dürre- und insektenkalamitätsbedingten Waldschäden und die dadurch bedingten Einschlüsse der letzten Jahre sind in den Projektionen methodisch bedingt nicht berücksichtigt.

Die in diesem Projektionsbericht für den Sektor LULUCF enthaltenen Projektionen sind daher speziell für die Entwicklung der Waldsenke zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht hinreichend aussagekräftig. Eine verbesserte Datenlage zur Waldentwicklung, die u. a. auch die vollständigen Auswirkungen der Schadensereignisse der Jahre 2018-2021 auf den Wald mit enthalten wird, ist mit den Ergebnissen der nächsten Bundeswaldinventur zu erwarten. Ergebnisse liegen voraussichtlich Ende 2024 vor. Zudem sollen neuerer Technologien (u. a. Fernerkundung) verstärkt zum Einsatz kommen, um die Datengrundlage ggf. auch zwischen den Waldinventuren verbessern zu können.

Für die Aktivitätsdaten (im Wesentlichen Landflächen, differenziert nach Nutzung) in der Berichterstattungskategorie LULUCF werden die Veränderungen der Submission 2020 fortgeschrieben. Das heißt, dass die Flächengrößen für die Landnutzungsänderungen von 2018 auch in derselben Größenordnung für die Folgejahre angenommen werden. Ausnahmen sind die festgelegten Maßnahmen, die im Kapitel 11.3.1 beschrieben sind. Daraus ergeben sich entsprechend die Flächen für die Verbleibkategorien (Remaining). Maßnahmenbedingte Änderungen der projizierten Landnutzungsänderungen interagieren stets mit Flächen in Verbleibkategorien und anderen Landnutzungsänderungskategorien, da die Gesamtfläche konstant ist.

In der Landnutzungskategorie Wald werden die Emissionsfaktoren für den organischen und mineralischen Boden sowie der Streu über das Jahr 2018 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. Die Entwicklung der lebenden Biomasse wird für das MMS aus dem Basisszenario der WEHAM 2012 hergeleitet (wie in den vorangegangenen Projektionsberichten, siehe auch Thünen (2012) und BMEL (2016). Bezugsjahr für diese Projektion ist der Datenstand der letzten Bundeswaldinventur (2012). Das Basisszenario bildet die kommenden Jahrzehnte auf der Basis der vorhandenen Waldstrukturen (inklusive Altersverteilung) und mit Hilfe von im Jahr 2012 getroffenen Annahmen zu waldbaulichen Verfahren und Zielsetzungen und aufbauend auf Erfahrungen der vorhergehenden Jahre und Erwartungen an die kommenden Jahre ab. Als Holzaufkommensmodell weist WEHAM unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten das zur Verfügung stehende Rohholzpotential aus. Aufgrund der langen Aktionszeiträume im Wald sollten nie einzelne Jahre einer Projektion betrachtet werden (WEHAM liefert z. B. periodische Veränderungswerte über Fünfjahreszyklen).

Gerade am Anfang der WEHAM-Projektion sind modellierte und real gemessene Werte mit extremer Vorsicht zu vergleichen, da sich durch die Anpassung der Simulation an die Realität Modellierungsartefakte ergeben können. Die ersten simulierten Jahre weichen von den Ergebnissen der letzten Kohlenstoffinventur im Jahr 2017 ab. Die Effekte der Trockenjahre 2018 – 2020, welche sich negativ auf die Senkenleistung auswirken, sind regional unterschiedlich und bisher nicht in der Projektion aber bereits teilweise in den aktuellen Inventardaten erfasst. Sie können erst nach Auswertung der Bundeswaldinventur 2022 vollständig berücksichtigt werden.

Eine vorläufige Berücksichtigung dieser Effekte über die vorliegenden Holzeinschlagsdaten ist in Analogie zur bereits erfolgten Anpassung der Inventardaten für den nächsten Projektionsbericht beabsichtigt. Für den nächsten Projektionsbericht soll die Modellierung verbessert werden, dass die beobachteten Entwicklungen besser berücksichtigt werden können.

Der Beitrag der Holzprodukte zum MMS ist ab dem Jahr 2018 auf Basis des mit WEHAM projizierten Holzeinschlags entsprechend der methodischen Vorgaben des IPCC (2014) ermittelt. Für die anderen Landnutzungskategorien Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete und Siedlungen werden die Zeitreihen der Emissionsfaktoren ab dem Jahr 2018 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 und 2018 beziehen sich auf den Inventarbericht 2020. Auch die Projektionen wurden auf Basis der für den Inventarbericht 2020 verwendeten Methoden berechnet. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Projektionsberichts liegen für das Jahr 2020 mit der Vorjahresschätzung für den Inventarbericht 2021 Emissionsdaten vor, die unter Verwendung einer verbesserten Methode gewonnen wurden. Für den LULUCF-Sektor wurde eine Netto-Senke von -16,5 Mt CO₂e ermittelt. Die Werte beruhen auf einer Extrapolation der Ergebnisse der Kohlenstoffinventur 2017 und der Holzeinschlagsstatistik. Dadurch sind die Effekte der Trockenjahre 2018-2020 nur teilweise berücksichtigt.

Nach Auswertung der Bundeswaldinventur 2022 werden noch umfassendere Daten zu den Auswirkungen dieser Trockenphasen vorliegen. Über eine technische Korrektur werden die Inventardaten dann rückwirkend nachgebessert werden. Entsprechend Neuberechnete Daten liegen auch für die davorliegenden historischen Emissionen vor.

11.2 Maßnahmen

In der Quellgruppe LULUCF (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) traten im Jahr 2018 im Saldo über alle Landnutzungen Netto-Kohlenstofffestlegungen in Höhe von ca. 26,9 Mt CO₂e. auf. In den Kategorien Ackernutzung, Grünlandnutzung, Siedlungen und Feuchtgebiete entstanden Netto-Emissionen in Höhe von zusammen 43,3 Mt CO₂e. Der größte Teil stammt aus der Entwässerung organischer Böden zur landwirtschaftlichen Nutzung. Emissionen entstehen aber auch aus Siedlungsflächen auf Moorböden, aus dem Torfabbau (Torfnutzung und direkte Emissionen aus Abbaufächen) und aus der Umwandlung von Grünland in Ackerland auf Mineralböden. Innerhalb dieser Flächennutzungen wird auf Mineralböden 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 zusammen 73,2 Mt CO₂e pro Jahr an Kohlenstoffvorräten aufgebaut (in Wäldern 70 Mt, in Holzprodukten 3,2 Mt). Maßnahmen im LULUCF-Sektor adressieren die Verhinderung weiterer Umwandlungen von Grünland in Ackerland, den Schutz organischer Böden (Moorstandorte), die Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten und den Erhalt von Wald als Senke. Darüber hinaus werden in Deutschland täglich rund 52 Hektar als Siedlungsflächen und Verkehrsflächen neu ausgewiesen (Daten für das Jahr 2019).

11.2.1 Quantifizierte Maßnahmen

- a) Begrenzung der Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke bis 2030 auf **unter 30 Hektar Flächenneuanspruchnahme pro Tag**. Aus dem integrierten Umweltprogramm 2030 geht ein konkreter Zielwert von max. 20 ha/Tag Flächenneuanspruchnahme bis 2030 hervor. Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (Neuaufgabe 2021) fasst für 2050 eine Flächenkreislaufwirtschaft ins Auge (Flächenverbrauch Netto-null).
- b) Das Klimaschutzprogramm 2030 sieht in Kap. 3.4.7.2 den **Erhalt von Dauergrünland** vor. Die Grünlanderhaltung im Rahmen der Greening-Auflagen der GAP wird in Deutschland dergestalt umgesetzt, dass Betriebe, die Direktzahlungen erhalten und den Greening-Auflagen unterliegen, vor einer Umwandlung von Dauergrünland eine behördliche Autorisierung einholen müssen. Handelt es sich dabei um Dauergrünland, das bereits vor dem 01.01.2015 existierte, haben sie darüber hinaus eine gleich große Ersatzfläche nachzuweisen, auf der neues Dauergrünland etabliert werden muss. Die quantitative Erhaltung des Dauergrünlands wird durch weitere Regelungen einer Reihe von Bundesländern unterstützt. Wie die Flächennutzungsstatistik zeigt, ist der Rückgang der Dauergrünlandfläche inzwischen zum Erliegen gekommen. In der neuen Förderperiode nach 2020 soll die Dauergrünlanderhaltung laut Klimaschutzprogramm im Rahmen der „Konditionalität“ als Umweltauflage aller flächen- und tierbezogenen Maßnahmen der ersten und zweiten Säule der EU-Agrarpolitik in wirksamer Form fortgesetzt werden. Dies wird durch die *gezielte* Förderung extensiven Dauergrünlands im Rahmen der zweiten Säule der GAP unterstützt. BMEL plant weiterhin die Erarbeitung einer Grünlandstrategie, in der konkrete Handlungsfelder zur Erhaltung des Grünlandes und Stärkung einer nachhaltigen Grünlandnutzung benannt werden sollen. Die Vorlage der Strategie ist für Mitte 2021 geplant.
- c) Der **Schutz von Moorböden** wird im Klimaschutzprogramm 2030 Kap. 3.4.7.3 „Schutz von Moorböden einschließlich Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten“ als Maßnahme beschrieben. Dafür sollen bestehende rechtliche und förderrechtliche Rahmenbedingungen angepasst, neuer förderrechtlicher Instrumente geschaffen und Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen intensiviert werden. Alle moorreichen Länder haben bereits 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. Daneben sieht die auf der in Abstimmung befindlichen „Bund-Länderzielvereinbarung zum Moorbodenschutz“ beruhende Moorschutzstrategie (BMU 2020) eine Reduzierung der Emissionen aus organischen Böden um 5 Mio. t CO₂e pro Jahr bis 2030 vor. Die Umsetzung von Moorschutzprojekten wird daher als Maßnahme des MMS 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. Dabei werden neu eingeplante Finanzmittel des Bundes für den Moorbodenschutz berücksichtigt. Weiterhin soll laut Klimaschutzprogramm 2030 im Rahmen der 1. Säule der GAP ein ambitioniert ausgestalteter GLÖZ-Standard (GLÖZ = Standard zum guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand landwirtschaftlicher Flächen) einem angemessenen Schutz von Feuchtgebieten und Torfflächen geschaffen werden. Da die konkrete Ausgestaltung noch unklar ist, werden mögliche Effekte nicht quantifiziert.
- d) Die **Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten** wird im Klimaschutzprogramm 2030 Kap. 3.4.7.3 als Maßnahme festgelegt. Versuchstätigkeit und Forschung zu Ersatzstoffen sollen gestärkt und Beratungsmöglichkeiten für Betriebe, die Information der Öffentlichkeit über Alternativen zu torfhaltigen Blumenerden und Schulungen spezieller Verwendungskreise

etabliert werden. In der Herstellung von Blumenerden ist ein Ersatz der Torfverwendung leichter möglich, im Bereich der Kultursubstrate für den gewerblichen Gartenbau ist eine Reduzierung möglich, für vollständig torffreie Alternativen besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Bis 2026 soll kein Torf im Hobbybereich mehr eingesetzt und 2030 eine Reduzierung von 70 % im Erwerbsgartenbau erreicht werden. Es wird angenommen, dass der Torfabbau in Deutschland bis 2040 ausläuft und die Flächen wiedervernässt werden.

11.2.2 Weitere, nicht quantifizierbare Maßnahmen

- e) Im Klimaschutzprogramm 2030 ist in Kap. 3.4.7.1 die Maßnahme „**Humuserhalt und -aufbau im Ackerland**“ vorgesehen. Neu oder verstärkt gefördert werden sollen Fruchtfolgen für die Humusmehrung, die Erhaltung bereits hoher Humusgehalte, die Anlage von Gehölzen und Agroforstsystemen sowie eine freiwillige Zertifizierung im Rahmen betrieblicher Audits von humusmehrenden Bewirtschaftungsmaßnahmen. Weiterhin sollen Beratungswerkzeuge entwickelt werden. Angaben zur konkreten Ausgestaltung und Umsetzung, die eine Quantifizierung der Wirkungen erlauben, liegen noch nicht vor.
- f) 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 Kohlenstoffspeicher 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.

Die Maßnahmen, welche im KSP 2030 unter dem Oberbegriff „**Erhaltung und nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder und Holzverwendung**“ in Kap. 3.4.7.4 aufgeführt werden und konkret folgende Maßnahmen betreffen, werden im Projektionsbericht nicht einzeln quantifiziert:

- ▶ 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 Belange und der Klimawirksamkeit zielt dies auf
 - Bewältigung der durch Extremwetterereignisse verursachten Folgen im Wald v.a. Wiederbewaldung der Schadflächen
 - Stärkung der naturnahen Waldbewirtschaftung und verstärkte Anpassung der Wälder an den Klimawandel.

Im zweiten Nachtragshaushalt 2020 sind für den Einzelplan 10 in der Titelgruppe 01 für 2020 230 Mio. € vermerkt, davon 170 Mio. für Maßnahmen zum Erhalt und zur nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder. Diese Mittel sollen als Flächenprämie einen Beitrag zum Erhalt der Wälder und der gesellschaftlichen unverzichtbaren Waldfunktionen durch Unterstützung einer über den gesetzlichen Standard hinausgehenden nachhaltigen Bewirtschaftung der privaten und kommunalen Forstbetriebe angesichts der ökonomischen Folgen des Klimawandels und der Corona-Pandemie leisten. Hinzu kommen Verpflichtungsermächtigungen in Höhe von 330 Mio. € (bis 2021). Für die Förderung des klimafreundlichen Bauens mit Holz stehen 30 Mio. € zur Verfügung (+ 70 Mio. VE) und für das Investitionsprogramm Wald und Holz ebenfalls 30 Mio. € (+ 70 Mio.).

- ▶ 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, so wie für die stoffliche Verwendung von Laubholz, der Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung (Charta für Holz 2.0)
 - Förderung von klimabewusstem Verbraucher-Verhalten.

Für diese Bereiche sind die folgenden Mittel beschlossen:

Tabelle 112: Zusätzliche Fördermittel für Maßnahmen zum Erhalt und zur nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder und für klimafreundliche und innovative Holzverwendung

	2020	2021	2022	2023	Summe
	Mio. €				
Betrag	184,7	194,7	196,7	208,7	784,8
davon GAK	167,2	167,2	167,2	167,2	668,8

Quelle: BMEL

Die GAK-Mittel werden verstärkt über eine Kofinanzierung der Länder (40 % der Fördermittel) und erfordern einen Eigenanteil der Waldeigentümer.

11.3 Ergebnisse

11.3.1 Entwicklung von Aktivitätsdaten

Die Tabelle 113 zeigt die historische und projizierte Entwicklung der Aktivitätsdaten. Die Waldfläche nimmt leicht und die Flächen der Feuchtgebiete stark zu, die Acker- und Grünlandflächen nehmen dagegen leicht ab. Die Siedlungsfläche ändert sich nach 2020 nur wenig.

Tabelle 113: Entwicklung der Aktivitätsdaten [1000 ha] des LULUCF-Sektors von 1990 bis 2040

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Wald	10.833	10.938	10.997	11.097	11.169	11.242	11.318
Ackerland	13.593	13.240	12.657	12.561	12.511	12.474	12.459
Grünland	6.804	6.765	6.772	6.734	6.653	6.626	6.602
Feuchtgebiete	649	676	738	788	860	878	897

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Siedlungen	3.844	4.124	4.590	4.577	4.568	4.543	4.490
Sonstiges	68	47	37	33	30	27	24
∑ LULUCF*	35.790	35.790	35.790	35.790	35.790	35.790	35.790

* gesamte Landfläche in Deutschland

Quelle: UBA (2020d), Berechnungen des Thünen-Instituts.

11.3.2 Bewertung der Einzelmaßnahmen

Die in Abschnitt 11.2.1 beschriebenen Maßnahmen für den Bereich Wald und Holznutzung sind vor dem Hintergrund der Multifunktionalität der Waldbewirtschaftung und der in aller Regel nie monokausalen Entscheidungsfindungen in der Waldbewirtschaftung nicht eindeutig zu quantifizieren und werden daher in der Modellierung der Waldentwicklung nicht berücksichtigt. Sie gewährleisten aber den Rahmen dafür, dass sich eine positive Entwicklung überhaupt ergeben kann.

Für die folgenden Maßnahmen im LULUCF-Bereich werden Wirkungen quantifiziert:

1. Flächenneuanspruchnahme unter 30 Hektar pro Tag: Die tägliche Neuanspruchnahme wird bis zum Jahr 2030 auf 29,9 ha gesenkt. Die Minderung findet prozentual anteilig für alle Böden in allen Landnutzungsänderungs-Kategorien statt. Von 2030 an wird der Flächenverbrauch bis 2050 auf null gesenkt.
2. Erhalt von Dauergrünland: Es wird angenommen, dass das Grünlandumwandlungsverbot dazu führt, dass die vorhandene Grünlandfläche konstant bleibt.
3. Moorbodenschutz: Es wird angenommen, dass laufende Moorschutzprogramme der Länder fortgeführt und verstärkt werden und bis 2030 die folgenden flächenbezogenen Maßnahmen umgesetzt werden:
 - a) Vernässung entwässerter Feuchtgebietsflächen und deren Optimierung (auf 73,3 Tausend ha – Tha)
 - b) Wiedervernässung von Torfabbauf Flächen (11,263 Tha)
 - c) Grünlandextensivierung und Wasserstandsanhhebung (224.260 Tha)
 - d) Vollständige Vernässung bisheriger Grünlandflächen (80,6 Tha)
 - e) Umwandlung von Ackerland in Grünland (12,7 Tha)
4. Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten: Es wird angenommen, dass im Zuge dieser Reduzierung der Torfabbau in Deutschland bis 2030 halbiert und bis 2040 auf null reduziert wird. Freiwerdende Abbauf Flächen werden vollständig vernässt.

Die Abschätzung der Wirkung der Einzelmaßnahmen des MMS erfolgt gegenüber einem Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS). Im Rahmen des OMS wird unterstellt, dass die betroffene Einzelmaßnahme nicht existiert und somit keine Wirkung entfalten kann. Um die Wirkungen der Einzelmaßnahmen zu ermitteln, wurden die Maßnahmen des MMS schrittweise in die Berechnungen eingeführt. In den Maßnahmenwirkungen sind Folgeeffekte der Landnutzungsänderungen aufgrund der oben genannten Interaktionen enthalten. Die folgende Tabelle 114 beschreibt die Annahmen des OMS für die untersuchten Einzelmaßnahmen. Tabelle 115 zeigt die Minderungen an Treibhausgasemissionen, die aus der Umsetzung der Einzelmaßnahmen resultieren.

Tabelle 114: Ausgestaltung des Vergleichsszenarios (OMS) zur Quantifizierung der Wirkung der Einzelmaßnahmen in der Quellgruppe LULUCF

Einzelmaßnahme	Ausgestaltung Vergleichsszenario (Ohne-Maßnahme-Szenario)
Flächenneuanspruchnahme unter 30 Hektar pro Tag	Im Vergleichsszenario ohne Begrenzung der Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke steigt die Siedlungsfläche um knapp 80 Hektar pro Tag, entsprechend der Daten der Landnutzungsmatrix für 2015 bis 2020.
Erhalt von Dauergrünland	Ohne Grünlandumwandlungsverbot wird angenommen, dass beginnend mit dem Jahr 2021 Grünlandumbruch in dem Umfang stattfindet, wie durchschnittlich im Zeitraum 2000 bis 2010. Nach Destatis berechnet sich die Abnahme von Grünland in diesem Zeitraum auf 392.950 ha, wodurch sich eine jährliche Abnahme von zusätzlich 39.295 ha ergibt.
Moorbodenschutz	Es werden nach 2018 keine neuen Projekte zum Moorbodenschutz umgesetzt (wegen fehlender Rahmenbedingungen für die Umsetzung, z. B. im Fall eines Ausschlusses vernässter Landwirtschaftsflächen vom Erhalt der GAP-Direktzahlungen oder der Verpflichtung zum Dauergrünlanderhalt ohne Ausnahmen für Moorböden. Dann muss eine Umwandlung von Grünland in Schilf- und Seggenflächen durch Grünland-Neueinsaat an anderer Stelle kompensiert werden).
Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten	Torfverwendung und Torfabbau in Deutschland werden unverändert fortgeschrieben.

Quelle: Thünen-Institut, eigene Darstellung.

Tabelle 115: Minderungswirkungen der Einzelmaßnahmen in der Quellgruppe LULUCF

Einzelmaßnahme	Instrumententyp	2025	2030	2035	2040
kt CO ₂ e					
Flächenneuanspruchnahme unter 30 Hektar pro Tag	O	1.168	2.001	2.911	3.707
Erhalt von Dauergrünland	R, E	638	1.276	1.877	2.415
Moorbodenschutz	E, O	1.353	5.210	5.167	5.071
Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten *	V	909	1.229	1.633	2.036
Summe		4.068	9.716	11.588	13.229

* nur off-site-Wirkungen (Mineralisierung von Torf in Kultursubstraten, die on-site-Wirkungen, d.h. solche durch Vernässung von Abbauflächen, sind in der Maßnahme „Moorbodenschutz“ enthalten).

Quelle: Thünen-Institut, eigene Darstellung.

11.3.3 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Die für diesen Bericht vorhergesagte Entwicklung der Emissionen im LULUCF-Sektor wird wesentlich von der Entwicklung der Senkenleistung des Waldes bestimmt. Die im Projektionsbericht dargestellte Entwicklung der Waldsenke weicht von den in der Klimaberichterstattung gemeldeten Daten ab (s. auch einleitende Bemerkungen zu Kap. 11.1).

Aufgrund der Annahmen zur Waldbewirtschaftung und zur verstärkten Holzentnahme und der daraus resultierenden Veränderung der Kohlenstoffbindung im Wald bei weiterhin hohen Emissionen aus anderen Landnutzungskategorien, insbesondere aus entwässerten und landwirtschaftlich genutzten Moorstandorten, kommt die Projektion zu dem Ergebnis, dass sich der LULUCF-Sektor nach 2020 insgesamt zur Emissionsquelle entwickelt. In Tabelle 116 wird diese projizierte Entwicklung

der jährlichen Emissionen zwischen 1990 und 2040 differenziert nach Teil-Quellgruppen dargestellt, in Tabelle 117 differenziert nach Gasen.

Laut Projektionsbericht entwickelt sich der LULUCF-Bereich im Zeitraum zwischen 2018 und 2025 von einer Senke in eine Quelle für Treibhausgase. Die projizierte Vorratsentwicklung im Wald führt zu einer Abnahme der Senkenleistung des Waldes, da einerseits die alternden Bäume weniger Zuwachs leisten (d.h., die jährliche Bruttosequestrierung nimmt ab) und gleichzeitig für die Verjüngung und Anpassung des Waldes an den Klimawandel verstärkt in die Bestände eingegriffen werden soll. Dies führt zu einem zeitweisen deutlichen Rückgang der Senkenleistung der lebenden Biomasse. Hinzukommen die Emissionen, die mit einer verstärkten Holzentnahme einhergehen, so dass die Gesamtemissionsbilanz des Waldes die Emissionen der anderen Landnutzungen nicht mehr kompensiert.

