

CLIMATE CHANGE

39/2023

Projektionsbericht 2023 für Deutschland

Gemäß 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 sowie §10 (2) des Bundes-Klimaschutzgesetzes

von:

Ralph O. Harthan, Hannah Förster (beide Projektleitung), Kerstin Borkowski, Hannes Böttcher, Sibylle Braungardt, Veit Bürger, Lukas Emele, Wolf Kristian Görz, Klaus Hennenberg, Luca Lena Jansen, Wolfram Jörß, Peter Kasten, Charlotte Loreck, Sylvie Ludig, Felix Chr. Matthes, Roman Mendelevitch, Lorenz Moosmann, Christian Nissen, Julia Repenning, Margarethe Scheffler, Inia Steinbach, Malte Bei der Wieden, Kirsten Wiegmann
Öko-Institut, Berlin, Freiburg, Darmstadt

Heike Brugger, Tobias Fleiter, Tim Mandel, Matthias Rehfeldt, Clemens Rohde, Songmin Yu
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Jan Steinbach, Jana Deurer
IREES GmbH, Karlsruhe

Roland Fuß, Joachim Rock, Bernhard Osterburg, Sebastian Rüter, Sascha Adam, Karsten Dunger, Claus Rösemann, Wolfgang Stümer, Bärbel Tiemeyer, Cora Vos
Thünen-Institut, Braunschweig, Hamburg, Eberswalde