Die Emissionen aus Acker- und Grünland, Feuchtgebieten und Siedlungsflächen gehen aufgrund der umgesetzten Maßnahmen zurück. Zwischen 2018 und 2030 beträgt der Emissionsrückgang über alle anderen Teil-Quellgruppen außer Wald und Holzprodukte 4,2 Mt CO₂e. Dem steht ein projizierter Rückgang der Senkenwirkung von Wald und Holzprodukten von über 50 Mt CO₂e gegenüber. Derart große Veränderungen bei Wald und Holzprodukten könnten kurz- und mittelfristig nur zu einem Bruchteil durch andere Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Bereich kompensiert werden. Aufgrund der im Modell getroffenen Annahmen ist davon auszugehen, dass der Senkenrückgang des Waldes überschätzt wird. Die Auswirkungen der zurückliegenden drei Jahre und deren deutlich negativer Einfluss auf die Senkenleistung wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 116: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in der Quellgruppe LULUCF zwischen 1990 und 2040 im MMS nach Teil-Quellgruppen in Mt CO₂e

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Wald	-70.943	-41.208	-66.995	-26.638	-15.006	-14.091	-14.459
Ackerland	12.966	14.493	16.591	17.324	16.629	16.091	15.452
Grünland	24.119	20.749	15.952	16.338	14.109	14.573	15.410
Feuchtgebiete	3.577	4.405	4.383	4.210	3.470	3.217	3.008
Siedlungen	2.797	3.252	6.377	5.417	4.850	4.327	3.712
Holzprodukte	-1.330	-15.044	-3.239	209	-1.739	-1.094	-1.251
∑ LULUCF*	-28.813	-13.353	-26.932	16.859	22.312	23.024	21.872

* gesamte Landfläche in Deutschland

Quelle: UBA (2020d) Berechnungen des Thünen-Instituts.

Tabelle 117: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors nach Gasen zwischen 1990 und 2040 im MMS

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mt CO ₂ e							
CO ₂ -Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	-30,5	-15,2	-29,3				
MMS				13,6	17,9	18,6	17,6

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
CH₄-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,9	0,9	1,0				
MMS				1,4	2,6	2,6	2,6
N₂O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	0,8	1,0	1,4				
MMS				1,8	1,8	1,8	1,7
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018	-28,8	-13,4	-26,9				
MMS				16,9	22,3	23,0	21,9
Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018	Aufgrund des Wechsels von negativen zu positiven Werten ist keine Angabe in relativen Werten möglich.						
MMS							
Summe THG-Emissionen	Veränderung ab 2005 in %						
Entwicklung 1990 – 2018	Aufgrund des Wechsels von negativen zu positiven Werten ist keine Angabe in relativen Werten möglich.						
MMS							

Quelle: (Umweltbundesamt (UBA) 2020)

12 Entwicklung Primärenergieverbrauch

12.1 Methodik

Die im Folgenden dargestellten Bilanzen des Primär- und Endenergieverbrauch folgen insgesamt dem Schema der Energiebilanzen. Primäre Datengrundlagen für die historischen Daten sind

- a) das Zentrale System Emissionen (ZSE) beim Umweltbundesamt (UBA) für alle brennstoffförmigen Energieträger
- b) 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.¹⁰³ 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.¹⁰⁴ 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.¹⁰⁵ Zusätzlich ist zu beachten, dass in das nationale Treibhausgasinventar (UBA 2020a, 2020c) aus zeitlichen Restriktionen für das jeweils letzte veröffentlichte Jahr (in diesem Fall also für das Jahr 2018) noch nicht die endgültige Energiebilanz 2018 sondern nur die vorläufige, sogenannte „Schätzbilanz 2018“ 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.¹⁰⁶

In diesem Kontext ist anzumerken, dass hinsichtlich der Entwicklung des Primärenergieverbrauchs eine systematische Verzerrung durch die verschiedenen Konventionen der Energiestatistik zu be-

¹⁰³ Insbesondere der absolute Beitrag biogener Energieträger ist in den ZSE-Daten für manche Jahre deutlich höher als in der Energiebilanz.

¹⁰⁴ So betragen die statistischen Differenzen der Jahre 1990 bis 2018 im Median 22 PJ mit einer Schwankungsbreite zwischen -168 PJ und +115 PJ.

¹⁰⁵ Der modellierte PEV ist im Mittel um 1,2% höher und der EEV im Mittel um 1,9% höher als der jeweils von AGEB veröffentlichte.

¹⁰⁶ 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.

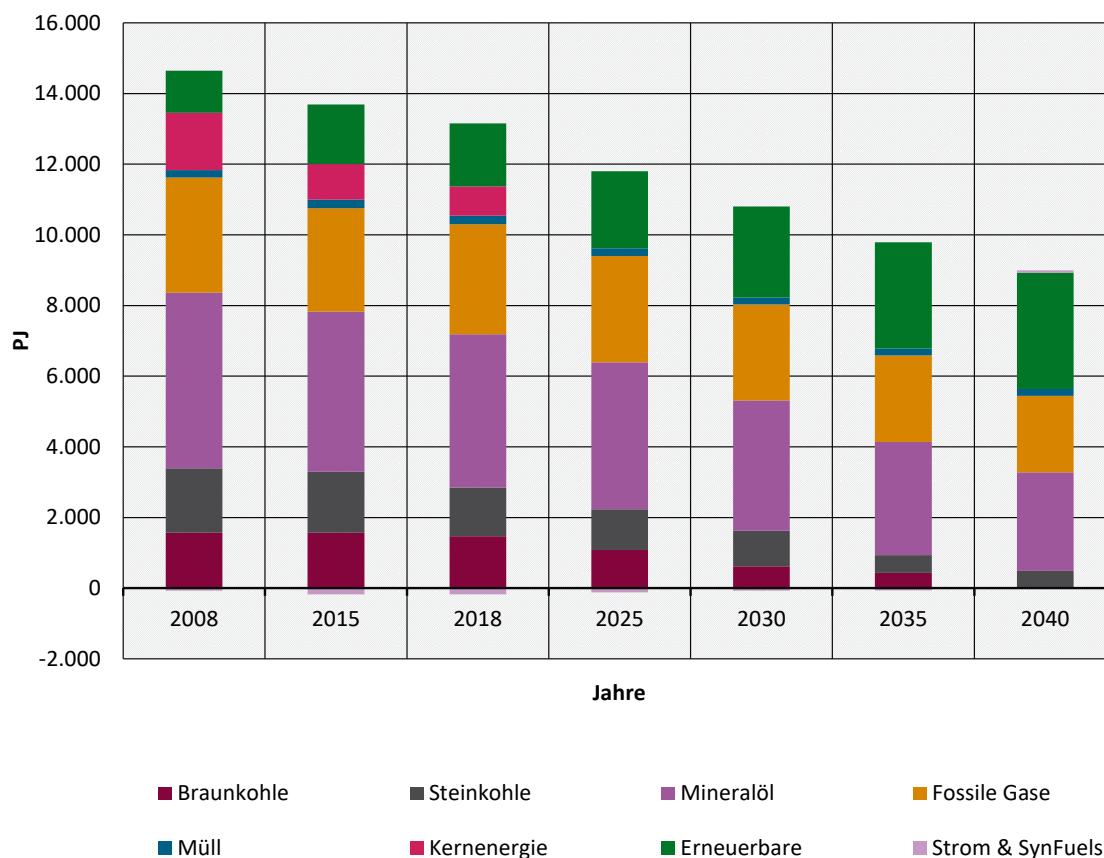
Um eine möglichst umfassende Vergleichbarkeit der Energiedaten zu gewährleisten, wurden für die Ermittlung der Energiebedarfsdaten die nachstehenden Konventionen getroffen: Der Energieverbrauch des internationalen Seeverkehrs wird bei der Primärenergiebetrachtung nicht berücksichtigt. Der Energieverbrauch sowohl des nationalen als auch des internationalen Luftverkehrs wird dagegen bei der Primärenergieermittlung voll berücksichtigt.

rücksichtigen 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.¹⁰⁷ Tendenziell sinkt somit der PEV aufgrund der unterschiedlichen primärenergieseitigen Bewertung der nicht-fossilen Energieträger. In den Primärenergieverbräuchen dieses Berichts ist der nicht-energetische Verbrauch von fossilen Energieträgern enthalten.¹⁰⁸ Entsprechend der Methodik der Energiebilanz werden für die Herstellung von Biokraftstoffen keine Umwandlungsverluste berücksichtigt, der Endenergieverbrauch ist hier also identisch zum Primärenergieverbrauch.

12.2 Ergebnisse

Einen Überblick über die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im MMS bietet Abbildung 45. Detaillierte Ergebnisse können Tabelle 118 entnommen werden.

Abbildung 45: Primärenergieverbrauch im MMS, 2008-2040



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020a, 2020b), Übrige Energieträger: (AG Energiebilanzen (AGEB) 2008-2020a, 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

¹⁰⁷ Auch der Stromaußenhandelsaldo wird primärenergieseitig mit einem Wirkungsgrad von 100% bewertet.

¹⁰⁸ Der nicht-energetische Verbrauch fossiler Energieträger wurde über ein einfaches Modell basierend auf den Produktionsdaten der chemischen Industrie ermittelt, beträgt etwa schwankt im Zeitraum von 2018 bis 2040 zwischen 721 PJ und 790 PJ.

Der gesamte Primärenergieverbrauch sinkt im MMS von 14.579 PJ im Jahr 2008¹⁰⁹ auf 10.791 PJ im Jahr 2030 (-26 %). Mit dieser Entwicklung geht eine Verschiebung der Struktur des Primärenergieverbrauchs einher. Der Primärenergieverbrauch von Mineralöl sinkt bis 2030 um 26 %, dennoch bleibt Mineralöl bis 2030 der wichtigste Primärenergieträger. Der Verbrauch von Braun- und Steinkohle geht von 2008 bis 2030 um 1.714 PJ (-49 %) 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 16 %.

Ein starker Zuwachs ist vor allem bei den erneuerbaren Energieträgern festzustellen, wo sich bis 2030 eine Verdopplung gegenüber dem Niveau von 2008 einstellt. In erster Linie ist dies auf ein deutliches Ansteigen der Windenergie und der Solarenergie zurückzuführen. Damit steigt der Anteil der erneuerbaren Energieträger am gesamten Primärenergieverbrauch von 8 % (2008) bzw. 14 % (2018) auf 24 % im Jahr 2030.

Tabelle 118: Primärenergieverbrauch im MMS, 2008-2040

Energieträger	2008	2015	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ						
Braunkohle	1.566	1.567	1.468	1.080	627	532	20
Steinkohle	1.823	1.727	1.380	1.139	1.048	503	473
Mineralöl	4.974	4.535	4.341	4.151	3.690	3.201	2.785
Fossile Gase	3.260	2.924	3.114	2.907	2.731	2.434	2.230
Abfall (fossil)	207	249	241	214	196	194	192
Kernenergie	1.623	1.001	829	0	0	0	0
Biomasse ^a	927	1.123	1.072	1.172	1.209	1.110	1.040
Windenergie	149	290	396	589	799	1.161	1.411
Wasserkraft	74	68	65	75	76	76	76
Solarenergie	31	168	197	300	434	552	609
Geothermie und Umweltwärme	17	41	61	61	93	145	196

¹⁰⁹ Das Jahr 2008 wurde als Vergleichsjahr gewählt, da das Energiekonzept der Bundesregierung Primärenergieverbrauchsminderungsziele gegenüber diesem Jahr formuliert hat (20 % bis 2020 und 50 % bis 2050).

Energieträger	2008	2015	2018	2025	2030	2035	2040
Stromhandelsaldo	-72	-174	-175	-61	-143	-168	-74
Strombasierte Brenn- und Kraftstoffe	0	0	0	0	31	62	62
PEV gesamt^b	14.579	13.519	12.989	11.627	10.791	9.802	9.021
<i>Änderung ggü. 2008</i>	0,0 %	-7,3 %	-10,9 %	-20,2%	-26,0%	-32,8%	-38,1%
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	8,2 %	12,5 %	13,8 %	18,9 %	24,2 %	31,1 %	36,9 %

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020a, 2020c), Übrige Energieträger: (AG Energiebilanzen (AGEB) 2008-2020a, 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Anmerkungen: ^a einschließlich organischer Anteile des Abfalls. ^b ohne Brennstoffeinsatz des internationalen Seeverkehrs (Hochseebunkerungen).

13 Entwicklung Endenergieverbrauch

13.1 Methodik

Die generelle Methodik zur Berechnung des Primär- und Endenergieverbrauchs wurde bereits in Abschnitt 12.1 beschrieben. Darüber hinaus ergeben sich beim Endenergieverbrauch die folgenden Besonderheiten.

Energiebilanz und Nationales Treibhausgasinventar verwenden unterschiedliche Abgrenzungen der einzelnen Sektoren. Die folgende Tabelle 119 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.¹¹⁰ Zum Vergleich sind auch die KSG-Sektoren aufgeführt.

Tabelle 119: Vergleich der Zuordnung der CRF-Sektoren 1.A.2 bis 1.A.5 und 1.D.1, der Endenergiesektoren in der Energiebilanzstruktur und der KSG-Sektoren

Beschreibung	CRF-Sektor	Endenergiesektor	KSG-Sektor	Kommentar
Brennstoffeinsatz Stromerzeugung in industriellen Kraft- werken	1.A.2		Industrie	In der Energiebilanz dem Umwandlungs- sektor zugeordnet
Brennstoffeinsatz Wärmeerzeugung in industriellen Kraft- werken	1.A.2	Industrie	Industrie	
Bauwirtschaftlicher Sonderverkehr	1.A.2	GHD	Industrie	
Inländischer Flugver- kehr	1.A.3.a	Verkehr	Verkehr	
Straßenverkehr	1.A.3.b	Verkehr	Verkehr	
Schienenverkehr	1.A.3.c	Verkehr	Verkehr	
Küsten- und Binnen- schifffahrt	1.A.3.d	Verkehr	Verkehr	
Erdgasverdichtersta- tionen	1.A.3.e		Energiewirtschaft	In der Energiebilanz dem Umwandlungs- sektor zugeordnet
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	1.A.4.a	GHD	Gebäude	
Private Haushalte	1.A.4.b	Haushalte	Gebäude	
Landwirtschaft	1.A.4.c	GHD	Landwirtschaft	
Militär	1.A.5.a	GHD	Gebäude	

¹¹⁰ Der so im Modell ermittelte gesamte Endenergieverbrauch liegt für die historischen Jahre 1990 bis 2018 im Mittel etwa 1% höher, wobei die Abweichung mit 2,5 % im Jahr 1990 am höchsten und mit 0,9 % im Jahr 2017 am geringsten ist.

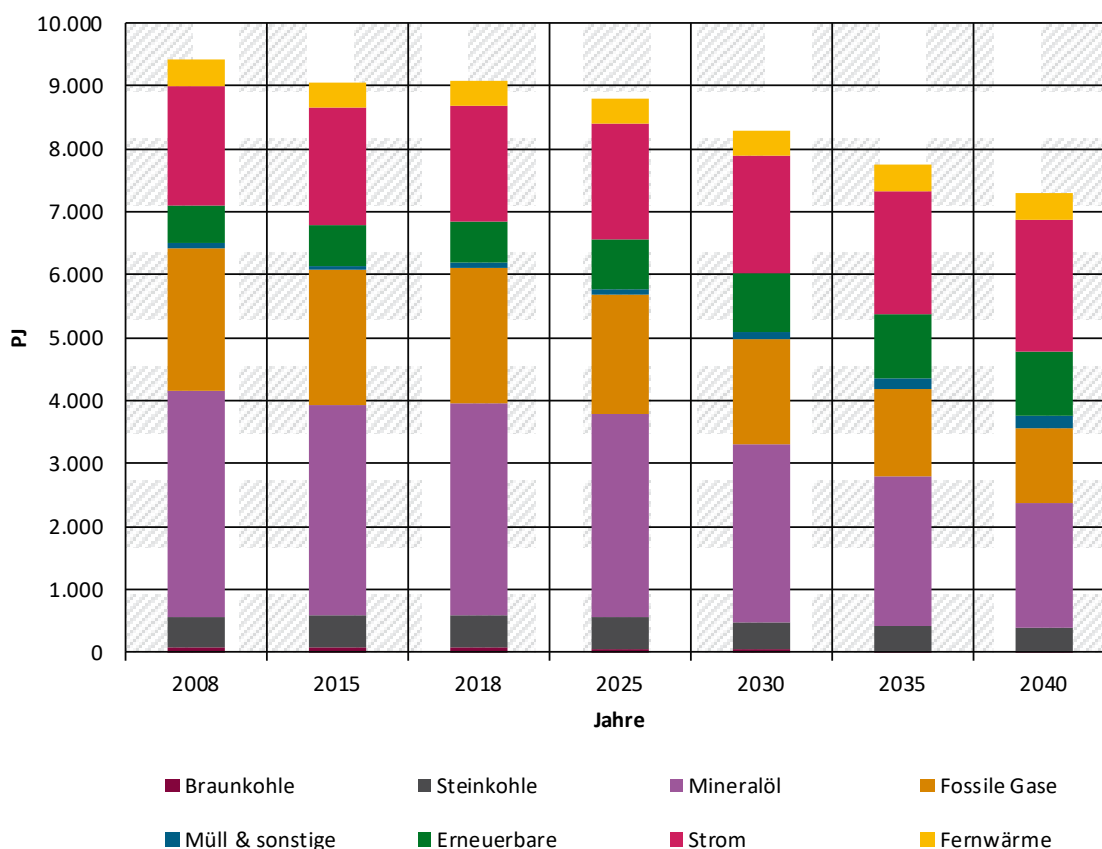
Beschreibung	CRF-Sektor	Endenergiesektor	KSG-Sektor	Kommentar
Internationaler Luftverkehr	1.D.1.a	Verkehr	–	
Internationale Schifffahrt	1.D.1.b		–	In der Energiebilanz im Energieaufkommen aber weder im Primär- noch im Endenergieverbrauch enthalten

Quelle: Darstellung Öko-Institut

13.2 Ergebnisse

Einen Überblick über die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im MMS bietet Abbildung 46.

Abbildung 46: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS, 2008-2040



Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020a, 2020c), Übrige Energieträger: (AG Energiebilanzen (AGEB) 2008-2020a, 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Der gesamte Endenergieverbrauch im MMS ist rückläufig. Er sinkt von 9.076 PJ im Jahr 2018 auf 8.278 PJ im Jahr 2030, was einem Rückgang von rund 9 % entspricht.

Der stärkste absolute Rückgang des Endenergieverbrauchs bis 2030 ist bei der Industrie zu verzeichnen (-268 PJ bzw. -9 %). Haushalte (-9 %) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (-10 %) verzeichnen ähnliche prozentuale Rückgänge. Im Verkehr wird zwischen 2018 und 2030 ein Rückgang von lediglich 7 % erzielt.

Tabelle 120: Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im MMS, 2018-2040

Sektor	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Industrie	2.768	2.618	2.500	2.426	2.399
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	1.332	1.280	1.193	1.103	1.022
Haushalte	2.260	2.197	2.062	1.901	1.732
Verkehr	2.716	2.696	2.522	2.314	2.140
Endenergieverbrauch gesamt	9.076	8.790	8.278	7.743	7.293
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,2 %</i>	<i>-8,8 %</i>	<i>-14,7 %</i>	<i>-19,7 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020a, 2020c), Übrige Energieträger: (AG Energiebilanzen (AGEB) 2008-2020a, 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Wie beim Primärenergieverbrauch entwickeln sich die einzelnen Energieträgergruppen unterschiedlich (Tabelle 121) Der Verbrauch von Braunkohlen nimmt von 2018 bis 2030 um etwa 53 % ab. Der Einsatz von Steinkohlen geht bis 2030 lediglich um 8 % gegenüber 2018 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 22 % gegenüber 2018 zurück.

Der Beitrag der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch nimmt im Referenzszenario deutlich zu (+44 % im Jahr 2030), wobei dieser Anstieg sowohl auf Biomasse als auch auf Solarenergie sowie Geothermie und Umweltwärme entfällt. Der Endenergieverbrauch an Strom bleibt bis 2030 annähernd konstant und steigt anschließend aufgrund neuer Verbraucher, wie z. B. Elektrofahrzeuge bis 2040 leicht an.

Tabelle 121: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS, 2018-2040

Energieträger	2018	2025	2030	2035	2040
	PJ				
Braunkohle	87	59	41	30	20
Steinkohle	492	488	449	403	377
Mineralöl	3.388	3.232	2.815	2.366	1.975
Fossile Gase	2.137	1.920	1.661	1.382	1.203
Abfall	67	58	52	47	42
Sonstige	13	0	0	0	0
Biomasse ^a	566	711	774	769	711
Solarenergie	32	60	98	146	174
Geothermie und Umwelt-	52	40	63	105	150

Energieträger	2018	2025	2030	2035	2040
Strom	1.848	1.831	1.864	1.966	2.092
Fernwärme	394	380	392	410	409
Strombasierte Brenn- und	0	8	68	119	138
Endenergieverbrauch ge-	9.076	8.790	8.278	7.743	7.293
<i>Änderung ggü. 2018</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-3,2 %</i>	<i>-8,8 %</i>	<i>-14,7 %</i>	<i>-19,7 %</i>

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2020a, 2020c), Übrige Energieträger: : (AG Energiebilanzen (AGEB) 2008-2020a, 2008-2020b), Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

Anmerkungen: ^a Einschließlich organischer Anteile des Abfalls.

13.3 Exkurs zu strombasierten Energieträgern und der Nationalen Wasserstoffstrategie

Im Juni 2020 verabschiedete die Bundesregierung die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020). Die NWS sieht für das Jahr 2030 eine Wasserstoffnachfrage in Höhe von 90 bis 110 TWh (dies entspricht etwa 320 bis 400 PJ). Um diese Nachfrage teilweise durch grünen Wasserstoff aus nationaler Produktion zu decken, sieht die NWS für das Jahr 2030 den Aufbau von Elektrolyseuren mit einer Leistung von 5 GW in Deutschland vor. Diese sollen im Jahr 2030 in 4.000 Vollaststunden (VLh) 14 TWh (etwa 50 PJ) Wasserstoff bereitstellen. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 70 % werden hierfür 20 TWh an Strom benötigt. Einen weiteren Ausbau der Elektrolyseleistung von 5 GW sieht die NWS bis zum Jahr 2035, spätestens bis zum Jahr 2040, vor.

Im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) wurde für 2030 eine Nachfrage der Industrie nach Elektrolysewasserstoff von 29 PJ ermittelt, der bis 2040 auf 67 PJ ansteigt (siehe Tabelle 122). Die Wasserstoffnachfrage des Verkehrs bleibt marginal. Im inländischen Verkehr gibt es im MMS im Jahr 2030 eine Nachfrage nach strombasierten Flüssigkraftstoffen in Höhe von 30 PJ, der bis 2040 auf 59 PJ ansteigt. Aus dem internationalen Flugverkehr ergibt sich eine Nachfrage von 9 PJ im Jahr 2030 und 10 PJ im Jahr 2040 an strombasierten Flugkraftstoffen. Zusätzlich kommt nach 2030 eine kleine Nachfrage nach strombasierten Flüssigkraftstoffen durch die Landwirtschaft hinzu. In Summe ergibt sich für das Jahr 2030 eine Nachfrage von 68 PJ an strombasierten Energieträgern (Wasserstoff plus Flüssigkraftstoffe), was höher als die in der NWS angegebene Wasserstoffnachfrage ist. Zwischen 2030 und 2040 steigt die Nachfrage nach strombasierte Energieträgern auf mehr als das Doppelte.

Die Nachfrage nach Wasserstoff wird im MMS komplett durch inländische Produktion gedeckt, hierzu werden 11 TWh Strom im Jahr 2030 und 27 TWh im Jahr 2040 benötigt. Bei den strombasierten Flüssigkraftstoffen wurde angenommen, dass ein kleiner Teil der Nachfrage durch inländische PtL-Pilotanlagen gedeckt wird, der Großteil hingegen durch Importe. Daher steigt der Stromverbrauch der PtL-Anlagen nach 2030 auch kaum an. Insgesamt werden somit 16 TWh Strom im Jahr 2030 und 32 TWh Strom im Jahr 2040 zur Herstellung von strombasierten Energieträgern benötigt.

Die Gesamt-Elektrolyseleistung wurde in Anlehnung an die NWS mit 5 GW im Jahr 2030 und 10 GW im Jahr 2040 festgelegt. Dabei dient jeweils der größere Teil der Elektrolyseure der Deckung der direkten Wasserstoffnachfrage. In der Modellierung wurde die gleiche Effizienz der Elektrolyseure wie in der NWS (70 %) unterstellt. Als Wirkungsgrad für die Herstellung strombasierter Flüssigkraftstoffe wurde ein Wirkungsgrad von 50 % angenommen.

Tabelle 122: Nachfrage nach und Bereitstellung von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen im MMS

Größe	Einheit	2025	2030	2035	2040
Wasserstoff					
Nachfrage Industrie	PJ (TWh)	8 (2)	29 (8)	48 (13)	67 (19)
Nachfrage Verkehr	PJ (TWh)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	8 (2)	29 (8)	48 (13)	67 (19)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	8 (2)	29 (8)	49 (14)	67 (19)
Inländischer Stromverbrauch Elektrolyse	PJ (TWh)	11 (3)	41 (11)	69 (19)	96 (27)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	2,9	3,5	6,0	8,4
Strombasierte Flüssigkraftstoffe					
Nachfrage nationaler Verkehr	PJ (TWh)	0 (0)	30 (8)	59 (17)	59 (16)
Nachfrage internationaler Flugverkehr	PJ (TWh)	0 (0)	9 (3)	10 (3)	10 (3)
Nachfrage Landwirtschaft	PJ (TWh)	0 (0)	0 (0)	1 (0)	3 (1)
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	0 (0)	39 (11)	70 (11)	71 (20)
Inländische Produktion	PJ (TWh)	0 (0)	8 (2)	8 (2)	9 (2)
Inländischer Stromverbrauch PtL-Herstellung	PJ (TWh)	0 (0)	16 (4)	16 (4)	17 (5)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	0,0	1,5	1,5	1,6
Summe					
Summe Nachfrage	PJ (TWh)	8 (2)	68 (19)	119 (33)	138 (38)

Größe	Einheit	2025	2030	2035	2040
Inländische Produktion	PJ (TWh)	8 (2)	37 (10)	57 (16)	76 (21)
Inländischer Stromverbrauch Herstellung	PJ (TWh)	11 (3)	57 (16)	85 (24)	113 (32)
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	2,9	5,0	7,5	10,0

Anmerkung: Rundungsbedingte Abweichungen der Summenwerte möglich

Quelle: Berechnungen Öko-Institut und Fraunhofer-ISI

14 Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen

14.1 Emissionen aus Verbrennungsprozessen

Die summarische Entwicklung der CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen aus Verbrennungsprozessen für das MMS ist in Tabelle 123 zusammengestellt, einschließlich der Emissionen des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs¹¹¹ und der Emissionen aus der Rauchgasentschwefelung.

Über den gesamten Zeitraum bis 2040 werden gegenüber 1990 Treibhausgasemissionsminderungen von rund 67 % erzielt, dies entspricht -60 % gegenüber 2005. Dabei sind CH₄- und N₂O-Emissionen aus Verbrennungsprozessen von untergeordneter Bedeutung, das dominierende Treibhausgas ist verbrennungsbedingtes CO₂. Im Jahr 2030 beträgt die Treibhausgasminderung, bezogen auf 1990, rund 46 % (-466 Mio. t CO₂-Äq).

Tabelle 123: Entwicklung der gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen nach Gasen, 1990-2040

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq							
CO ₂ -Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	1.004,1	839,0	736,4				
MMS				646,2	544,0	430,6	329,3
CH ₄ -Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	6,7	2,2	4,2				
MMS				3,8	3,7	3,6	3,5
N ₂ O-Emissionen							
Entwicklung 1990 – 2018	7,3	5,3	5,8				
MMS				5,1	4,3	3,6	2,7
Summe CO₂+CH₄+N₂O							
Entwicklung 1990 – 2018	1.018,0	846,5	746,4				
MMS				655,2	552,1	437,8	335,6
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 1990 in %						
Entwicklung 1990 – 2018		-16,9	-26,7				

¹¹¹ Beim internationalen Flugverkehr werden entsprechend der Methodik im Nationalen Treibhausgasinventar alle abgehenden Flüge berücksichtigt, bei der Hochseeschifffahrt alle Treibstoffbunkerungen in deutschen Häfen.

	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
MMS				-33,6	-45,8	-57,0	-67,0
Summe CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O	Veränderung ab 2005 in %						
Entwicklung 1990 – 2018			-11,8				
MMS				-22,6	-34,8	-48,3	-60,4

Anmerkung: nur energiebedingte Emissionen in der Abgrenzung des NIR; mit CO₂-Emissionen aus der Rauchgasentschwefelung sowie mit internationalem Flugverkehr und Hochseeschifffahrt

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

Die Entwicklung der Emissionen unterscheidet sich zwischen den einzelnen Brennstoffen, wie Tabelle 124 zeigt. Zwei Gruppen sind erkennbar: Die Emissionen aus Mineralöl und Kohle gehen von 2018 bis 2040 sukzessive zurück (-42 % beim Mineralöl; -99 % Braunkohle; -69 % Steinkohle). Die Emissionen aus Stein- und Braunkohle nehmen hauptsächlich aufgrund des verringerten Einsatzes in den Kraftwerken der Energiewirtschaft ab, der Einsatz von Mineralöl geht u. a. durch die Abkehr von Ölheizungen bei den privaten Haushalten zurück. Bei den fossilen Gasen liegen die Emissionen bis 2035 über dem Niveau des Jahres 1990 (durch das größere Gewicht von vergleichsweise emissionsarmem Erdgas als Energieträger) und liegen erst 2040 darunter. Die Emissionen aus Abfall und Biomasse zeigen einen leicht abnehmenden Trend zwischen 2018 und 2040.

Insgesamt bleibt die Verbrennung von Mineralöl über den gesamten Zeitraum die größte Emissionsquelle, während Erdgas seit 2018 den zweitgrößten Anteil der Emissionen verursacht. Die Emissionen aus der Rauchgasentschwefelung gehen durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung zwischen 2020 und 2040 stark zurück.

Tabelle 124: Entwicklung der gesamten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen (inklusive internationalem Verkehr) nach Brennstoffen, 1990–2040

Brennstoff	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂ -Äq						
Braunkohle	346,5	178,2	160,6	118,1	68,3	57,9	1,4
Steinkohle	203,7	165,7	116,8	96,6	88,9	38,3	35,8
Mineralöl	336,5	311,6	276,6	262,5	228,4	192,0	160,5
Fossile Gase	122,5	175,2	168,2	156,6	147,0	130,4	119,1
Abfall	7,7	13,4	19,8	17,6	16,1	16,0	15,9
Biomasse ^a	0,5	1,2	3,4	3,1	2,9	2,9	2,8
Brennstoffe gesamt	1.017,4	845,3	745,5	654,5	551,6	437,6	335,6
Rauchgas- entschwe- felung (REA)	0,6	1,1	0,9	0,7	0,4	0,3	0,0

Brennstoff	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Gesamt inklusive REA	1.018,0	846,5	746,4	655,2	552,1	437,8	3335,6
ggü. 2005	20,3 %	0,0 %	-11,8 %	-22,6 %	-34,8 %	-48,3 %	-60,4 %
ggü. 1990	0,0 %	-16,9 %	-26,7 %	-35,6 %	-45,8 %	-57,0 %	-67,0 %
Nachrichtlich							
CO ₂ aus Biomasseverfeuerung	22,1	57,3	100,8	110,2	113,5	104,5	98,0
CO ₂ in CCS	0,0	0,0	0,0	0,3	0,7	1,2	1,7

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

Anmerkung: ^a Bezieht sich auf die CH₄ und N₂O-Emissionen, also ohne CO₂ aus Biomasseverfeuerung

14.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Treibhausgasen

Im Folgenden werden die Entwicklungen der Treibhausgasemissionen des MMS ohne Berücksichtigung der Emissionsbeiträge der Hochseeschifffahrt und des internationalen Flugverkehrs sowie der Freisetzung oder Bindung von Treibhausgasen im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF = Land Use, Land-Use Change and Forestry) dargestellt. In der Regel werden Emissionen aus internationalem Treibstoffbunkerungen (Hochseeschifffahrt und internationaler Flugverkehr) sowie aus LULUCF nicht auf die Erreichung nationaler Klimaschutzziele in Deutschland angerechnet; dieser Konvention wird auch in diesem Bericht gefolgt.

In Tabelle 125 ist die Entwicklung der Emissionen von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW), perfluorierten Kohlenwasserstoffen (FKW) sowie Schwefelhexafluorid (SF₆) und Stickstofftrifluorid (NF₃) zusammengestellt.

Tabelle 125: Entwicklung der gesamten Emissionen nach Treibhausgasen, 1990-2040

Treibhausgas	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂ -Äq						
Kohlendioxid (CO ₂) ^a	1.052,3	866,4	755,3	660,3	554,7	438,2	334,7
Methan (CH ₄)	121,2	69,4	52,6	46,3	42,4	41,2	40,5
Lachgas (N ₂ O)	62,5	43,3	35,5	34,2	31,1	30,2	29,3
Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW)	0,1	9,0	10,5	7,4	3,5	3,4	3,2
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW)	3,1	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	4,4	3,3	3,9	2,3	0,7	0,5	0,5

Treibhausgas	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
Nicht spezifizierter Mix (HFKW/FKW)	5,8	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Stickstofftrifluorid (NF ₃)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt	1.249,5	993,2	858,3	750,9	632,9	514,0	408,7
<i>ggü. 2005</i>	<i>25,8 %</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-13,6 %</i>	<i>-24,4 %</i>	<i>-36,3 %</i>	<i>-48,2 %</i>	<i>-58,8 %</i>
<i>ggü. 1990</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-20,5 %</i>	<i>-31,3 %</i>	<i>-39,9 %</i>	<i>-49,3 %</i>	<i>-58,9 %</i>	<i>-67,3 %</i>
Nachrichtlich:							
CO ₂ aus Biomasseverfeuerung	21,1	56,6	97,5	110,2	113,5	104,5	98,0
CO ₂ in CCS	0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,7

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

Anmerkung: ^a Ohne CO₂ aus Biomasseverfeuerung.

Ohne Freisetzung/Bindung aus LULUCF und ohne Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr.

Bis zum Jahr 2018 wurden in der nationalen Bilanz die Treibhausgasemissionen bereits um rund 31 % gegenüber dem Jahr 1990 und 14 % gegenüber 2005 reduziert. Im Vergleich zum Referenzjahr 1990 sinken die gesamten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um rund 49 % (rund -36 % gegenüber 2005) und bis zum Jahr 2040 um 67 % (-59 % gegenüber 2005). Das Reduktionsziel der Bundesregierung bis 2030 wird also im MMS nicht erreicht.

Zwischen 1990 und 2018 wurden die jährlichen Emissionen von Kohlendioxid¹¹² um rund 28 % reduziert. Im Jahr 2040 werden die CO₂-Emissionen etwa 68 % niedriger liegen als 1990. Historisch und auch in der Projektion ist CO₂ das Gas mit dem größten Anteil an den gesamten deutschen Treibhausgasemissionen. 1990 hatte es einen Anteil von rund 84 %, 2018 sogar von 88 %. Bis 2040 wird dieser Anteil auf ca. 82 % zurückgehen. Die nicht in die Summe eingehenden und daher nur nachrichtlich ausgewiesenen CO₂-Emissionen aus der Verfeuerung von Biomasse vervielfachten sich zwischen 1990 und 2018 und werden ein Maximum etwa 2030 erreichen, um anschließend leicht zurückzugehen.

Bei Methan sind die größten Emissionsminderungen bereits in der Vergangenheit zu verzeichnen: CH₄ war 1990 nach CO₂ das bedeutendste Treibhausgas und hatte einen Anteil von fast 10 % an den Gesamtemissionen. Da aber die CH₄-Emissionen bis zum Jahr 2018 um 57 % und somit überdurchschnittlich reduziert werden konnten, sank der Anteil auf nur noch rund 6 %. Bis zum Jahr 2040 sinken die CH₄-Emissionen um ca. 67 % gegenüber 1990. Da aber hier die Emissionsminderungen insbesondere nach 2020 unterproportional sind, steigt der Anteil an den Gesamtemissionen bis 2040 wieder auf knapp 10 %.

Lachgas hatte 1990 einen Anteil von 5 % an den gesamten Treibhausgasemissionen. Auch hier konnten bis zum Jahr 2018 die Emissionen bereits um etwa 43 % reduziert werden, sodass der Anteil an den Gesamtemissionen auf 4 % sank. Wie auch beim Methan sind beim Lachgas nur geringe weitere

¹¹² Nicht berücksichtigt sind hier – wie auch in den übrigen CO₂-Emissionen dieses Berichts – die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse.

Emissionsreduktionen zu verzeichnen. 2040 werden die N₂O-Emissionen um rund 53 % geringer sein als 1990. Ihr Anteil an den Gesamtemissionen steigt auf rund 7 % im Jahr 2040.

Die fluorierten Treibhausgasemissionen hatten im Jahr 1990 einen Anteil von 1,1 % an den Gesamtemissionen, der bis zum Jahr 2018 auf 1,7 % anstieg. Bis zum Jahr 2040 wird der Anteil der fluorierten Treibhausgase auf 1,0 % absinken.¹¹³

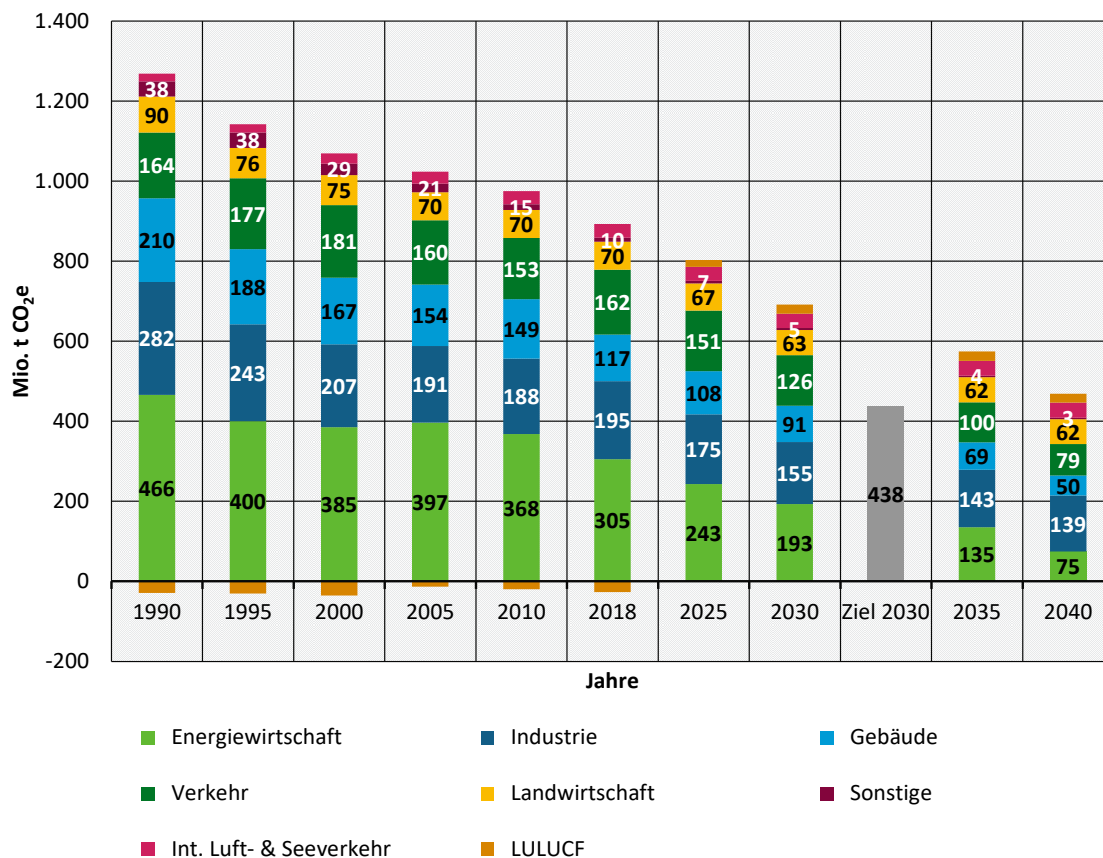
Kumuliert werden im Projektionszeitraum (2021 bis 2040) 12,4 Gt (Gigatonnen) CO₂-Äq emittiert, davon entfallen auf fossiles Kohlendioxid 10,8 Gt CO₂-Äq, auf Methan 0,9 Gt CO₂-Äq, auf Lachgas 0,6 Gt CO₂-Äq und auf die fluorierten Treibhausgase 0,1 Gt CO₂-Äq. Weitere 2,1 Gt CO₂ stammen aus der Biomasseverfeuerung.

14.3 Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren

Eine nach KSG-Sektoren strukturierte Übersicht über die Emissionsentwicklung im MMS bieten Abbildung 47 sowie Tabelle 126. In der nationalen Betrachtung ohne internationalen Luft- und Seeverkehr und ohne LULUCF werden bis zum Jahr 2030 die Emissionen um rund 49 % gegenüber 1990 (-36 % gegenüber 2005) und bis zum Jahr 2040 um etwa 67 % gegenüber 1990 (-59 % gegenüber 2005) sinken.

¹¹³ Innerhalb der fluorierten Treibhausgase ist die Gruppe der teilfluorierten Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) im Jahr 2018 die bedeutendste. 1990 waren HFKW noch kaum in Verwendung, und bis 2040 werden sich die Emissionen um rund 69 % gegenüber 2018 reduzieren. Die Emissionen von perfluorierten Kohlenwasserstoffen (FKW) wurden bis 2018 bereits um 91 % gegenüber 1990 reduziert; zukünftig sind hier nur noch geringe Emissionsminderungen zu erwarten. Die Emissionen von Schwefelhexafluorid (SF₆) wurden bis 2018 um rund 13 % gegenüber 1990 reduziert und bis 2040 wird ein Rückgang um 89 % gegenüber 1990 erwartet. Der nicht spezifizierte Mix aus HFKW und FKW wurde bis 2018 bereits um 97 % gegenüber 1990 reduziert und wird etwa auf diesem Niveau verbleiben. Die Emissionen von Stickstofftrifluorid (NF₃) liegen in allen Jahren unter 0,05 Mt CO₂-Äq. Im Jahr 2018 wurden 120 kt CO₂-Äq emittiert; dieses Emissionsniveau wird bis 2040 in etwa beibehalten.

Abbildung 47: Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren (1990–2040)



Quelle: (UBA 2020a, 2020c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

Tabelle 126: Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren, 2020-2040

Sektor	2018	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
Mio. t CO ₂ -Äq														
Energiewirtschaft*	305,1	220,5 (-59,5)	276,9	271,7 (+14,7)	263,8	256,2	242,8	242,3	238,4	228,5	213,8	193,2 (+85,2)	135,4	74,9
Industrie*	194,9	178,1 (-7,9)	172,2 (-9,8)	174,6 (-2,4)	175,7 (+3,7)	176,0 (+11,0)	174,8 (+17,8)	170,4 (+21,4)	166,2 (+26,2)	162,2 (+30,2)	158,4 (+33,4)	154,6 (+36,6)	143,2	139,4
Gebäude*	116,6	120,0 (+2,0)	115,9 (+2,9)	114,3 (+6,3)	112,4 (+10,4)	110,3 (+13,3)	107,9 (+15,9)	105,1 (+18,1)	102,0 (+20,0)	98,6 (+21,6)	94,9 (+22,9)	90,9 (+23,9)	69,0	50,2
Verkehr*	162,3	145,6 (-4,4)	152,2 (+7,2)	158,8 (+19,8)	157,0 (+23,0)	154,4 (+26,4)	151,4 (+28,4)	147,2 (+30,2)	143,2 (+31,2)	138,0 (+33,0)	134,0 (+38,0)	126,4 (+41,4)	100,1	78,7
Landwirtschaft*	69,8	66,4 (-2,8)	67,2 (-0,8)	67,2 (+0,2)	67,3 (+1,3)	67,3 (+2,3)	67,3 (+4,3)	66,4 (+4,4)	65,5 (+4,5)	64,6 (+5,6)	63,7 (+6,7)	62,8 (+6,8)	62,4	62,0

Sektor	2018	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2035	2040
Abfallwirtschaft und Sonstiges*	9,7	8,9 (-0,1)	8,2 (-0,8)	7,9 (-0,1)	7,5 (-0,5)	7,1 (+0,1)	6,7 (-0,3)	6,4 (+0,4)	6,0 (0,0)	5,7 (+0,7)	5,4 (+0,4)	5,0 (+1,0)	4,0	3,4
Ge-samt*	858,3	739,5 (-73,5)	792,5	794,6 (+38,6)	783,6	771,2	750,9	737,7	721,4	697,6	670,0	632,9 (+194,9)	514,0	408,7
Jahres-emissions-menge Bundes-Klimaschutz-gesetz 2021		813,0		756,0								438,0		
Nachrichtlich:														
LULUCF	-26,9						16,9					22,3	23,0	21,9
Internationaler Luft- und Seeverkehr	34,7						35,1					36,0	37,1	38,0

Quelle für die Jahre 2021-2040: Modellrechnungen Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

Anmerkung: Die Werte für das Jahr 2020 wurden der Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2021) entnommen.

*Die Abweichung von der Jahresemissionsmenge gemäß Klimaschutzgesetz 2021 ist in Klammern angegeben. Negativer Wert: Sektorziel wird übererfüllt. Positiver Wert: Sektorziel wird verfehlt.

Anmerkung: Die Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen sind in Anhang A.2 zu finden.

Die Energiewirtschaft hat den größten Anteil an den von 2018 bis zum Jahr 2040 erzielten Emissionsminderungen. Die Emissionen sinken hier gegenüber 2018 absolut um 112 Mio. t CO₂-Äq bis 2030 und um 230 Mio. t CO₂-Äq bis 2040. Im Jahr 2030 entspricht das einer Minderung von 37 % gegenüber 2018 (-59 % ggü. 1990) und im Jahr 2040 einer Minderung von 75 % (-84 % ggü. 1990). Diese Abnahme ist in erster Linie auf den Rückgang der Kohleverstromung im Rahmen des Kohleverstromungsbeendigungsgesetzes zurückzuführen. Weitere Treiber sind die CO₂-Bepreisung durch den EU-Emissionshandel und die Zunahme der Erneuerbaren Energien durch die Förderung im Rahmen des EEG.

Die Emissionen aus dem Sektor Industrie werden gegenüber dem Jahr 2018 bis 2030 um 40 Mio. t CO₂-Äq bzw. 21 % (-45 % ggü. 1990) und bis 2040 um 55 Mio. t CO₂-Äq bzw. 28 % (-50 % ggü. 1990) reduziert. Die Abnahme der energiebedingten Emissionen kann auf Maßnahmen wie den Emissionshandel, Programme zur Markteinführung von CO₂-armen Verfahren sowie Effizienzmaßnahmen zurückgeführt werden. Gleichzeitig trägt auch eine leichte Strukturverschiebung der Industrie hin zu höheren Anteilen von Sekundärproduktion bei. Eine Reduktion der Prozessemissionen findet vor allem bei der Stahlerzeugung und bei den F-Gasen statt, bei Letzteren aufgrund der F-Gas-Regulierungen auf EU-Ebene.

Die Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors sinken bis 2030 um rund 26 Mio. t CO₂-Äq bzw. 22 % gegenüber 2018 (-57 % ggü. 1990) und um 55 Mio. t CO₂-Äq bzw. 57 % bis zum Jahr 2040 (-76 % ggü. 1990). Diese Emissionsreduktion kommt einerseits durch den abnehmenden Wärmebedarf durch Sanierungsmaßnahmen, und andererseits durch den geringer werdenden Marktanteil von Heizölkesseln zustande.

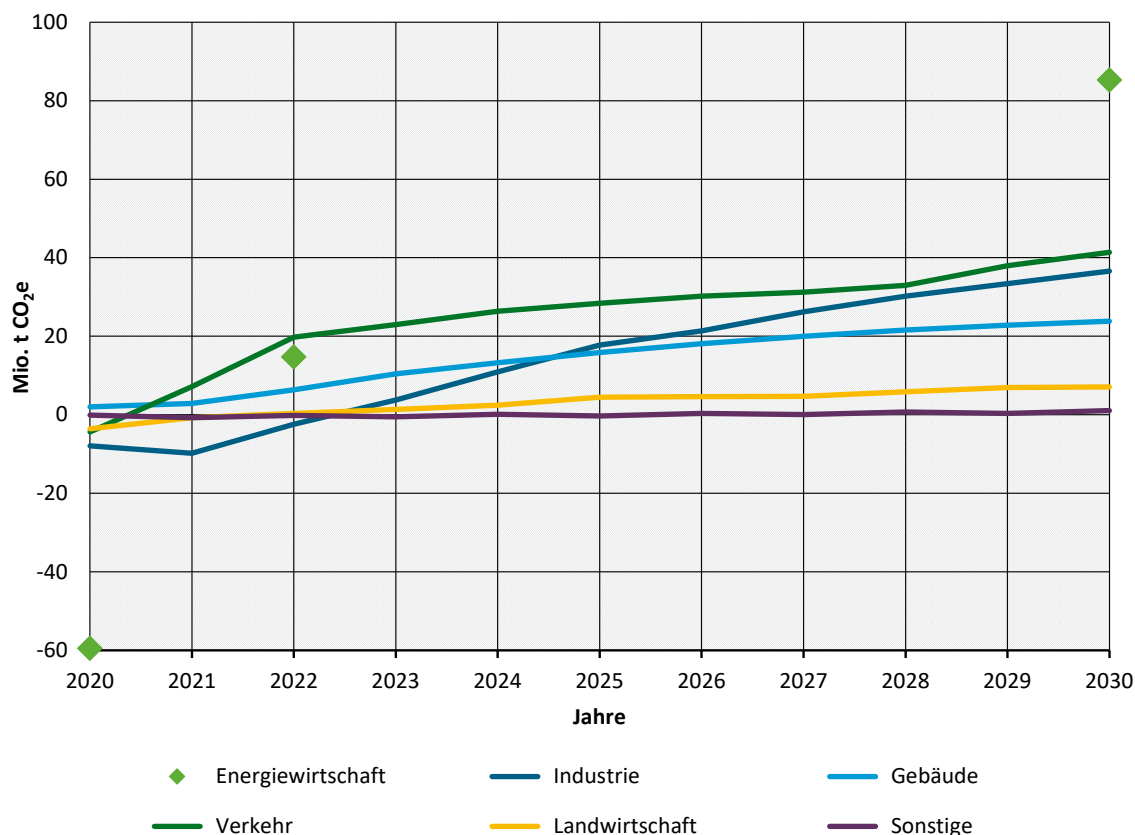
Den zweitgrößten Beitrag zur projizierten Emissionsreduktion zwischen 2018 und 2030 bzw. 2040 leistet der Verkehrssektor. Bis 2030 ist eine Reduktion um 36 Mio. t CO₂-Äq bzw. 22 % gegenüber 2018 (-23 % ggü. 1990) zu verzeichnen, bis 2040 um 84 Mio. t CO₂-Äq bzw. 51 % gegenüber 2018 (-52 % ggü. 1990). Es ist aber anzumerken, dass sich aufgrund des Ausbaus der Elektromobilität ein Teil der Emissionen aus dem Verkehrssektor in die Energiewirtschaft verlagert, da die öffentliche Stromerzeugung in letzterem bilanziert wird.

Die Emissionen aus der Landwirtschaft werden aber geringere Emissionsminderung projiziert: gegenüber 2018 bis 2030 um 7 Mio. t CO₂-Äq bzw. 10 % (-30 % gegenüber 1990), um bis 2040 auf annähernd gleichem Niveau zu bleiben (-8 % gegenüber 2018 und -31 % gegenüber 1990). Die relativ geringe Reduktion der Emissionen aus der Landwirtschaft erklären auch den in Kapitel 14.2 beobachteten unterdurchschnittlichen Rückgang der Methan- und Lachgasemissionen.

Die Abfallwirtschaft weist mit 87 % im Jahr 2030 und 91 % im Jahr 2040 auch weiterhin die größten relativen Emissionsminderungen gegenüber 1990 auf. Haupttreiber für diese Entwicklung ist die verminderte Ablagerung von organischen Abfällen seit dem Jahr 2005, wodurch die Methanemissionen aus Deponien auch in den kommenden Jahrzehnten weiter abnehmen.

In Tabelle 126 sind auch die Abweichungen von den zulässigen Jahresemissionsmengen gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz 2021 dargestellt. Werte für alle Sektoren sind für die Jahre 2020, 2022 und 2030 verfügbar. Im Jahr 2020 unterschritten die Emissionen diese Jahresemissionsmengen; in den Jahren 2022 und 2030 ist mit einer Überschreitung zu rechnen. Die Abweichungen der Emissionen von den zulässigen Jahresemissionsmengen pro Sektor sind in Abbildung 48 dargestellt.

Abbildung 48: Abweichung der Treibhausgasemissionen pro Sektor von den Jahresemissionsmengen gemäß Klimaschutzgesetz 2021



Quelle für die Jahre 2021-2040: Modellrechnungen Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

Anmerkung: Die Werte für das Jahr 2020 wurden der Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2021) entnommen.

14.4 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in EU-ETS, ESR und BEHG

Auf EU-Ebene werden die Treibhausgasemissionen durch zwei Regime reguliert:

- ▶ Der europäischen Emissionshandel (European Union Emissions Trading System, EU-ETS) umfasst im Wesentlichen stationäre Großanlagen der KSP-Sektoren Energiewirtschaft und der Industrie sowie kleine Anteile von Gebäuden und Landwirtschaft. Darüber hinaus umfasst er auch den nationalen und europäischen Luftverkehr. Es gibt im EU-ETS keinen nationalen Emissionsobergrenzen, lediglich jährliche Caps für den EU-ETS insgesamt wurden festgelegt.
- ▶ Die Effort Sharing Regulation (ESR) reguliert all diejenigen Treibhausgasemissionen, die nicht im EU-ETS sind und auch weder Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr noch aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft LULUCF. Unter der ESR wurden für die einzelnen Mitgliedstaaten für die Jahre 2021 bis 2030 jährliche Emissionsmengen zugeteilt. Die Deutschland zugeteilten Emissionsmengen entsprechend einer Emissionsreduktion von 38 % bis 2030 gegenüber 2005.

Deutschland hat mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) eine weitere Regulierung eines Teils der ESR-Emissionen geschaffen. Das BEHG leitet von den jährlichen ESR-Emissionsmengen jährlich zulässige Brennstoffemissionen ab, die unter den nationalen Emissionshandel (nEHS) fallen.

Der nEHS bepreist somit den Großteil derjenigen CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Brennstoffen, die nicht bereits dem Europäischen Emissionshandel (EU-ETS) unterliegen.

14.4.1 Methodik

Die auf EU-ETS, ESR und BEHG fallenden Emissionen werden wie folgt ermittelt:

Für den Bereich der verbrennungsbedingten Emissionen werden 21 Subsektoren mit jeweils bis zu 18 verschiedenen fossilen, biogenen und strombasierten Brennstoffen unterschieden.¹¹⁴ In der Modellierung ist die Aufteilung auf EU-ETS und ESR zugleich mit der Berechnung der Emissionen unter dem BEHG verbunden. Für jeden Subsektor und jeden Brennstoff werden drei Anteile bestimmt:

- ▶ Brennstoffe und deren Emissionen im ETS
- ▶ Brennstoffe und deren Emissionen im BEHG
- ▶ Brennstoffe und deren Emissionen im ESR außerhalb des BEHG

In vielen Fällen werden Brennstoffe komplett einem der drei Bereiche zugeschlagen. So werden beispielsweise die Brennstoffeinsätze in Raffinieren und sämtliche Sondergase (Gichtgas, Kokereigas, etc.) komplett dem EU-ETS zugeordnet. Ebenso werden beispielsweise die fossilen Brennstoffe der privaten Haushalte und des landgebundenen Verkehrs komplett dem BEHG zugeordnet. In der Modellierung wird angenommen, dass Emissionen aus der Verbrennung biogener Brennstoffe weder unter den ETS noch unter das BEHG fallen. Sie werden daher also als ESR außerhalb des BEHG bilanziert. Diese CO₂-Emissionen werden im Projektionsbericht in Anlehnung an das Treibhausgasinventar auch nicht in die Summe der Treibhausgasemissionen miteinberechnet, aber nachrichtlich separat ausgewiesen.

Da sowohl der ETS als auch das BEHG bei Verbrennungsprozessen ausschließlich CO₂ adressieren, werden sämtliche verbrennungsbedingten Methan- und Lachgasemissionen dem ESR außerhalb des BEHG zugeordnet.

Für die Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung wird für die mineralische Industrie, die chemische Industrie und die Metallproduktion vereinfacht angenommen, dass deren CO₂-Emission komplett unter den EU-ETS fallen. Ebenso werden die Lachgas-Emissionen der Salpetersäure- und Adipinsäureproduktion sowie die FKW-Emissionen der Aluminiumproduktion komplett dem EU-ETS zugeordnet. Darüber hinaus werden geringe CO₂-Emissionsmengen aus der Anwendung von Harnstoff dem ETS zugeordnet.¹¹⁵

Der Großteil der Emissionen des KSG-Sektors Landwirtschaft sowie sämtliche Emissionen des KSG-Sektors Abfallwirtschaft und Sonstiges sind somit dem ESR außerhalb des BEHG zuzuordnen.

Die auf detaillierter Ebene ermittelten Emissionsanteile werden in einem letzten Schritt aggregiert und ergeben somit die gesamten ETS- und ESR-, sowie BEHG-Emissionen. Auf aggregierter Ebene lassen sich die ETS-Anteile wiederum pro Klimaschutzgesetz-Sektor angeben.

¹¹⁴ Energieträger, die keine Brennstoffe sind, müssen hier nicht betrachtet werden, da diese keine direkten Emissionen verursachen.

¹¹⁵ Für die Emissionen aus der Ammoniakproduktion gibt es einen wesentlichen methodischen Unterschied zwischen Berichterstattung im EU-ETS (Europäische Kommission 2012, 2018) und der Methode der Treibhausgasinventare (IPCC 2006b). Im ETS wird CO₂ aus der Ammoniakproduktion, das in einem nachfolgenden Produktionsschritt zur Herstellung von Harnstoff verwendet wird, trotzdem als emittiert berichtet. Im Treibhausgasinventar hingegen wird dies nicht als Emission der Ammoniakproduktion berichtet. Stattdessen werden die tatsächlichen Emissionen bei der Harnstoffanwendung ausgewiesen. Hierbei sind insbesondere zwei Anwendungen zu nennen: Harnstoff als Düngemittel in der Landwirtschaft und in steigendem Maße harnstoffhaltiges AdBlue in Dieselfahrzeugen. Daher werden die Emissionen dieser beiden Quellgruppen ebenfalls dem EU-ETS zugeordnet. Nach dieser Logik hat auch die Landwirtschaft EU-ETS-Emissionen.

Für den Projektionsbericht 2021 wurde (wie auch in den Vorgängerberichten) ein Modellierungsansatz gewählt, bei dem nicht ein übergreifendes Energiesystemmodell zum Einsatz kommt, sondern mehrere detaillierte Sektormodelle miteinander verbunden werden. Da in einem solchen Modellverbund eine exakte Einhaltung zulässiger BEHG-Emissionsmenge nur über aufwändige Iterationen möglich wäre, wurde stattdessen den einzelnen Sektormodellen ein einheitlicher BEHG-CO₂-Preisvorgehen (Abschnitt 3.4). Die für die einzelnen Jahre 2021 bis 2030 zulässigen BEHG-Jahresemissionsmengen („BEHG-Cap“) wird wie oben beschrieben ohne die Erhöhungsmenge angegeben. Aussagen über die Einhaltung oder Verfehlung der BEHG-Cap beziehen sich also immer auf die Brennstoffmengen, für auch der BEHG-CO₂-Preis tatsächlich wirksam ist.

Die Emissionen werden anhand der Treibhauspotentiale aus dem Vierten Sachstandsbericht des IPCC berechnet. Im nationalen Treibhausgasinventar ab 2023 und für den Vergleich mit den Höchstmengen werden die Treibhauspotentiale aus dem Fünften Sachstandsbericht des IPCC verwendet.

14.4.2 Ergebnisse

Tabelle 127 beschreibt die Emissionsentwicklung im Referenzszenario in den vom EU-ETS und in den von der Effort Sharing Regulation (ESR)¹¹⁶ erfassten Sektoren. Bis 2030 gehen die Emissionen von stationären Anlagen im EU-ETS um gut 43 % gegenüber dem Jahr 2005 zurück, bis 2040 um gut 68 %. Die Emissionen in den von der ESR erfassten Sektoren sinken bis 2030 um rund 29 % gegenüber 2005, bis 2040 wird eine Minderung um gut 49 % erreicht.¹¹⁷ Das Minderungsziel im Rahmen der ESR ist derzeit -38 % bis 2030 gegenüber 2005. Dies entspricht einer Reduktion der Gesamtemissionen auf 295 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030. Damit wird das ESR-Minderungsziel im Referenzszenario deutlich verfehlt.

Die Berechnung der Emissionen der stationären Anlagen, die vom EU-ETS erfasst werden, erfolgt, indem für die einzelnen CRF-Kategorien¹¹⁸ abgeschätzt wird, zu welchem Anteil sie vom Emissionshandel erfasst werden. Hier treten naturgemäß Ungenauigkeiten auf, da die Modellierung nicht emissionshandelspflichtige Anlagen abbildet, sondern Inventarkategorien.

¹¹⁶ Bis 2020 Effort Sharing Decision (ESD).

¹¹⁷ 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.

¹¹⁸ 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.

Tabelle 127: Emissionsentwicklung im stationären EU-ETS und im ESR-Sektor im MMS, 2005-2040

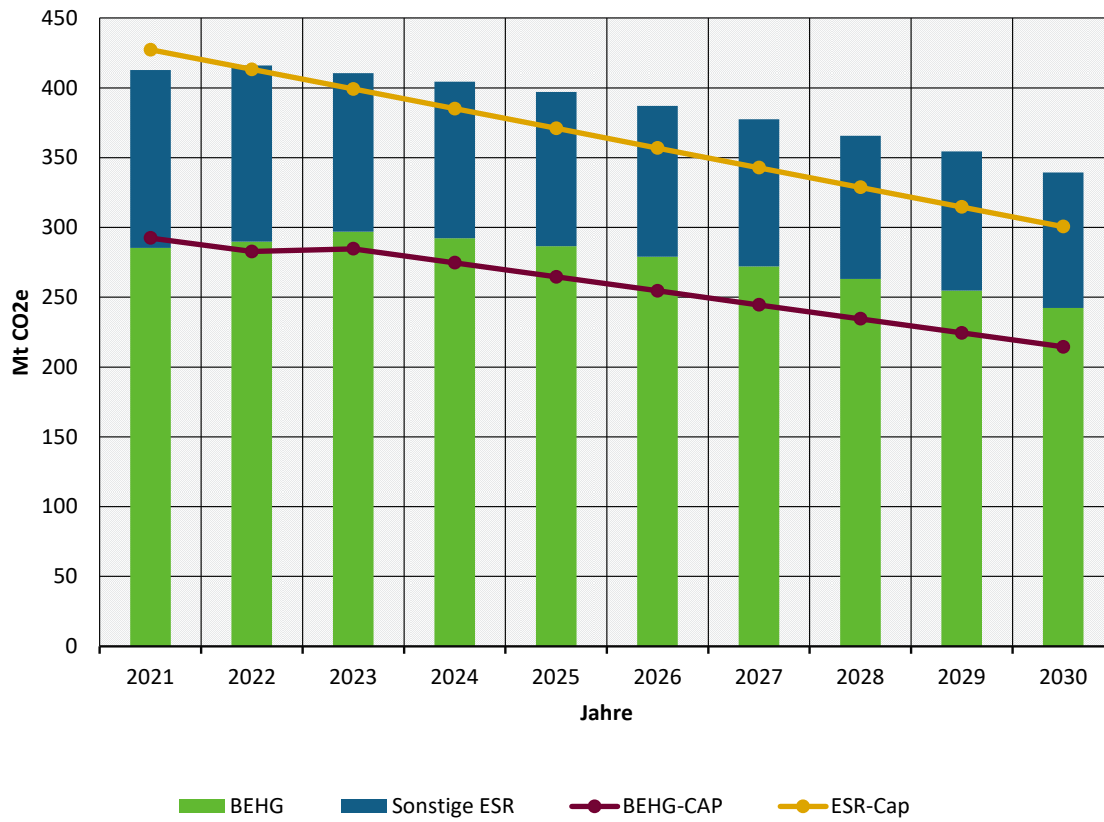
	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂ -Äq					
Emissionen stationärer EU-ETS ^a	514,9	422,3	351,9	291,9	226,1	165,5
Emissionen ESR ^b	476,0	434,1	397,2	339,3	286,2	241,6
Summe ESR und stationärer EU-ETS ^c	990,9	856,3	750,9	632,9	514,0	408,7
<i>Stationärer EU-ETS ggü. 2005</i>	0,0 %	-18,0 %	-31,6 %	-43,3 %	-56,1 %	-67,9 %
<i>ESR ggü. 2005</i>	0,0 %	-8,8 %	-16,6 %	-28,7 %	-39,9 %	-49,3 %

Anmerkung: ^a Vom EU-ETS erfasste Emissionen in der seit 2013 gültigen Abgrenzung. ^b Jahre 2005-2018 aus Konsistenzgründen (Vergleich mit Daten für 2020-2040) mit CRF-Kategorien berechnet; in der ab 2013 gültigen EU-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 weder vom stationären EU-ETS noch von der ESR erfasst sind.

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), (EU-Kommission 2020), (EEA 2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

Abbildung 49 und Tabelle 128 stellen die modellierten ESR- und BEHG-Emissionen den jeweils zulässigen jährlichen Emissionsmengen gegenüber. Hier kann es nach oben beschriebener Logik ebenfalls zu Ungenauigkeiten kommen, die der spezifischen Modellierung geschuldet sind und zu Abweichungen von offiziellen BEHG-Angaben führen können. So führt die hier verwendete Abgrenzung des BEHG insbesondere zu einer BEHG-Höchstmenge, die von der offiziell gemäß § 4 BEHG festgelegten, bisher aber noch nicht veröffentlichten Menge abweicht. Im Jahr 2021 werden zwar bedingt durch Auswirkungen der COVID-19-Pandemie noch die zulässigen ESR- und BEHG-Emissionen eingehalten. Aber bereits im Jahr 2022 liegen die Emissionen über den Zielwerten und bis zum Jahr 2030 vergrößert sich die jährliche Überschreitung der zulässigen Emissionsmengen kontinuierlich. Im Jahr 2030 beträgt die Abweichung bei den Brennstoffemissionen gut 28 Mio. t CO₂-Äq und die Abweichung bei den ESR-Emissionen knapp 39 Mio. t CO₂-Äq. Dies bedeutet, dass neben einer zu geringen Reduktion der Nutzung fossiler Energieträger die sonstigen Emissionsquellen unter der ESR zu etwa 30 % zur Verfehlung der zulässigen ESR-Emissionsmengen beitragen.

Abbildung 49: Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030)



Anmerkung: Siehe auch Kapitel 14.4.1 zu den verwendeten GWPs

Quelle: (EU-Kommission 2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

Tabelle 128: Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter dem BEHG und unter der ESR inkl. Höchstmengen (2021-2030)

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Mio. t CO ₂ -Äq									
ESR-Emissionen	412,7	416,0	410,5	404,4	397,2	387,0	377,5	365,7	354,6	339,3
ESR-Höchst-mengen	427,3	413,2	399,1	385,1	371,0	356,9	342,8	328,7	314,7	300,6
Abwei-chung von ESR-Höchst-mengen	-14,6	2,8	11,4	19,3	26,2	30,1	34,7	37,0	39,9	38,7
BEHG-Emissionen	285,4	289,9	297,0	292,3	286,6	279,1	272,2	263,1	254,8	242,3
BEHG-Höchst-mengen	292,4	282,8	284,7	274,7	264,7	254,6	244,6	234,5	224,5	214,4
Abwei-chung von BEHG-Höchst-mengen	-7,0	7,1	12,2	17,6	21,9	24,5	27,6	28,6	30,3	27,9

Anmerkung: Siehe auch Kapitel 14.4.1 zu den verwendeten GWPs

Quelle: (EU-Kommission 2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

Die folgende Tabelle 129 stellt detailliert die modellierten Emissionen der KSG-Sektoren aufgeteilt nach EU-ETS und ESR dar. Für die ESR-Emissionen sind zusätzlich die unter das BEHG sowie die sonstigen ESR-Emissionen aufgetragen.

Tabelle 129: Emissionsentwicklung der KSG-Sektoren nach Regime im MMS, 2005-2040

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂ -Äq					
Energiewirtschaft	396,9	305,1	242,8	193,2	135,4	74,9
davon EU-ETS	361,1	268,8	212,1	164,5	108,2	51,0
davon ESR	35,9	36,3	30,7	28,7	27,1	24,0
<i>davon BEHG</i>			10,4	9,9	8,5	5,8

	2005	2018	2025	2030	2035	2040
<i>davon sonstige ESR</i>			20,3	18,8	18,6	18,2
Industrie	191,0	194,9	174,8	154,6	143,2	139,4
davon EU-ETS	152,6	152,4	138,7	126,4	117,0	113,8
davon ESR	38,4	42,5	36,0	28,2	26,2	25,6
<i>davon BEHG</i>			18,6	16,8	15,6	15,5
<i>davon sonstige ESR</i>			17,4	11,5	10,6	10,1
Gebäude	153,9	116,6	107,9	90,9	69,0	50,2
davon EU-ETS	0,7	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2
davon ESR	153,3	116,0	107,4	90,5	68,7	50,0
<i>davon BEHG</i>			106,2	89,2	67,5	49,0
<i>davon sonstige ESR</i>			1,3	1,2	1,2	1,1
Verkehr	160,0	162,3	151,4	126,4	100,1	78,7
davon EU-ETS ^a	2,2	2,0	1,8	1,7	1,7	1,6
davon ESR	157,7	160,3	149,6	124,7	98,4	77,1
<i>davon BEHG</i>			145,9	121,2	95,3	74,3
<i>davon sonstige ESR</i>			3,7	3,5	3,2	2,9
Landwirtschaft	70,1	69,8	67,3	62,8	62,4	62,0
davon EU-ETS	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6
davon ESR	69,5	69,2	66,7	62,2	61,8	61,5
<i>davon BEHG</i>			5,4	5,2	4,9	4,5
<i>davon sonstige ESR</i>			61,2	57,0	56,9	56,9
Abfallwirtschaft & Sonstige	21,3	9,7	6,7	5,0	4,0	3,4
davon EU-ETS	NA	NA	NA	NA	NA	NA
davon ESR	21,3	9,7	6,7	5,0	4,0	3,4
<i>davon BEHG</i>			NA	NA	NA	NA
<i>davon sonstige ESR</i>			6,7	5,0	4,0	3,4
Summe	993,2	858,3	750,9	632,9	514,0	408,7
davon stationärer EU-ETS	514,9	422,3	351,9	291,9	226,1	165,5
davon nationaler Flugverkehr im EU-ETS	2,2	2,0	1,8	1,7	1,7	1,6
davon ESR	476,1	434,1	397,2	339,3	286,2	241,6
<i>davon BEHG</i>			286,6	242,3	191,8	149,0
<i>davon sonstige ESR</i>			110,6	97,0	94,5	92,6

Anmerkung: ^a Bezieht sich lediglich auf vom Inventar erfassten nationalen Flugverkehr. Der ebenfalls vom EU-ETS erfasste internationale Flugverkehr ist nicht dargestellt.

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), (EU-Kommission 2020), EEA (2020), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

14.5 Sensitivitätsanalysen

Die angenommenen Rahmendaten (siehe Kapitel 3) sind aufgrund der weiten Voraussicht der Annahmen für Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftsentwicklung und CO₂-Preise bis zum Jahr 2040 mit Unsicherheiten verbunden. Um Abweichungen von den gewählten Annahmen abschätzen zu können wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. In den Sensitivitätsanalysen werden die Grundannahmen jeweils abgeändert und der Einfluss entsprechend dargestellt. Folgende Parameter werden in der Sensitivitätsanalyse verändert:

- ▶ Wirtschaftswachstum;
- ▶ Bevölkerungsentwicklung;
- ▶ Preis der EU-Emissionszertifikate;
- ▶ BEHG-Preis.

Für die Annahmen zum Wirtschaftswachstum wird in der Sensitivität die Wachstumsentwicklung der Europäischen Kommission verwendet, die aufgrund der Corona-Pandemie im Jahr 2020 von einem stärkeren Wirtschaftsrückgang und gleichzeitig von einer schnelleren Erholung ausgeht.

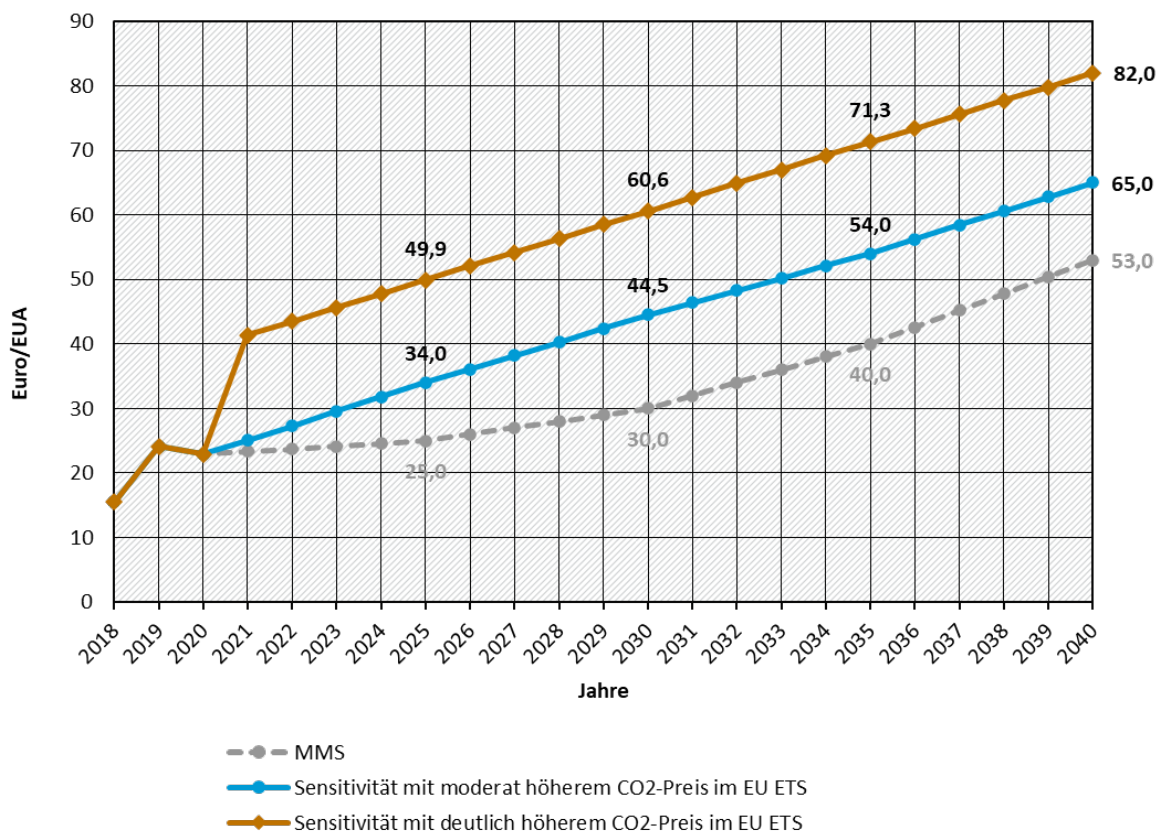
In der Sensitivitätsrechnung für die Bevölkerungsentwicklung wird von einer höheren Bevölkerung aufgrund stärkerer Zuwanderung (vgl. Kapitel 3.1.1) ausgegangen. Der Einfluss dieser beiden Einflussfaktoren auf die energiebedingten Treibhausgasemissionen wurde mit Hilfe einer Komponentenzerlegung durchgeführt.¹¹⁹

In zwei Sensitivitätsrechnungen für die CO₂-Preise wird ein jeweils höherer Preispfad für EU-Emissionszertifikate angenommen (Abbildung 50). Für beide Variationen der CO₂-Preise wurde eine weitere Strommarktmodellierung eingesetzt.

Schließlich wurden als Sensitivität der BEHG-Preise die Werte des Nationalen Energie- und Klimaplan genutzt, die im Vergleich zu den verwendeten BEHG-Preisen im MMS schneller steigen (siehe Tabelle 131).

¹¹⁹ Angelehnt an Diekmann et al. (1999) mit Berücksichtigung von energiebedingten CH₄- und N₂O-Emissionen. Für Konsistenz mit der Bilanzierung des inländischen Primärenergieverbrauchs werden Emissionen aus dem internationalen Luftverkehr, aber nicht die Emissionen des internationalen Seeverkehrs, eingeschlossen.

Abbildung 50: Alternative Preispfade für EU-Emissionszertifikate in der Sensitivitätsanalyse



Quelle: Annahmen Öko-Institut

14.5.1 Wirtschaftswachstum und demographische Entwicklung

Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Komponentenanalyse. Diese zeigt den Einfluss der verschiedenen Faktoren auf die Treibhausgasreduzierung. Die energiebedingte Emissionsreduzierung zwischen dem Jahr 2018 und 2040 beträgt im MMS 411 Mio. t CO₂-Äq. Die verschiedenen Treiber haben einen positiven oder negativen Einfluss auf diesen Wert. So haben die steigende Wirtschaftsleistung (+358 Mio. t CO₂-Äq) und die Bevölkerungsentwicklung (+7 Mio. t CO₂-Äq) steigende Emission zur Folge. Dem gegenüber stehen Einflussfaktoren, die eine sinkende Emissionsentwicklung zur Folge haben. Im Jahr 2040, verglichen mit 2018, tragen die Energieeffizienz (-332 Mio. t CO₂-Äq) und der sinkende fossile Primärenergieanteil (-320 Mio. t CO₂-Äq) ungefähr zu gleichen Teilen zur Treibhausgasreduzierung bei. Hinzukommt, dass der verbleibende Anteil an fossilen Energieträgern eine geringere THG-Intensität aufweist (-126 Mio. t CO₂-Äq)

Abbildung 51: Komponentenanalyse für die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen (MMS)

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Auf Grundlage dieser Komponentenzerlegung konnte eine Sensitivitätsanalyse für das Wirtschaftswachstum und der demographischen Entwicklung durchgeführt werden. Dafür wurden die jeweiligen Entwicklungen entsprechend der Vorgaben (siehe Kapitel 3.1) abgeändert, während die anderen Parameter konstant gehalten wurden.

- ▶ Die alternative Bevölkerungsprojektion entspricht der Variante G2-L2-W3 des Statistischen Bundesamtes mit höherer Zuwanderung. Die Sensitivität liegt höher als die Grundannahme.
- ▶ Für die Sensitivitätsannahme des Wirtschaftswachstums wurden die Wachstumsraten der Europäischen Kommission ab 2020 verwendet.

Die Ergebnisse dieser Änderungen werden in Tabelle 135 dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die höhere Bevölkerung im Jahr 2040 die Treibhausgasemissionen 2,9 Mio. t CO₂-Äq höher liegen als im MMS und damit die Treibhausgasminderung ggü. 1990 0,2 % niedriger ausfällt. Setzt man für die Sensitivität das Wirtschaftswachstum nach Vorhersagen der Europäischen Kommission voraus, so werden 2,7 Mio. t CO₂-Äq weniger als im MMS eingespärt.

14.5.2 EUA-Preise im Stromsektor

Preise für EU-Emissionszertifikate sind ein relevanter Treiber für die Projektionen im Stromsektor. Insbesondere führen niedrige Preise zu einer höheren Wirtschaftlichkeit von Kohlekraftwerken und mithin Emissionen. In zwei Sensitivitätsrechnungen wird daher von höheren Preispfaden im EU-Emissionshandel ausgegangen (Abbildung 50). In der Sensitivitätsrechnung mit moderat höherem CO₂-Preis im ETS steigt der CO₂-Preis, ausgehend von knapp 23 € pro EUA im Jahr 2020, auf knapp 45 € im Jahr 2030 und 65 € im Jahr 2040. Allerdings bleibt auch diese Preisprojektion hinter der aktuellen Entwicklung der Preise im EU ETS zurück (siehe Kapitel 3.3), weswegen die Auswirkungen

der CO₂-Bepreisung auf den Strommix und damit die Emissionen des Stromsektors potenziell unterschätzt werden. In der Sensitivitätsrechnung mit deutlich höheren Preisen wird daher von einem wiederum höheren Pfad ausgegangen. Hier steigt der CO₂-Preis auf knapp 61 € pro EUA im Jahr 2030 und 82 € im Jahr 2040.

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits der moderat höhere CO₂-Preis den Einsatz von Kohle verringert (Tabelle 130). In Summe liegt die jährliche Kohlestromerzeugung zwischen etwa einer und 7 TWh niedriger als im MMS. Die geringere Erzeugung wird zum größten Teil durch höhere Importe aus dem Ausland kompensiert. Zwar gilt auch dort der höhere CO₂-Preis. Jedoch reduzieren sich die Kohlekapazitäten insbesondere in Polen nicht so zügig wie in Deutschland und es besteht Raum für zusätzliche Erzeugung und Importe. Ein *Fuel Switch* zwischen Steinkohle und Gas findet auch beim moderat höheren Preis nicht statt.

Ein deutlich höherer CO₂-Preis führt zu qualitativ vergleichbaren, aber deutlich prononcierteren Befunden (Tabelle 130). Die jährliche Nettostromerzeugung aus Kohle geht gegenüber dem MMS zwischen 15 TWh (im Jahr 2034) und 43 TWh (im Jahr 2022) zurück. Dieser Rückgang wird vor allem in den 2020er-Jahren zu einem kleineren Teil durch zusätzlichen Strom aus Erdgaskraftwerken kompensiert. Der größere Teil wird durch erhöhte Importe ausgeglichen.

Tabelle 130: Sensitivität: Änderung der Nettostromerzeugung gegenüber dem MMS

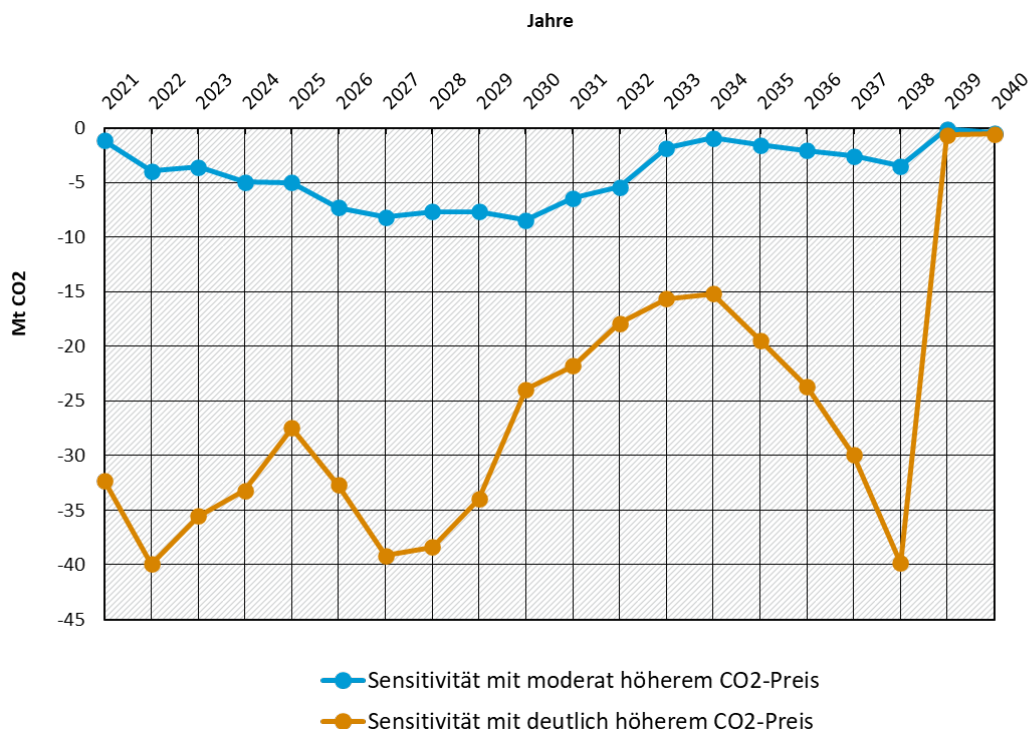
Technologie	Einheit	2025	2030	2035	2040	2025	2030	2035	2040
		Sensitivität mit moderat höherem CO ₂ -Preis				Sensitivität mit deutlich höherem CO ₂ -Preis			
Braunkohle	TWh	-1	0	-1	0	-12	-2	-19	0
Steinkohle	TWh	-3	-7	0	0	-16	-24	0	0
Erdgas	TWh	0	-3	-1	-1	5	-2	0	-2
Öl	TWh	-1	0	0	0	-1	-1	0	0
Netto-Importe	TWh	5	11	2	1	23	29	18	2

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Anmerkungen: Auf ganze Zahlen gerundet

Die veränderte Stromerzeugung spiegelt sich in den CO₂-Emissionen wider. So liegen die Emissionen in beiden Sensitivitäten stets unter denen des MMS und folgen dabei größtenteils der verminderten Stromerzeugung aus Kohle (Abbildung 52). Gegenüber dem MMS summiert sich die Gesamteinsparung über die projizierten Jahre 2021 bis 2040 beim moderat höheren Preis auf gut 77 Mio. t CO₂, beim deutlich höheren Preis auf fast 300 Mio. t CO₂.

Abbildung 52: Differenz der CO₂-Emissionen zwischen der Sensitivität und dem MMS



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

14.5.3 BEHG-Preise

Als Sensitivität der BEHG-Preise wurden die Werte der Szenarioanalyse des Nationalen Energie- und Klimaplan (NECP) genutzt (siehe Tabelle 131). Im Vergleich zu den verwendeten BEHG-Preisen im MMS, steigen die Preise des Szenarios im NECP ab dem Jahr 2028 deutlich schneller. Somit liegt der nominale CO₂-Preis pro Tonne im Jahr 2030 bereits bei 180 €, während der Preis im MMS 125 € erreicht. Bis 2040 steigt der CO₂-Preis im NECP-Szenario auf 346 €/t, der im MMS verwendete CO₂-Preis beläuft sich real auf 275 €/t.

Tabelle 131: BEHG-Preise MMS und NECP

Jahr	MMS	NECP-Szenario
		€/t nominal
2021	25	25
2022	30	30
2023	35	35
2024	45	45
2025	55	55
2026	65	65
2027	80	95

Jahr	MMS	NECP-Szenario
2028	95	125
2029	110	155
2030	125	180
2031	140	201
2032	155	222
2033	170	243
2034	185	264
2035	200	285
2036	215	306
2037	230	327
2038	245	334
2039	260	340
2040	275	346

Quelle: (Prognos et al. 2020)

14.5.3.1 Industrie

Im Industriesektor führt der veränderte CO₂-Preis des BEHG nur zu geringfügigen Änderungen (Tabelle 132). Das hat mehrere Gründe. Zunächst ist nur ein kleiner Teil der Emissionen der Industrie vom BEHG betroffen, da der EU-ETS die besonders energie- und emissionsintensiven Prozesse abdeckt. Die Wirkung der CO₂-Preissensitivität beschränkt sich dadurch überwiegend auf die Erzeugung von Dampf zur Bereitstellung von Prozesswärme in der Nahrungsmittelindustrie (zum Teil), Maschinen- und Automobilbau, sonstige Chemie, Gummi- und Kunststoffwaren sowie dem in der Energiebilanz angegebenen Aggregat "sonstige" Industrie; alles eher wenig energieintensive Bereiche der Weiterverarbeitung. Insgesamt machen diese nur knapp 30 % des Energiebedarfes und 20 % der Treibhausgasemissionen des Sektors aus.

Darüber hinaus besteht auch für den betroffenen Teil (wie insgesamt in der Industrie) durch die lange Lebensdauer von Anlagen eine relevante Trägheit, die sich darin ausdrückt, dass bis 2030 nur ein Teil der Anlagen ersetzt wird. Die Wirkung des CO₂-Preises, die Investitionsentscheidung durch Verschiebung der ökonomischen Parameter zu beeinflussen (weniger emissionsintensive Technologien attraktiver zu machen), entfaltet nur für diesen Teil Wirkung. Hinzu kommt, dass die Differenz zum ursprünglichen Pfad in der Sensitivität erst ab 2027 einsetzt und daher trotz der potenziell durchaus entscheidungsrelevanten Differenz von 55 €/tCO₂ (2030) nur wenige Entscheidungen beeinflusst.

Darüber hinaus gehende Effekte, z. B. auf das Entscheiderverhalten, wurden bewusst nicht berücksichtigt. Diese könnten zum Beispiel dazu führen, dass alte Anlagen früher als sonst ausgetauscht werden und bei der Entscheidung für oder gegen eine Technologie gezielter geprüft wird. Diese Effekte sind allerdings aufgrund mangelnder empirischer Daten schwer zu quantifizieren und bedürften daher einer ausführlicheren Untersuchung, um sie einzubeziehen.

Tabelle 132: Differenz der Treibhausgasemissionen in MMS und Sensitivität im Industriesektor in Mio. t CO₂-Äq

MMS	174,77	154,61	143,22	139,39
Differenz	0,07	0,22	0,42	0,56

Quelle: Eigene Berechnungen

14.5.3.2 Gebäude

Im Gebäudesektor führt der veränderte CO₂-Preis zu einer schnelleren Verschiebung von fossilen Brennstoffen zu Fernwärme, Wärmepumpen und Biomasse. Obwohl der CO₂-Preis bereits ab 2028 deutlich dynamischer ist als im MMS, sind Auswirkungen auf den Endenergiebedarf allerdings erst im Zeitraum zwischen 2030 und 2040 ersichtlich. Im Vergleich zum MMS sinkt in der Sensitivität ab 2031 der Bedarf an Heizöl und Erdgas und die Endenergiebereitstellung verlagert sich zu Wärmenetzen, Biomasse und Wärmepumpen. Durch den geringeren Einsatz an fossilen Brennstoffen ergibt sich im Vergleich zum MMS im Jahr 2030 eine Differenz in Höhe von 0,41 Mio. t CO₂-Äq und im Jahr 2040 in Höhe von 4,25 Mio. t CO₂-Äq (siehe Tabelle 133). Die Verschärfung des CO₂-Preises resultiert somit nicht in geringeren Emissionen bis 2030 und führt nicht zu einer Erreichung des Sektorziels. Dagegen entfaltet sich die Wirkung erst nach dem Jahr 2030. Die Wirkung eines dynamischeren CO₂-Preises ist deshalb beim Umstieg von fossilen Brennstoffen nicht zu unterschätzen, muss jedoch durch weitere Instrumente ergänzt werden.

Tabelle 133: Differenz der Treibhausgasemissionen in MMS und Sensitivität im Gebäudesektor in Mio. t CO₂-Äq

	2025	2030	2035	2040
MMS	100,70	84,10	62,83	44,57
Sensitivität MMS		83,70	60,25	40,32
Differenz	0,02	0,41	2,58	4,25

Quelle: Eigene Berechnungen

14.5.3.3 Verkehr

Die zusätzliche Treibhausgasminderung im Verkehrssektor durch den höheren CO₂-Preis steigt von 3,5 Mio. t im Jahr 2030 auf 5,8 Mio. t im Jahr 2035 an. Im Jahr 2040 liegt die zusätzliche Minderung mit 5 Mio. t wieder etwas niedriger. Grund dafür ist, dass bis dahin die Fahrzeuge bereits zu einem wesentlichen Teil elektrifiziert sind und dort der CO₂-Preis keine zusätzliche Wirkung entfaltet.

Der höhere CO₂-Preis führt zu einem Rückgang der Fahrleistung von verbrennungsmotorischen Pkw. Dieser beträgt im Jahr 2030 17 Mrd. km bzw. 3,3 % und erklärt den größeren Teil (ca. 2,6 Mio. t) der berechneten Treibhausgasminderung. Hinzu kommt die zusätzliche Treibhausgasminderung bei Lkw und leichten Nutzfahrzeugen, die sowohl auf einen etwas beschleunigten Antriebswechsel als auch auf eine etwas stärkere Verlagerung zurückzuführen ist.

Tabelle 134: Differenz der Treibhausgasemissionen in MMS und Sensitivität im Verkehrssektor in Mio. t CO₂-Äq

MMS	151,4	126,4	100,1	78,7
Sensitivität MMS		122,9	94,3	73,7
Differenz	0	3,5	5,8	5,0

Quelle: Eigene Berechnungen

14.5.4 Zusammenfassung Ergebnisse

Tabelle 135 zeigt zusammengefasst die Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnungen. Es zeigt sich, dass bei geänderten Grundannahmen im Mit-Maßnahmen-Szenario die Änderungen nur geringe Auswirkungen haben und das Klimaziel von -55 % bzw. 65 % bis zum Jahr 2030 gegenüber 1990 nicht erreicht wird.

Tabelle 135: Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnungen (MMS)

	1990	2018	2025	2030	2035	
	Mio. t CO ₂ -Äq					
	<i>Emissionen im Energiesektor (inkl. int. Flugverkehr)</i>					
MMS	1.049,2	750,6	659,7	556,2	441,6	339,1
Wirtschaftswachstum n. EU-Kommission			658,4	551,7	438,1	336,4
höhere Bevölkerung			663,4	559,6	444,7	342,0
Moderat höhere EUA-Preise			654,6	547,7	440,1	338,6
Deutlich höhere EUA-Preise			632,2	532,2	422,2	338,6
höhere BEHG-Preise			659,6	552,1	432,9	329,3
Differenz gegenüber MMS:						
Wirtschaftswachstum n. EU-Kommission			-1,2	-4,4	-3,5	-2,7
höhere Bevölkerung			3,7	3,5	3,0	2,9
Moderat höhere EUA-Preise			-5,0	-8,5	-1,6	-0,5
Deutlich höhere EUA-Preise			-27,5	-24,0	-19,5	-0,6
höhere BEHG-Preise			-0,1	-4,1	-8,8	-9,8
Gesamtemissionen (ohne int. Verkehr & LULUCF):						
MMS	1.249,5	858,3	750,9	632,9	514,0	408,7

	1990	2018	2025	2030	2035	2040
Wirtschaftswachstum n. EU-Kommission			749,7	628,4	510,5	406,0
höhere Bevölkerung			754,6	636,4	517,0	411,6
Moderat höhere EUA-Preise			745,8	624,4	512,4	408,2
Deutlich höhere EUA-Preise			723,4	608,9	494,5	408,2
höhere BEHG-Preise			750,8	628,8	505,2	398,9
Minderung Gesamtemissionen ggü. 1990 (%):						
MMS		-31,3 %	-39,9%	-49,3%	-58,9%	-67,3%
Wirtschaftswachstum n. EU-Kommission			-40,0%	-49,7%	-59,1%	-67,5%
höhere Bevölkerung			-39,6%	-49,1%	-58,6%	-67,1%
Moderat höhere EUA-Preise			-40,3%	-50,0%	-59,0%	-67,3%
Deutlich höhere EUA-Preise			-42,1%	-51,3%	-60,4%	-67,3%
höhere BEHG-Preise			-39,9%	-49,7%	-59,6%	-68,1%

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

15 Nationale Systeme für Politiken und Maßnahmen sowie Projektionen

Laut Artikel 39 der Europäischen Governance-Verordnung (EU) 2018/1999 und Artikel 36 der Durchführungsverordnung (EU) 2020/1208 der Kommission sollen die Mitgliedsstaaten über ihr nationales System für Politiken und Maßnahmen sowie Projektionen nach Format von Anhang XXIII der Durchführungsverordnung berichten.

Wie in der Durchführungsverordnung (Anhang XXIII) spezifiziert, muss der erste gemäß Artikel 36 vorgelegte Bericht eine vollständige Beschreibung sowie alle in der Tabelle aufgeführten Angaben enthalten. In den nachfolgenden Berichtsjahren sind lediglich Änderungen am nationalen System für Politiken und Maßnahmen sowie Projektionen zu melden.

15.1 Namen und Kontaktdaten der Stellen, die die Gesamtverantwortung für die nationalen Systeme für Politiken und Maßnahmen sowie für Projektionen tragen

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) hat die Gesamtverantwortung für das nationale System für Politiken und Maßnahmen sowie für die Projektionen von Treibhausgasemissionen.

15.2 Vorhandene institutionelle Regelungen für die Erstellung der Berichte über Politiken und Maßnahmen sowie für Projektionen und deren Meldung

Das BMU beauftragt das Umweltbundesamt (UBA) mit der Ausschreibung eines Vorhabens zur Erstellung des Projektionsberichtes sowie der dazugehörigen Berichterstattung. Das UBA und das BMU sind gemeinsam zuständig für die Meldung der Ergebnisse. Das BMU ist zuständig für die Abstimmung mit anderen betroffenen Bundesministerien.

Die Modellierungsarbeiten finden in den beauftragten Forschungsinstitutionen statt. Die Erstellung des Projektionsberichts hat den folgenden Ablauf:

- ▶ Zunächst erstellen die Auftragnehmer eine Liste aller in der Modellierung zu berücksichtigen Maßnahmen sowie der hierfür anzusetzenden Annahmen (z. B. Fördervolumina, Ausbaukorridore). Im vorliegenden Projektionsbericht 2021 umfasst diese alle Maßnahmen, die bis Ende August 2020 verabschiedet worden sind. Diese Liste umfasst unter anderem die Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 und relevante Maßnahmen aus dem Konjunkturprogramm der Bundesregierung vom 3. Juni 2020. Der Entwurf der Liste wird zur Kommentierung an BMU und UBA übermittelt. Nach Erhalt der Kommentare durch den Auftragnehmer erstellen die Forschungsinstitutionen eine aktualisierte Maßnahmenliste, die durch BMU mit den anderen Bundesministerien abgestimmt wird. Nach Einarbeitung der Ergänzungen der Ressorts bilden die finale Maßnahmenliste und die abgestimmten Annahmen die Grundlage für die Modellierung. Wo die Parametrisierung nicht abgestimmt wurde, werden geeignete Annahmen durch die Forschungsnehmenden getroffen.
- ▶ Zeitgleich zur Erstellung der Maßnahmenliste erfolgt die Erarbeitung und Abstimmung von übergreifenden Rahmendaten. Diese umfassen beispielsweise die angenommene Bevölkerungs- oder Wirtschaftsentwicklung oder Brennstoff- und CO₂-Preise. Die Abstimmung dieser Annahmen erfolgt analog zur Abstimmung der Maßnahmen.

- ▶ Vor Beginn der Modellierung stellt das Umweltbundesamt den Forschungsnehmenden das Treibhausgasinventar für historische Jahre seit 1990 bis zum Basisjahr (im Projektionsbericht 2021 ist dies das Jahr 2018) in detaillierter Form zur Verfügung. Dies umfasst vor allem Aktivitätsdaten (beispielsweise Brennstoffeinsatz), aber auch Treibhausgasemissionen und andere Parameter. Die Daten werden seitens UBA aus dem Zentralen System Emissionen (ZSE) ausgespielt und den Forschungsnehmenden zur Verfügung gestellt. Die Forschungsnehmenden führen die Kalibrierung ihrer Modelle auf dieser Grundlage durch.
- ▶ Die Modellierung der sektoralen Treibhausgasemissionen, die Integration in ein Gesamtgerüst sowie die Berichtserstellung wird von den Forschungsnehmenden (Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES GmbH) durchgeführt. Die Modellierung und Berichtserstellung für die Sektoren Landwirtschaft sowie Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) wird vom Thünen-Institut vorgenommen und den Forschungsnehmenden zur Verfügung gestellt.
- ▶ Der Entwurf des Projektionsberichts wird zunächst UBA und BMU zur Verfügung gestellt. Kommentare zum Entwurf werden durch die Forschungsnehmenden eingearbeitet. Die daraus entstehende Berichtsversion wird durch die befassen Bundesministerien im Rahmen einer Ressortabstimmung geprüft. Nach Einarbeitung der Kommentare seitens der Forschungsnehmenden liegt die finale Berichtsversion zur Veröffentlichung vor.
- ▶ Die Forschungsnehmenden stellen BMU und UBA ebenfalls alle relevanten und für die Einreichung bei der EU benötigten Ergebnisse (z. B. Treibhausgasemissionen oder Informationen zu Politiken und Maßnahmen) in tabellarischer Form (Microsoft Excel) zur Verfügung.

15.3 Vorhandene rechtliche Regelungen für die Erstellung von Berichten über Politiken und Maßnahmen sowie über Projektionen

Die Erstellung von Berichten über Politiken und Maßnahmen sowie über Projektionen sind im Bundes-Klimaschutzgesetz unter § 10 wie folgt geregelt:

1. Die Bundesregierung erstellt jährlich einen Klimaschutzbericht, der die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den verschiedenen Sektoren, den Stand der Umsetzung der Klimaschutzprogramme nach § 9 und der Sofortprogramme nach § 8 sowie eine Prognose der zu erwartenden Treibhausgasminderungswirkungen enthält. Die Bundesregierung leitet den Klimaschutzbericht für das jeweilige Vorjahr bis zum 30. Juni dem Deutschen Bundestag zu.
2. Die Bundesregierung erstellt ab dem Jahr 2021 alle zwei Jahre einen Klimaschutz-Projektionsbericht nach den Vorgaben des Artikels 18 der Europäischen Governance-Verordnung, der die Projektionen von Treibhausgasemissionen, einschließlich der Quellen und Senken des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft, und die nationalen Politiken und Maßnahmen zu deren Minderung enthält. Die Bundesregierung leitet den Klimaschutz-Projektionsbericht bis zum 31. März des jeweiligen Jahres dem Deutschen Bundestag zu.
3. Der Klimaschutz-Projektionsbericht ist maßgeblich für die integrierten nationalen Fortschrittsberichte gemäß Artikel 17 der Europäischen Governance-Verordnung, die das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit erstellt.

Weitere Regelungen werden in der Verordnung (EU) 2018/1999 festgelegt.

15.4 Vorhandene verfahrenstechnische und administrative Regelungen und Zeitpläne für die Erstellung der Berichte über Politiken und Maßnahmen sowie über Projektionen

Das nationale System dient zur Qualitätssicherung. Die Erstellung der Berichte über Politiken und Maßnahmen sowie über Projektionen erfolgt in fünf Phasen. Diese werden im Folgenden dargestellt.

15.4.1 Phase 1

In Phase 1 (X-2)¹²⁰ stellt das BMU dem Umweltbundesamt Mittel zur Verfügung, um ein Forschungsprojekt zu vergeben, in dem sowohl Treibhausgasprognosen berechnet als auch klimapolitische Maßnahmen evaluiert werden. Das Umweltbundesamt legt die Projektdetails fest und schreibt das Projekt aus (X-1). Im nächsten Schritt unterbreitet der Auftragnehmer Vorschläge zu den zu analysierenden Politikinstrumenten und den zu verwendenden Schlüsselparametern (Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum, Energiepreise, Preise für ETS-Zertifikate). Das Umweltbundesamt leitet diese Vorschläge an das Ministerium weiter und beide Institutionen kommentieren die Vorschläge. Das Umweltbundesamt sammelt diese Kommentare und leitet sie an den Auftragnehmer weiter, der sie prüft und notwendige Änderungen einarbeitet. Dieser Prozess wird iteriert bis sich alle drei beteiligten Parteien über die zu analysierenden Politikinstrumente und die zu verwendenden Schlüsselparameter einig sind.

15.4.2 Phase 2

In Phase 2 leitet das Ministerium die Vorschläge zu den zu analysierenden Politikinstrumenten und den zu verwendenden Schlüsselparametern an die betroffenen Bundesministerien weiter. Die Ressorts kommentieren diese Vorgaben und die Kommentare werden erneut an den Auftragnehmer weitergeleitet. Der Auftragnehmer prüft diese Kommentare, arbeitet notwendige Änderungen ein und stellt eine aktualisierte Version zur Verfügung. Diese Version wird wiederum mit den betroffenen Bundesministerien geteilt. Dieser Prozess wird solange iteriert, bis sich alle vier Parteien auf die zu analysierenden Politikinstrumente und die zu verwendenden Schlüsselparameter geeinigt haben.

15.4.3 Phase 3

In Phase 3 verwenden die Auftragnehmer Modellsimulationen, um Treibhausgasprojektionen zu erstellen und Minderungseffekte für jedes klimapolitische Instrument zu berechnen. Die Anforderungen an die Modellierung sind in der Leistungsbeschreibung der Agentur festgeschrieben. Diese verlangen:

- ▶ eine detaillierte Modellierung des Energiesektors, da die energiebedingten Emissionen einen Anteil von mehr als 85 % an den Gesamtemissionen haben;
- ▶ die Modellierung von konsistenten Energieszenarien, die sowohl Treibhausgasprojektionen nach Sektoren und Gasen als auch eine Politikbewertung liefern;
- ▶ ein Modellierungsansatz, der die Kompatibilität mit dem letzten verfügbaren Inventarjahr ermöglicht;
- ▶ weitere Spezifikationen, die erforderlich sind, um die Anforderungen der Monitoring-Methodenverordnung (Nr. 525/2013) zu erfüllen.

¹²⁰ X ist das Projektionsjahr.

Für nicht-energetische Emissionen sind die Auftragnehmer nicht verpflichtet, Computermodelle zu verwenden, sondern können zurückgreifen auf:

- ▶ Angaben des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft zu Emissionen aus der Landwirtschaft;
- ▶ ein Tier-2-Ansatz für Emissionen aus industriellen Prozessen, diffuse Emissionen des Energiesektors und Emissionen aus dem Abfallsektor;
- ▶ Projektionen von Dritten für HFKW-, FKW- und SF₆-Emissionen

15.4.4 Phase 4

Nach der Erstellung der Treibhausgasprojektionen und der Berechnung der Minderungseffekte für jedes klimapolitische Instrument erstellt der Auftragnehmer einen Bericht, der die Grundlage für den Projektionsbericht darstellt. Dieses Dokument wird sowohl im Umweltbundesamt als auch im Ministerium diskutiert und die Kommentare werden erneut an den Auftragnehmer weitergeleitet. Der Auftragnehmer prüft die Kommentare, arbeitet die notwendigen Änderungen ein und erstellt einen aktualisierten Bericht. Dieser Prozess wird so lange wiederholt bis alle drei beteiligten Parteien mit dem Bericht zufrieden sind.

15.4.5 Phase 5

In Phase 5 leitet das Ministerium den Bericht an die betroffenen Bundesministerien weiter. Diese kommentieren den Bericht und die Kommentare werden an den Auftragnehmer weitergegeben. Der Auftragnehmer prüft die Kommentare, arbeitet die notwendigen Änderungen ein und erstellt einen aktualisierten Bericht. Diese Version wird erneut mit den betroffenen Bundesministerien geteilt. Dieser Prozess wird solange iteriert, bis alle vier Parteien mit dem Bericht einverstanden sind. Zu diesem Zeitpunkt wird die vereinbarte Endversion des Berichts vorgelegt.

15.5 Beschreibung des Verfahrens zur Erhebung von Informationen

Die Liste der für Modellierung zu berücksichtigen Maßnahmen sowie der hierfür anzusetzenden Annahmen (z. B. Fördervolumina, Ausbaukorridore) werden seitens der Forschungsnehmenden erstellt und mit UBA, BMU und den beteiligten Bundesressorts abgestimmt (Abschnitt 15.2).

Die Maßnahmenbeschreibungen bzw. -parametrisierungen werden hierbei aus verfügbaren Gesetzestexten, Verordnungen und Haushaltsplänen entnommen. Wo diese Daten (noch) nicht in veröffentlichter Form vorliegen, werden die Beschreibungen bzw. Annahmen mit UBA, BMU und den Fachressorts abgestimmt. In Fällen, in den auf diese Weise keine Informationen verfügbar gemacht werden können, werden Annahmen seitens der Forschungsnehmenden auf Basis von Literatur, vergleichbaren Maßnahmen und Expertenschätzungen getroffen. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die für die Projektionen verwendeten Maßnahmenbeschreibungen und -parametrisierungen ein Höchstmaß an Konsistenz mit Informationen bestehender und geplanter Politiken und Maßnahmen aufweisen.

15.6 Beschreibung der Angleichung mit dem nationalen Inventarsystem

Das nationale System für Politiken und Maßnahmen sowie Projektionen basiert auf dem nationalen System Emissionsinventare.

Artikel 5 des Kyoto-Protokolls verpflichtet alle im Anhang B aufgeführten Vertragsstaaten, ein Nationales System zur Emissionsberichterstattung aufzubauen, das den jeweiligen national verfügbaren Sachverstand in die Erstellung der Treibhausgasinventare einbeziehen soll. Auch in den überarbeiteten Berichterstattungsrichtlinien unter der Klimarahmenkonvention, wie auch gemäß der EU-Verordnung Nr. 525/2013/EU, sind ab 2013 ähnliche Anforderungen zum Aufbau institutioneller Arrangements enthalten.

Die Umsetzung dieser Anforderung erfolgte in Deutschland auf der Grundlage einer Entscheidung der Staatssekretäre der an der Berichterstattung zu beteiligenden Ressorts vom 5. Juni 2007. Zur Erörterung aller zu klärenden Fragen im Rahmen des Nationalen Systems, insbesondere zu Fehlstellen in den Datenströmen, sowie zur offiziellen Freigabe der Inventare und der nach den Artikeln 5, 7 und 8 des Kyoto-Protokolls notwendigen Berichte ist ein Koordinierungsausschuss aller an der Berichterstattung beteiligten Ressorts eingerichtet, der den Prozess der Emissionsberichterstattung begleitet. Die Federführung hat das BMU.

Das Umweltbundesamt, Fachgebiet V 1.6 „Emissionssituation“ ist als die zuständige Nationale Koordinierungsstelle („single national entity“) für die Berichterstattung nach VN-Klimarahmenkonvention und Kyoto-Protokoll benannt. Die Nationale Koordinierungsstelle ist dafür zuständig, das nationale Inventar zu planen und zu erstellen, eine Qualitätskontrolle und -sicherung bei allen relevanten Prozessschritten durchzuführen, auf eine ständige Verbesserung des Inventars hinzuwirken, und die Entscheidungen des Koordinierungsausschusses vorzubereiten. Die Nationale Koordinierungsstelle dient darüber hinaus als zentrale Anlaufstelle und koordiniert und informiert alle Teilnehmer des Nationalen Systems, wie auch die Öffentlichkeit.

Für die jährliche Erstellung des nationalen Emissionsinventars werden Daten zur Berechnung von Emissionsquellen und -senken verwendet, die nach Maßgabe der Anforderungen des Art. 7 Abs. 1-5 der Verordnung 525/2013/EU und des Art. 3 der Durchführungsverordnung 749/2014/EU zur Berechnung der Emissionen in den Quell- und des Abbaus in den Senkengruppen erforderlich sind. Die Zuständigkeiten für die Bereitstellung dieser Daten werden durch den Staatssekretärsbeschluss vom 5. Mai 2007 wie folgt auf die Ressorts verteilt:

Für die Quellgruppe 1 (Energie) ist – mit Ausnahme der Quellgruppen 1.A.3 (Verkehr) und 1.A.5a (Energie: Sonstige), soweit Emittenten der Bundeswehr betroffen sind, – das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie zuständig.

Für die Quellgruppen 2 (Industrieprozesse und Produktverwendungen) ist, mit Ausnahme der Emissionen an fluorierten Gasen, das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie zuständig.

Für die Quellgruppe 1.A.3 (Verkehr) ist das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur zuständig.

Für die Quellgruppe 1.A.5a (Energie: Sonstige) ist, soweit Emittenten der Bundeswehr betroffen sind, das Bundesministerium für Verteidigung zuständig. Soweit Daten der Geheimhaltung unterliegen, werden vom Umweltbundesamt die Erfordernisse der Geheimhaltung berücksichtigt.

Für die Quell- und Senkengruppen 3 (Landwirtschaft) und 4 (Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft) ist das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft zuständig.

Für die Quellgruppe 5 (Abfall), die Emissionen an fluorierten Gasen in den Quellgruppen 2, sowie die Treibhausgas-Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse, ist das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit zuständig.

Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft ist auch für die Erstellung der Tabellen im einheitlichen Berichtsformat nach der Entscheidung 529/2013/EU in den Quell- und Senkengruppen 3 und 4 zuständig.

Grundsätzlich sind für Durchführungsaufgaben der amtlichen Statistik einschließlich Datenlieferung, Qualitätskontrolle, Dokumentation und Archivierung der Daten die nach den einschlägigen Statistikvorschriften bestimmten Behörden zuständig. Die Zusammenarbeit der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder mit den mit der Berichterstattung befassten Stellen erfolgt durch das Statistische Bundesamt. Dabei ist die statistische Geheimhaltung sicherzustellen.

15.7 Beschreibung der Tätigkeiten zur Qualitätssicherung und -kontrolle für die Berichte über Politiken und Maßnahmen sowie über Projektionen

Die Qualitätssicherung und -kontrolle umfasst Transparenz, Vollständigkeit, Robustheit, Richtigkeit und Vergleichbarkeit. Die Qualitätssicherung identifiziert potenzielle Bereiche für Verbesserungen in der zukünftigen Berichterstattung.

Im Verlauf der Projektbearbeitung werden zahlreiche Maßnahmen zur Qualitätskontrolle (quality control (QC)) und zur Qualitätssicherung (quality assurance (QA)) durchgeführt, um die Plausibilität der berechneten Szenarien sicherzustellen. Während der Berechnung der Szenarienergebnisse in den einzelnen Sektoren finden zahlreiche Checks statt, anhand derer sichergestellt werden kann, dass die Modelle fehlerfrei gearbeitet haben und die Ergebnisse entsprechend übergeben werden. Dies umfasst zum einen automatisierte QC-Prozeduren in den einzelnen Modellen, die Berechnungsfehler ausweisen (beispielsweise sofern die Modelloptimierung keine mathematische Lösung finden konnte oder sofern unplausible Werte auftreten (Division durch Null usw.)). Zum anderen werden die Berechnungsergebnisse vor der Weitergabe von den einzelnen Sektorbearbeiterinnen und -bearbeitern geprüft. Darüber hinaus findet eine Qualitätskontrolle bei der Aggregation der Ergebnisse statt, wobei die Vollständigkeit sowie die Plausibilität geprüft werden.

Qualitätssicherung findet insbesondere durch den Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen anderer Projektionsarbeiten (beispielsweise von Politiksznarien-Vorgängerprojekten) statt. Hierbei können wesentliche Änderungen identifiziert werden (beispielsweise deutliche Änderungen der gesamten Stromnachfrage). Diese müssen jeweils erklärbar sein (beispielsweise durch veränderte Annahmen beim Wirtschaftswachstum). Gleichermaßen finden entsprechende Ergebnisvergleiche auch auf aggregierter Ebene (Treibhausgasemissionen) statt, wobei entsprechende Änderungen ebenfalls plausibilisiert werden müssen. Die Diskussion der Ergebnisse mit dem Auftraggeber stellt ebenfalls eine Form der Qualitätssicherung dar.

15.8 Beschreibung des Verfahrens zur Auswahl von Annahmen, methodischen Ansätzen und Modellen für die Erstellung von Projektionen der anthropogenen Treibhausgasemissionen

Zu Beginn der Modellierung schlagen die Forschungsnehmenden auf Grundlage verfügbarer Daten sowie von Expertenwissen sowohl die Parametrisierung für die zu analysierenden Politiken und Maßnahmen als auch die Rahmendaten vor. Danach werden diese mit den betroffenen Bundesressorts abgestimmt (Abschnitt 15.2).

Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit der Bewertung einer Vielzahl einzelner Instrumente und Maßnahmen in unterschiedlichen Quellgruppen ist der Einsatz verschiedener Modelle notwendig, wobei dies sowohl für den Bereich der energiebedingten CO₂-Emissionen als auch für die anderen Treibhausgasemissionen gilt. Die Modelle müssen eine Funktionalität bereitstellen, in denen sowohl

technische Vorgaben (z. B. im Rahmen ordnungsrechtlicher Politiken und Maßnahmen) als auch Veränderungen ökonomischer Rahmenbedingungen (v.a. im Rahmen ökonomischer Instrumente) adäquat und realitätsnah in Veränderungen von Energieverbrauch und Emissionen abgebildet werden können.

Die Projektionen werden mit einem Mix aus verschiedenen, den unterschiedlichen Fragestellungen und Wirkungsmechanismen jeweils am besten entsprechenden, Sektormodellen durchgeführt, wobei die sektoralen Modellergebnisse dann in einem umfassenden Modell integriert werden. Die Konsistenz der Ergebnisse soll dadurch gesichert, Doppelzählungen vermieden und Effekte in den vorgelegten Prozessketten des deutschen Energiesystems adäquat berücksichtigt werden. Soweit der Einsatz von technisch oder ökonomisch getriebenen Simulations- oder Optimierungsmodellen nicht möglich oder sinnvoll ist, sollen die entsprechenden Analysen durch Expertenschätzungen ergänzt werden.

Hinsichtlich der Modellauswahl bzw. der allgemeinen Modellierungsansätze ist auf folgende Aspekte hinzuweisen:

- ▶ Alle verwendeten Modelle bzw. Verfahren können technische Strukturen auf einer Detaillierungsebene abbilden, die mindestens so ausdifferenziert ist, dass ordnungsrechtliche Maßnahmen (Standards etc.) auf der jeweiligen Bezugsebene direkt modelliert werden können. Alle Modelle verfügen dabei über detaillierte Stock-Exchange-Module, die die Erneuerung des Kapitalstocks und die diesbezüglichen Effekte durch ordnungsrechtliche Instrumente realitätsnah abbilden.
- ▶ Alle Sektormodelle unterlegen ein individuelles Entscheidungskalkül, welches die ökonomischen Anreize, die aus Klimaschutzmaßnahmen resultieren, berücksichtigt. Damit können Betriebs-, Produktions- und Investitionsentscheidungen durch veränderte ökonomische Rahmenbedingungen abgebildet werden.
- ▶ Die Modellierung „weicher“ Maßnahmen erfolgt – wo entsprechende Quantifizierungen möglich sind – über sektorangepasste Sonderanalysen.

Der Einsatz von Sektormodellen erlaubt es, sektorspezifische Besonderheiten detailliert zu berücksichtigen. Darüber hinaus erlaubt dieser Ansatz eine transparente und flexible Kombination der Modelle miteinander sowie eine anschließende Integration zu einem Gesamtergebnis. Sektorale Wechselwirkungen werden hierbei weitgehend iterativ abgebildet, was auch die konsistente Erfassung von Effekten übergreifender Instrumente erlaubt.

15.9 Beschreibung der Verfahren für die amtliche Prüfung und Billigung des nationalen Systems jedes Mitgliedstaats für Politiken und Maßnahmen sowie für Projektionen

Das BMU ist die nationale Stelle mit der Gesamtverantwortung für das nationale System für Politiken und Maßnahmen sowie Projektionen.

Das Umweltbundesamt hat die Verantwortung für die Berichterstattung des nationalen Systems für Politiken und Maßnahmen sowie Projektionen.

Das Umweltbundesamt sendet dem BMU den Bericht über das nationale System, bevor er mit den betroffenen Bundesressorts abgestimmt wird.

15.10 Informationen zu relevanten institutionellen, administrativen und verfahrenstechnischen Regelungen für die Umsetzung des national festgelegten Beitrags der EU im Inland oder Änderungen an diesen Regelungen

Zu Deutschlands klimapolitischem Rahmen gehört das Bundes-Klimaschutzgesetz sowie der darin verankerte „Expertenrat für Klimafragen“. Das Bundes-Klimaschutzgesetz soll das Einhalten der Klimaziele der Bundesregierung sicherstellen. Es etabliert ein festes Regelwerk, das greift, sollte sich herausstellen, dass die bisherigen Maßnahmen noch nicht ausreichen. Wenn ein Emissionssektor (Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft) die zulässige Jahresemissionsmenge überschreitet, steht das zuständige Ministerium in der Pflicht, Maßnahmen zur Nachsteuerung vorzulegen.

15.11 Beschreibung der Einbeziehung von Interessenträgern hinsichtlich der Erstellung von Politiken und Maßnahmen sowie von Projektionen

Bei der Abstimmung der zu berücksichtigenden Politiken und Maßnahmen sowie bei der Parametrisierung für die Modellierung sind zahlreiche Ministerien involviert (Abschnitt 15.2). Wo notwendig, werden weitere Institutionen bei der Erarbeitung der Projektionen einbezogen. So werden die Modellierung und die Berichtserstellung für die Sektoren Landwirtschaft und LULUCF vom Thünen-Institut vorgenommen. Des Weiteren werden zur Ableitung zentraler Rahmendaten bzw. Annahmen Informationen von weiteren Institutionen abgefragt. So werden beispielsweise bestimmte Fördersätze bzw. -bedingungen von BAFA oder KfW übernommen.

A Anhang

A.1 Instrumententypen

Tabelle A 1: Klassifikation der Instrumententypen

Instrumententyp		Erläuterung, Beispiele
Ökonomische Instrumente	E	Preis- und mengenpolitische Steuerungsmechanismen: Umweltabgaben-/Steuern, Handelbare Zertifikate, Handelbare Quoten, Tarifpolitik, Marktform/-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)

A.2 Emissionen in der Sektorzuordnung nach CRF-Quellgruppen

Tabelle A 2: Entwicklung der gesamten Emissionen nach CRF-Quellgruppen im MMS, 1990-2040

Sektor	1990	2005	2018	2025	2030	2035	2040
	Mio. t CO ₂ -Äq						
Energiewirtschaft	427,4	379,4	295,2	234,5	185,3	127,9	67,9
Industrie	186,7	115,3	130,1	119,3	106,8	97,5	94,9
GHD	88,4	47,9	39,1	35,0	29,5	23,1	18,1
Haushalte	131,9	112,0	83,7	78,6	66,8	51,0	36,9
Verkehr	165,0	161,5	163,6	152,7	127,6	101,2	79,7
Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	37,7	16,1	8,5	7,0	6,8	6,4	6,0
Industrieprozesse	94,8	75,6	64,8	55,5	47,8	45,7	44,5
Landwirtschaft	79,3	64,2	63,6	61,6	57,3	57,3	57,3
Abfallwirtschaft	38,3	21,3	9,7	6,7	5,0	4,0	3,4
Industrieprozesse	94,8	75,6	64,8	55,5	47,8	45,7	44,5
Gesamt	1.249,5	993,2	858,3	750,9	632,9	514,0	408,7
ggü. 2005			-13,6 %	-24,4 %	-36,3 %	-48,2 %	-58,8 %
ggü. 1990		-20,5 %	-31,3 %	-39,9 %	-49,3 %	-58,9 %	-67,3 %
Nachrichtlich:							
LULUCF	-28,8	-13,4	-26,9	16,9	22,3	23,0	21,9
Internationaler Luft- und Seeverkehr	18,7	30,4	34,7	35,1	36,0	37,1	38,0

Quelle: (UBA 2020a, 2020c), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI und Öko-Institut.

A.3 Bruttostromerzeugung

Tabelle A 3: Bruttostromerzeugung im MMS, 2008-2040

Energieträger	2008	2018	2025	2030	2035	2040
	TWh					
Kernenergie	148,8	76,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	150,6	145,6	111,1	67,8	59,0	0,0
Steinkohle	124,6	82,6	62,3	58,4	0,0	0,0
Erdgas	89,1	82,5	99,7	112,0	106,3	106,9
Mineralöl	9,7	5,2	4,9	3,5	2,5	2,3
Wasserkraft	20,4	18,0	20,9	21,0	21,1	21,2
Windenergie onshore	41,4	90,5	120,8	140,1	190,8	229,2
Windenergie offshore	0,0	19,5	42,7	81,8	131,8	162,7
Photovoltaik	4,4	45,8	66,1	90,3	108,5	115,4
Biomasse ^a	28,0	50,9	45,3	42,1	37,4	35,5
Geothermie	0,0	0,2	0,5	0,7	1,0	1,1
Sonstige	24,5	26,8	21,9	19,7	20,3	19,6
Bruttostromerzeugung	641,5	643,5	596,2	637,4	678,7	694,0
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>0,3 %</i>	<i>-7,1 %</i>	<i>-0,6 %</i>	<i>5,8 %</i>	<i>8,2 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>14,7 %</i>	<i>34,9 %</i>	<i>48,2 %</i>	<i>59,6 %</i>	<i>72,9 %</i>	<i>81,5 %</i>
Stromhandels-saldo ^b	-20,1	-48,7	-17,0	-39,6	-46,7	-20,5
Bruttostromverbrauch	621,4	594,7	579,2	597,8	632,0	673,4
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0 %</i>	<i>-4,3 %</i>	<i>-6,8 %</i>	<i>-3,8 %</i>	<i>1,7 %</i>	<i>8,4 %</i>
<i>Erneuerbarer Anteil</i>	<i>15,2 %</i>	<i>37,8 %</i>	<i>51,2 %</i>	<i>62,9 %</i>	<i>77,6 %</i>	<i>83,9 %</i>

Quelle: (AG Energiebilanzen (AGEB) 2008-2020a, 2008-2020b), Modellrechnungen des Öko-Institut.

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

16 Quellenverzeichnis

50Hertz, Amprion, TenneT, TransnetBW (2017): Prognose der EEG-Umlage 2018 nach EEG, 2017. Online verfügbar unter https://www.netztransparenz.de/portals/1/Content/EEG-Umlage/EEG-Umlage%202017/20171016_Ver%c3%b6ffentlichung_EEG-Umlage_2018.pdf.

50Hertz, Amprion, TenneT, TransnetBW (2018): Prognose der EEG-Umlage 2019 nach EEG, 2018. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/portals/1/2019-10-15%20Ver%c3%b6ffentlichung%20EEG-Umlage%202020.pdf>.

50Hertz, Amprion, TenneT, TransnetBW (2019): Prognose der EEG-Umlage 2020 nach EEG, 2019. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/portals/1/2019-10-15%20Ver%c3%b6ffentlichung%20EEG-Umlage%202020.pdf>.

50Hertz, Amprion, TenneT, TransnetBW (2020): Prognose der EEG-Umlage 2021 nach EEG, 2020. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/portals/1/Content/EEG-Umlage/EEG-Umlage%202021/2020-10-15%20Ver%c3%b6ffentlichung%20EEG-Umlage%202021.pdf>.

adelphi (2018): Klimaschutz und soziale Belange lokal denken, Vier Handlungsfelder für die erfolgreiche Ausgestaltung sozialverträglichen Klimaschutzes auf kommunaler Ebene. Unter Mitarbeit von Schneller, A. und Kahlenborn, W. (Policy Paper 02/2018), 2018. Online verfügbar unter <https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/Policy%20Paper%20ZWEI%20-%20Klimaschutz%20und%20soziale%20Belange%20lokal%20denken%20-%20Onlinevero%CC%88ffentlichung.pdf>, zuletzt geprüft am 26.06.2018.

adelphi; IREES (2017): Analyse der Entwicklung des Marktes und Zielerreichungskontrolle für gesetzlich verpflichtende Energieaudits, Schlussbericht an das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Online verfügbar unter <https://www.adelphi.de/de/projekt/evaluierung-der-auditpflicht-nach-dem-energiesdienstleistungsgesetz>.

AGEB - AG Energiebilanzen (2008-2020a). Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Jahre 2008-2018. 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, Stand 2019 für das Jahr 2017, Stand 2020 für das Jahr 2018. AG Energiebilanzen, 2008-2020. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2018.html>.

AGEB - AG Energiebilanzen (2008-2020b). Satellitenbilanz Erneuerbare Energien, Jahre 2000-2018. 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, Stand 2019 für das Jahre 2017, Stand 2020 für das Jahr 2018. AG Energiebilanzen, 2008-2020. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2018.html>.

AGEB (2021): Stromerzeugung nach Energieträgern 1990 - 2020, Stand Februar 2021, 2021. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/4-0-Arbeitsgemeinschaft.html>.

Agora (Hg.) (2015): Öko-Institut. Die Entwicklung der EEG-Kosten bis 2035, Wie der Erneuerbaren-Ausbau entlang der langfristigen Ziele der Energiewende wirkt. Berlin, 2015.

Agora Energiewende; Wuppertal Institut (2019). Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Agora Energiewende; Wuppertal Institut, 2019. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 28.11.2019.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (Hg.) (2020): AGEB. Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2019, Stand September 2020, 2020. Online verfügbar unter <https://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>.

BAFA (Hg.) (2020): IZT; Öko-Institut. Evaluation der Maßnahme "Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen", Zusammenfassung, 2020.

BBR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hg.) (2015): BBSR. Wohnungsmarktprognose 2030. Bonn, 2015.

BDEW - Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hg.) (2016). Strompreisanalyse Mai 2016 - Haushalte und Industrie, 2016.

BITKOM - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (2008): Die Zukunft der digitalen Consumer Electronics. Berlin, 2008.

BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hg.) (2014): Öko-Institut. Quantifizierung der Maßnahmen für das Aktionsprogramm Klimaschutz 2020, 2014. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/2208/2014-754-de.pdf>, zuletzt geprüft am 16.01.2017.

BMUB (Hg.) (2013): Bundesregierung. Projektionsbericht 2013 gemäß Entscheidung 280/2004/EG, 2013.

BMVI (2018): Verkehr in Zahlen 2018/2019. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_2018-pdf.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 05.08.2020.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016): BMWi. Zahlen und Fakten Energiedaten. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin, 2016.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (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.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020a). Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin, Juni 2020. Online verfügbar unter <https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>, zuletzt geprüft am 10.05.2021.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020b): Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus), zuletzt geprüft am 11.08.2020.

BMWi (2021a): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 1990-2020, Februar 2021. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html, zuletzt aktualisiert am 16.03.2021.

BMWi (2021b): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 1990-2020, Februar 2021. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html, zuletzt aktualisiert am 16.03.2021.

BMWi (Hg.) (2020c). Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan, 10.06.2020. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/integrierter-nationaler-energie-klimaplan.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 26.06.2020.

BMWi; BMF (2020): Gesamtwirtschaftliches Produktionspotenzial und Konjunkturkomponenten, Datengrundlagen und Ergebnisse der Schätzungen der Bundesregierung. Stand: Herbstprojektion der Bundesregierung vom 30. Oktober 2020, 2020. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gesamtwirtschaftliches-produktionspotenzial-herbst-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2019): Flächenentwicklungsplan 2019 für die deutsche Nord- und Ostsee. Hamburg, Rostock, 2019. Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/_Anlagen/Downloads/Offshore/FEP/Flaechenentwicklungsplan_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=9.

Bundesbank (Hg.) (2020): Bundesbank. Perspektiven der deutschen Wirtschaft für die Jahre 2020 bis 2022 (Monatsbericht, 15), Juni 2020. Online verfügbar unter <https://www.bundesbank.de/resource/blob/834276/8fd4a5ab552c6179e4982f459b6d108c/mL/2020-06-projektion-data.pdf>.

Bundesfinanzministerium (2015): BMF. 25. Subventionsbericht - Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Finanzhilfen des Bundes und der Steuervergünstigungen für die Jahre 2013 bis 2016. Bundesfinanzministerium. Berlin, 2015.

Bundesgesetzblatt.

Bundesgesetzblatt.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2017): Testreferenzjahre, 2017. Online verfügbar unter https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/TRY_node.html.

Bundeskartellamt (2017): Sektoruntersuchung Zement und Transportbeton, 2017.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Bundesministerium der Finanzen (Hg.) (2020): BMWi; BMF. Gesamtwirtschaftliches Produktionspotenzial und Konjunkturkomponenten, Datengrundlagen und Ergebnisse der Schätzungen der Bundesregierung. Stand: Frühjahrsprojektion der Bundesregierung vom 29. April 2020, 2020. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wirtschaftliche-entwicklung.html>.

Bundesnetzagentur (2015): Bundesnetzagentur, B. Monitoringbericht 2015. Bundesnetzagentur, 2015.

Bundesnetzagentur (2020a): Genehmigung des Szenariorahmens 2021-2035, 2020. Online verfügbar unter https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmen_2035_Genehmigung_0.pdf.

Bundesnetzagentur (2020b): Kraftwerksstilllegungsanzeigenliste der Bundesnetzagentur, Stand: 15.04.2020, 2020. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/KWSAL/KWSAL_2020_02.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

Bundesnetzagentur (2020c): Marktstammdatenregister, Stromerzeugungseinheiten. Stand 10. Januar 2020, 2020. Online verfügbar unter <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/OeffentlicheEinheitenuebersicht>.

Bundesnetzagentur (2021): Kraftwerksliste Bundesnetzagentur (bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen), Stand 19.01.2021, 2021. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/Kraftwerksliste_2021_1.xlsx?__blob=publicationFile&v=4.

Bundesregierung (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Neuauflage 2016, 2016.

Bundesregierung (2017). Projektionsbericht 2017 für Deutschland, gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Bundesregierung, 2017. 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): Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung, Ziele und Maßnahmen für den Ladeinfrastrukturaufbau bis 2030, 2019. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/masterplan-ladeinfrastruktur.html>.

Bundesregierung (2019b): 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/envxnw7wq/.

Bundesregierung (2020): Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften (Drucksache 19/23482), 2020. Online verfügbar unter <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/19/234/1923482.pdf>.

Bundestag (2020): Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung (Kohleverstromungsbeendigungsgesetz - KVVG). Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/kvvg/KVVG.pdf>, zuletzt geprüft am 01.10.2020.

CEMCAP (2018): CEMCAP study. Online verfügbar unter <https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/>.

Dechema (2019): Roadmap Chemie 2050, 2019.

Destatis - Statistisches Bundesamt (2019a): 14. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung - Basis 2018, 2019. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/aktualisierung-bevoelkerungsvorausberechnung.html>.

Destatis (Hg.) (2019b): Destatis. Wohnen in Deutschland, Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018, 2019. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html>.

Deutscher Bundestag (2019a): Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG), Vom 12. Dezember 2019. In: *Bundesgesetzblatt* 2019 (Teil I Nr. 50).

Deutscher Bundestag (2019b): Gesetz zur weiteren steuerlichen Förderung der Elektromobilität und zur Änderung weiterer steuerlicher Vorschriften. Fundstelle: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2019 Teil I Nr. 48, zuletzt geprüft am 10.04.2020.

Deutscher Bundestag (2021): Entwurf eines Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgaserminderungs-Quote. Online verfügbar unter <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/274/1927435.pdf>, zuletzt geprüft am 23.04.2021.

Deutscher Bundestag: Achstes Gesetz zur Änderung des Bundesfernstraßengesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften, FStrG. Fundstelle: Bundesgesetzblatt Teil I Nr. In: Bundesgesetzblatt, zuletzt geprüft am 10.08.2020.

Deutscher Bundestag: Drittes Gesetz zur Änderung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes, GVFG. In: Bundesgesetzblatt, zuletzt geprüft am 18.06.2020.

Deutscher Bundestag: Fünftes Gesetz zur Änderung des Regionalisierungsgesetzes, RegG. In: Bundesgesetzblatt, zuletzt geprüft am 18.06.2020.

Deutscher Bundestag: Gesetz zur Änderung des Luftverkehrsteuergesetzes. In: Bundesgesetzblatt Teil I Nr 48. Online verfügbar unter http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl119s2492.pdf, zuletzt geprüft am 10.08.2020.

Deutscher Bundestag: Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 im Steuerrecht. In: Bundesgesetzblatt, zuletzt geprüft am 18.06.2020.

Deutscher Bundestag: Zweites Gesetz zur Umsetzung steuerlicher Hilfsmaßnahmen zur Bewältigung der Corona-Krise (Zweites Corona-Steuerhilfegesetz), Zweites Corona-Steuerhilfegesetz. In: Bundesgesetzblatt. Online verfügbar unter http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl120s1512.pdf, zuletzt geprüft am 11.08.2020.

Diekmann, J.; Eichhammer, W.; Rieke, H.; Schlomann, B.; & Ziesing, H. J. (1999): Energie-Effizienz-Indikatoren, Statistische Grundlagen, theoretische Fundierung und Orientierungsbasis für die politische Praxis. Heidelberg: Physica.

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, 2014. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10419/95950>.

DWD (2017): Projektbericht Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse, 2017. Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/try-projektbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

EC - European Commission (2020a). Impact Assessment Accompanying the document Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Stepping up Europe's 2030 climate ambition. Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. Commission Staff Working Document (SWD(2020) 176 final Part 1/2). European Commission. Brussels, 17.09.2020. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:749e04bb-f8c5-11ea-991b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 17.02.2021.

EC (2020b): Amended proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law), 2020/0036 (COD), zuletzt geprüft am 10.05.2021.

eceee summer study proceedings (Hg.) (2015): Fleiter, T.; Braungardt, S.; Sohaib, T.; Schломann, B.; Eichhammer, W.; Elsland, R.; Kranzl, L.; Jakob, M. Assessing the impact of the EU Ecodesign Directive on a member state level. Presqu'île de Giens, France, 2015.

EEA (2020). EU Emissions Trading System (ETS) data viewer. Activity code 29 Production of cement clinker. EEA, 2020. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1>, zuletzt geprüft am 21.09.2020.

EEG 2021: Bundesregierung. Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3138) geändert worden ist, EEG 2021, Fassung vom Zuletzt geändert durch Art. 6 G v. 08.08.2020 I 1818.

EIA - Energy Information Administration (2020). Annual Energy Outlook 2020, with projections to 2050. Energy Information Administration. Washington, DC, 29.01.2020. Online verfügbar unter <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2020%20Full%20Report.pdf>, zuletzt geprüft am 04.09.2020.

Elsland, R. (2016): Long-term energy demand in the German residential sector. Baden-Baden.

ENTSO-E; ENTSO-G (2018): TYNDP 2018, Scenario Report, 2018. Online verfügbar unter https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/tyndp-documents/TYNDP2018/Scenario_Report_2018_Final.pdf.

EU 2019/631 (2019): European Parliament; European Council. 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.

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>.

EU-Kommission (2020): Durchführungsbeschluss (EU) 2020/2126 der Kommission vom 16. Dezember 2020 zur Festlegung der jährlichen Emissionszuweisungen an die Mitgliedstaaten für den Zeitraum 2021 bis 2030 gemäß der Verordnung (EU) 2018/842 des Europäischen Parlaments und des Rates. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32020D2126>, zuletzt geprüft am 15.03.2021.

EuP Preparatory Studies Lot 10 (2008): Residential room conditioning appliances (airco and ventilation). Final Report., 2008. Online verfügbar unter <http://www.ecoaircon.eu/>.

Europäische Kommission (2012): Verordnung (EU) Nr. 601/2012 der Kommission vom 21. Juni 2012 über die Überwachung von und die Berichterstattung über Treibhausgasemissionen gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, konsolidierte Fassung vom 1.1.2019, Fassung vom 2019. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1556792879944&uri=CELEX:02012R0601-20190101>, zuletzt geprüft am 30.04.2019.

Europäische Kommission (2018): Durchführungsverordnung (EU) 2018/2066 der Kommission vom 19. Dezember 2018 über die Überwachung von und die Berichterstattung über Treibhausgasemissionen gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 601/2012 der Kommission. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R2066&from=EN>, zuletzt geprüft am 30.04.2019.

European Commission (2018): Impacts of Technological Innovations for the Innovation Fund, 2018.

European Commission (2020): Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2021, Version after consultation of WG2 under the Climate Change Committee, 30 June 2020, 2020.

European Union (2018): EC - European Commission. The 2018 Ageing Report, Economic and budgetary projections for the 28 EU Member States (2013-2060). European Union, 2018. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/economy-finance/ip079_en.pdf.

Eurostat (2020): Komplette Energiebilanzen [NRG_BAL_C], Teildatensatz: Endenergieverbrauch - Sonstige Sektoren - Landwirtschaft - energetischer Verbrauch [FC_OTH_AF_E], Deutschland (bis 1990 früheres Gebiet der BRD) [DE], Eurostat. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_bal_c/default/table?lang=de, zuletzt geprüft am 25.11.2020.

EWI; Prognos; GWS (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Projekt Nr. 57/12.

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften des Karlsruher Institut of Technology (Hg.) (2015): Biere, D. Modellgestützte Szenario-Analyse der langfristigen Erdgasnachfrageentwicklung der deutschen Industrie, Dissertation. Karlsruhe, 2015.

Fichtner et al. (2019): Evaluation des Marktanzreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2015 bis 2018, 2019.

Fleiter, T.; Fehrenbach, D.; Worrell, E.; Eichhammer, W. (2012a): 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, T.; Gruber, E.; Eichhammer, W.; Worrell, E. (2012b): The German energy audit program for firms - a cost-effective way to improve energy efficiency? In: *Energy Effic.* 5 (4), S. 447–469.

Fleiter, T.; Hirzel, S.; Jakob, M.; Barth, J.; Quandt, L.; Reitze, F.; Toro, F. (Hg.) (2010). Electricity demand in the European service sector: a detailed bottom-up estimate by sector and by end-use (Konferenzband der IEECB, 13-14.04.2010). Frankfurt, 2010.

Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Herbst, A.; Elsland, R.; Klingler, A.-L.; Manz, P.; Eidelloth, S. (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, T.; Schlomann, B.; Eichhammer, W. (Hg.) (2013): Energieverbrauch und CO2 Emissionen industrieller Prozesstechniken - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

FörderRL energieeffiziente Nfz (2018): BMVI. 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.

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Hg.) (2018): Klingler, A.-L.; Elsland, R.; Stute, J.; Klobasa, M. Mittelfristprognose zur deutschlandweiten Stromabgabe an Letztverbraucher für die Kalenderjahre 2019 bis 2023, 2018.

Fraunhofer ISI; Fraunhofer IFAM; Prognos; ifeu - ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; HfWU (Hg.) (2014): Fraunhofer ISI; Fraunhofer IFAM; Prognos; ifeu - ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; HfWU. Ausarbeitung von Instrumenten zur Realisierung von Endenergieeinsparungen in Deutschland auf Grundlage einer Kosten-/Nutzen-Analyse. Wissenschaftliche Unterstützung bei der Erarbeitung des Nationalen Aktionsplans Energieeffizienz (NAPE). Zusammenfassung. Karlsruhe, 2014.

Fraunhofer ISI; IfE; TU München; GfK Retail and Technology GmbH; IREES; BASE-ING GmbH (2013): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010, 2013.

Fraunhofer ISI; ifeu - ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Prognos; SUER (2020): Methodikleitfaden für Evaluationen von Energieeffizienzmaßnahmen des BMWi (Projekt Nr. 63/15 – Aufstockung), Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie., 2020. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/methodik-leitfaden-fuer-evaluationen-von-energieeffizienzmassnahmen.pdf?__blob=publicationFile.

Fraunhofer ISI; IREES; GfK; IfE (2015): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013, Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), zuletzt geprüft am 16.11.2017.

Fraunhofer ISI; Prognos; ifeu - ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Stiftung Umweltenergieecht (2019): Evaluierung und Weiterentwicklung des Energieeffizienzfonds, Projekt Nr. 63/15 im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Abschlussbericht - Langfassung, 2019. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/evaluierung-und-weiterentwicklung-des-energieeffizienzfonds.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 02.04.2020.

Fraunhofer IZM (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland: Abschlussbericht., 2015.

Fraunhofer IZM; Borderstep (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland, Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

Fraunhofer Verlag (2014): Schломann, B.; Steinbach, J.; Kleeberger, H.; Geiger, B.; Pich, A.; Gruber, E.; Mai, M.; Schiller, W.; Gerspacher, A. Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) für die Jahre 2004 bis 2006. Fraunhofer Verlag. Stuttgart, 2014.

GfK - Gesellschaft für Konsumforschung (2002-2010): GfK Retail Panel Haushaltsgeräte Deutschland 1998-2008 – Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschine, Kühlschrank, Gefrierschrank, Kochen und Klimaanlage. Nürnberg, 2002-2010.

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, 2004.

Hibscher, C. W.; Davis, D. H.; Davies, P. R.; Davies, M. P. (2005): TECO: a designer's insight into all-electric melting. In: *Glass Machinery Plants & Accessories* (2), S. 85–91. Online verfügbar unter <https://d1y0n40rzg7wgx.cloudfront.net/uploads/documents/A-Designers-Insight-into-All-Electric-Melting.pdf?mtime=20180928082423&fo-cal=none>.

ICCT (2020a): Dornoff, J.; Tietge, U.; Mock, P. On the way to "real-world" CO₂ values: The European passenger car market in its first year after introducing the WLTP. ICCT, Mai 2020. Online verfügbar unter https://theicct.org/sites/default/files/publications/On-the-way-to-real-world-WLTP_May2020.pdf, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

ICCT (2020b): Plötz, P.; Moll, C.; Bieker, G.; Mock, P.; Li, Y. Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles, Fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions. ICCT, September 2020. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/PHEV_ICCT_FraunhoferISI_white_paper.pdf, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

IEA - International Energy Agency (2017). World Energy Outlook 2017. International Energy Agency. Paris, 2017.

IEA - International Energy Agency (2018). World Energy Outlook 2018. International Energy Agency. Paris, 2018.

IEA - International Energy Agency (2019). World Energy Outlook 2019. International Energy Agency. Paris, 2019.

IEA - International Energy Agency (2020). World Energy Outlook 2020. International Energy Agency. Paris, 2020.

ifeu - ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (2015): Dünnebeil, F.; Reinhard, C.; Lambrecht, U.; Kies, A.; Hausberger, S.; Rexeis, M. Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminde rung bei schweren Nutzfahrzeugen (TEXTE 32/2015). ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau, 2015. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/zukuenftige-massnahmen-zur-kraftstoffeinsparung>.

ifeu - ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Transport & Environment; Öko-Institut (2020): Plug-in hybrid electric cars: Market development, technical analysis and CO₂ emission scenarios for Germany. Unter Mitarbeit von Jöhrens, J.; Räder, D.; Kräck, J.; Mathieu, L.; Blanck, R. et al., 2020. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/PHEV-Report-Market-Technology-CO2.pdf>, zuletzt geprüft am 30.04.2021.

infras (2012): Peter, M.; Bertschmann-Aeppli, D.; Zandonella, R.; Maibach, M. 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. infras. Zürich, 2012. Online verfügbar unter http://www.infras.ch/media/filer_public/d3/de/d3de69df-a4d9-4d4c-9367-60237b62b815/wirkunglvs_sb_infras_270612_zusammenfassung.pdf.

Institut für System- und Innovationsforschung - Fraunhofer IZM (Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration), Fraunhofer ISI (2009): Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Studie im Auftrag des BMWi. Berlin, Karlsruhe, 2009.

IPCC (2006a): 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., 2006. Online verfügbar unter <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, zuletzt geprüft am 09.06.2021.

IPCC (2006b): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hg. v. Simon Eggleston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara und Kiyoto Tanabe. Japan: IGES. Online verfügbar unter <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.

IPCC (Hg.) (2007): IPCC. Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf, zuletzt geprüft am 26.11.2020.

IREES; adelphi (2017): Analyse der Entwicklung des Marktes und Zielerreichungskontrolle für gesetzlich verpflichtende Energieaudits, Institut für Ressourcen- und Energieeffizienzstrategien. Karlsruhe.

IREES; Fraunhofer ISI (2010): Evaluierung des Förderprogramms "Energieeffizienzberatung" als Komponente des Sonderfonds "Energieeffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU)". Karlsruhe, 2010.

IREES; Fraunhofer ISI (2014): Evaluation des Förderprogramms „Energieberatung im Mittelstand“. Unter Mitarbeit von Michael Mai; Edelgard Gruber; Edith Holländer; Annette Roser; Andreas Gerspacher et al. Karlsruhe, 2014.

IWU - Institut Wohnen und Umwelt (2010): Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K.-D. Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt, 2010.

IWU - Institut Wohnen und Umwelt (2018): Cischinsky, H.; Diefenbach, N. Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 - Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand (1. Aufl.). Institut Wohnen und Umwelt, 2018.

IWU; Fraunhofer IFAM (2018): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2017, 2018.

Jaccard, M. (2005): Hybrid energy-economy models and endogenous technological change. In: Loulou, R.; Waaub, J.-P. und Zaccour, G. (Hg.): Energy and Environment. New York: Springer, S. 81–109.

Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hg.) (2019): Schmidt, T.; Schneider, F.; Leverenz, D.; Hafner, G. Lebensmittelabfälle in Deutschland – Baseline 2015 (Thünen Report 71). Braunschweig, 2019. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ernaehrung/WvL/TI-Studie2019_Lebensmittelabfaelle_Deutschland-Langfassung.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 06.04.2020.

Kuramochi, T.; Ramírez, A.; Turkenburg, W.; Faaij, A. (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.

Lufthansa - Deutsche Lufthansa AG (Hg.) (2020a). Geschäftsbericht 2019, Nachhaltig Wert schaffen. Köln, 2020. Online verfügbar unter <https://investor-relations.lufthansagroup.com/fileadmin/downloads/de/finanzberichte/geschaeftsberichte/LH-GB-2019-d.pdf>, zuletzt geprüft am 25.05.2021.

Lufthansa - Deutsche Lufthansa AG (Hg.) (2020b). Nachhaltigkeit 2019, Factsheet. Köln, 2020. Online verfügbar unter <https://www.lufthansagroup.com/media/downloads/de/verantwortung/LH-Factsheet-Nachhaltigkeit-2019.pdf>, zuletzt geprüft am 25.05.2021.

Minnich, L.; Mottschall, M. (2019): Innovative und systematische Ansätze für mehr Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr, 10.04.2019. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oeko-doc/Schlussbericht-Energieeffizienz-OEPNV.pdf>, zuletzt geprüft am 22.04.2021.

Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T.; Heide, D.; Luca de Tena, D.; Trieb, F.; Scholz, Y.; Nienhaus, K.; Gerhardt, N.; Sterner, M.; Trost, T.; von Oehsen, A.; Schwinn, R. et al. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Online verfügbar unter <http://elib.dlr.de/76043>, zuletzt geprüft am 30.01.2017.

Nordenholz, F.; Winkler, C.; Knörr, W. (2016): Verkehrsverlagerungspotential auf den Schienenpersonenverkehr in Deutschland, 2016, zuletzt geprüft am 11.04.2020.

NPM, AG 1 - Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 1 (2020). Werkstattbericht Alternative Kraftstoffe, Klimawirkungen und Wege zum Einsatz Alternativer Kraftstoffe. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 1. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.). Berlin, 2020. Online verfügbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_AK.pdf.

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 & Forwind (2016): Erstellung generischer EE-Strom-Einspeisezeitreihen mit unterschiedlichem Grad an fluktuierendem Stromangebot, 15.11.2016. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/aktuelles/2016/daten-zur-einspeisung-erneuerbarer-energien/>.

Öko-Institut (2017): Hermann, H.; Greiner, B.; Matthes, F. C.; Cook, V. Die deutsche Braunkohlenwirtschaft, Historische Entwicklungen, Ressourcen, Technik, wirtschaftliche Strukturen und Umweltauswirkungen. Studie im Auftrag von Agora Energiewende und der European Climate Foundation. Öko-Institut. Berlin, Mai 2017. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/Deutsche_Braunkohlenwirtschaft/Agora_Die-deutsche-Braunkohlenwirtschaft_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 11.01.2021.

Öko-Institut (Hg.) (2020): Hacker, F.; Blanck, R.; Görz, W. StratON Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge, Endbericht. Unter Mitarbeit von Öko-Institut; HHN; Fraunhofer IAO und ITP, 2020.

Öko-Institut, Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Prof. Dr. Stefan Klinski (2017): UBA. Klimaschutz im Stromsektor 2030 - Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung, Endbericht (Climate Change, 02/2017). Öko-Institut, Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Prof. Dr. Stefan Klinski. Dessau-Roßlau, 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.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI - Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (2015). Klimaschutzszenario 2050, 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Öko-Institut; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung. Berlin, 18.12.2015. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>, zuletzt geprüft am 29.07.2018.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2020): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms, 4. Quantifizierungsbericht (2019), 2020. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/umsetzung-aktionsprogramm-klimaschutz-2020-begleitung-der-umsetzung-der-massnahmen-des-aktionsprogramms>.

Öko-Institut; ifeu - ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; FFU Berlin; Hochschule Karlsruhe; Prognos; Ziesing, H.-J.; Klinski, Stefan (2017): Evaluierung der Nationalen Klimaschutzinitiative, Evaluierungszeitraum 2012-2014, 2017. Online verfügbar unter https://www.klimaschutz.de/sites/default/files/Gesamtbericht_NKI-Evaluierung_2012-2014.pdf.

Öko-Institut; ISI - Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung; IREES - Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (2020): Harthan; Ralph O.; Repenning, J.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C. et al. 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“)" (Climate Change, 33/2020). Öko-Institut; Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung; Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien. Dessau-Roßlau, Oktober 2020. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-03-19_cc_33-2020_klimaschutzprogramm_2030_der_bundesregierung.pdf, zuletzt geprüft am 31.05.2021.

Öko-Institut; ISI, F. (2018): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 - Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms, 2. Quantifizierungsbericht. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/APK-2020-Quantifizierungsbericht-2017-final.pdf>, zuletzt geprüft am 09.07.2018.

Öko-Recherche; Öko-Institut (2015): Gschrey, B.; Schwarz, W.; Kimmel, T.; Zeiger, B.; Jörß, W.; Schumacher, K.; Cludius, J. Maßnahmen zur Verbesserung der Marktdurchdringung klimafreundlicher Technologien ohne halogenierte Stoffe vor dem Hintergrund der Revision der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (Climate Change, 6/2015). Öko-Recher-

che; Öko-Institut. Umweltbundesamt (Hg.), 2015. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_06_2015_massnahmen_zur_verbesserung_der_marktdurchdringung.pdf, zuletzt geprüft am 16.01.2017.

OVG NRW (2021). Urteil vom 4.3.2021 - 21 B 1162/20, 21 B 1162/20. OVG NRW, 2021.

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 et al. (2016): Methanol synthesis using captured CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental assessment, 2016.

Perez-Fortes; Tzimas (2016): Techno-economic and environmental evaluation of CO₂ utilisation for fuel production, 2016.

Planco - PLANCO Consulting GmbH; bfg - Bundesanstalt für Gewässerkunde (2007). Verkehrswirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße, Schlussbericht. PLANCO Consulting GmbH; Bundesanstalt für Gewässerkunde. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost (Hg.). Essen, 2007. Online verfügbar unter https://www.bafg.de/DE/08_Ref/U1/02_Projekte/05_Verkehrstraeger/verkehrstraeger_lang.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 25.05.2021.

Platts (2018): World Electric Power Plants Database, Europe, 2018. Online verfügbar unter <https://www.spglobal.com/platts/pt/products-services/electric-power/world-electric-power-plants-database>.

Prognos (Hg.) (2014): Prognos. Ermittlung der Förderwirkungen des KfW-Energieeffizienzprogramms für den Förderjahrgang 2012. Unter Mitarbeit von Thamling, N.; Weinert, K. und Hoch, M. Berlin, 2014.

Prognos et al. (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050, Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030, 2020. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=8.

PWC (2018): Evaluierung der Förderprogramme Energieberatung im Mittelstand und Energieberatung für Nicht-Wohngebäude in Kommunen und gemeinnützigen Organisationen, PWC. Frankfurt.

PWC (2019): Evaluation der Energieberatung für Wohngebäude, 2019.

Ramboll Management Consulting A/S (Hg.) (2020): Le Don, X.; Porteron, S.; Collin, C.; Sorensen, L.; Herbst, A.; Rehfeldt, M.; Pfaff, M.; Hirschnitz-Garbers, M.; Velten, E. K. The decarbonisation benefits of sectoral circular economy actions, 2020. Online verfügbar unter <https://ramboll.com/-/media/files/rm/rapporteur/methodology-and-analysis-of-decarbonization-benefits-of-sectoral-circular-economy-actions-17032020-f.pdf?la=en>.

Rehfeldt, M.; Fleiter, T.; Worrell, E. (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.

Rodriguez, F. (2019): CO₂ standards for heavy-duty vehicles in the European Union, Februar 2019, zuletzt geprüft am 03.04.2020.

Rubin, E. S.; Davidson, J. E.; Herzog, H. (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.

significance; CE Delft (2010): de Jong, G.; Schrotten, A.; van Essen, H.; Otten, M.; Bucci, P. Price sensitivity of European road freight transport – towards a better understanding of existing results. significance; CE Delft, 2010, zuletzt geprüft am 04.10.2016.

Spinoni, J.; Vogt, J. V.; Barbosa, P.; Dosio, A.; McCormick, N.; Bigano, A.; Füssel, H.-M. (2018): Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100. In: *International Journal of Climatology* 38, S. 191–208. DOI: 10.1002/joc.5362.

Statistisches Bundesamt (2008): Kless, S.; Veldues, B. Auszug aus Wirtschaft und Statistik: Ausgewählte Ergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen in Deutschland 2005. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 2008.

StBA - Statistisches Bundesamt (2010): Produktionsdatenbank (Prodcum). Wiesbaden, 2010. Online verfügbar unter <http://www.eds-destatis.de/de/theme4/prodcum.php>.

StBA (2014), 2014. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsgueter/Tabellen/Haushaltsgeraete_D.html;jsessionid=C31652E6733135B52042C3DE401DC823.cae4#tab221342No1.

StBA (2017): 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.

StBA: Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes, Fachserie 4, Reihe 4.3, Statistisches Bundesamt.

Steinbach, J. (2015): Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Online verfügbar unter <https://www.verlag.fraunhofer.de/bookshop/buch/Modellbasierte-Untersuchung-von-Politikinstrumenten-zur-Foerderung-erneuerbarer-Energien-und-Energieeffizienz-im-Gebaeudebereich/245046>.

SteinkohleFinG (2015): Deutscher Bundestag. Gesetz zur Finanzierung der Beendigung des subventionierten Steinkohlenbergbaus zum Jahr 2018, SteinkohleFinG, Fassung vom 31.08.2015. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/steinkohlefin/index.html>, zuletzt geprüft am 23.02.2017.

Thünen-Institut - Johann Heinrich von Thünen-Institut (2020a): Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Dämmgen, U.; Döring, U.; Wulf, S.; Eurich-Menden, B.; Freibauer, A.; Döhler, H.; Schreiner, C.; Osterburg, B.; Fuß, R. Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2018 : report on methods and data (RMD) Submission 2020, Thünen Rep 77. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig, 2020. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn062152.pdf.

Thünen-Institut - Johann Heinrich von Thünen-Institut (2020b): Haß, M.; Banse, M.; Deblitz, C.; Freund, F.; Geibel, I.; Gocht, A.; Kreins, P.; Laquai, V.; Offermann, F.; Osterburg, B.; Pelikan, J.; Rieger, J.; Rösemann, C. et al. Agrarökonomische Projektionen für Deutschland, Thünen Rep. 82. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig, 2020. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn062723.pdf.

TNO (2018): Support for preparation of the impact assessment for CO2 emissions standards for Heavy Duty Vehicles, 2018, zuletzt geprüft am 16.04.2020.

UBA - Umweltbundesamt (2018): UBA. Zentrales System Emissionen (ZSE), Datenauspielung, Stand Januar-Submission 2018. Umweltbundesamt, 2018.

UBA - Umweltbundesamt (2020a). Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018, Umweltbundesamt - UNFCCC-Submission. Umweltbundesamt, 2020.

UBA - Umweltbundesamt (2020b): UBA. Zentrales System Emissionen (ZSE). Datenauspielung, Stand 01.09.2020. Umweltbundesamt, 2020.

UBA - Umweltbundesamt (2020c): UBA. Zentrales System Emissionen (ZSE). Datenauspielung, Stand 01.09.2020. Umweltbundesamt, 2020.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2010): Barthel, C.; Franke, M.; Müller, P.; Dittmar, C. Analyse der Vorstudien für Wohnungslüftung und Klimageräte, Veröffentlichung im Rahmen des Projektes "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes) Arbeitspaket 14, 2010.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2011a): Knörr, W.; Heidt, C.; Schacht, A.; Mottschall, M.; Schmied, M.; Leppler, S. Aktualisierung der Emissionsfaktoren und Verkehrsleistungen von Binnenschiffen und Übertragung ins TREMOD-Programm. FKZ 363 01 403, 2011, zuletzt geprüft am 14.04.2020.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2015): UBA. Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen. Unter Mitarbeit von Cuhls, C.; Mähl, B. und Clemens, J. (Texte, 39/2015). Dessau, 2015.

UBA (2011b): Projektionen zu den Emissionen von HFKW, FKW und SF6 für Deutschland bis zum Jahr 2050 (Climate Change, 21/2011), 2011. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4226.pdf>, zuletzt geprüft am 16.01.2017.

UBA (2020d): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018, Umweltbundesamt - UNFCCC-Submission, 2020.

UBA (2021): Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020. 15.03.2021. Dessau, 2021. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/2021_03_10_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx.

Umweltbundesamt (Hg.) (2019): UBA. BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). Unter Mitarbeit von Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Wern, B.; Pertagnol, J. et al. (115/2019). Dessau, 2019.

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., 2014.

Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas (2020): NEP-Gas-Datenbank, Ausbaumaßnahmen, 2020 NEP Entwurf. Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.nep-gas-datenbank.de/app#!/ausbaumaassnahmen>, zuletzt aktualisiert am 21.09.2020.

Vermittlungsausschuss (2019): Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 im Steuerrecht, Abgeschlossene Vermittlungsverfahren. Ergebnis, 2019.

Vogl; Ahman; Nilsson (2018): Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking, 2018.

WIFO - Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (2009): Puwein, W. Preise und Preiselastizitäten im Verkehr (Wifo Monatsberichte, 10/2009). Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, 2009. Online verfügbar unter https://www.wifo.ac.at/jart/prj3/wifo/resources/person_dokument/person_dokument.jart?publikationsid=37126&mime_type=application/pdf, zuletzt geprüft am 25.05.2021.

WindSeeG (2020): Bundesregierung. Windenergie-auf-See-Gesetz vom 13. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2258, 2310), das zuletzt durch Artikel 19 des Gesetzes vom 21. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3138) geändert worden ist, WindSeeG, Fassung vom Zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 25.05.2020 I 1070, Änderung durch Art. 1 G v. 03.12.2020 I 2682 ist berücksichtigt.

ZVEI (2006-2009): Zahlenspiegel des deutschen Elektro-Hausgerätemarktes 2005-2008. Frankfurt, 2006-2009.

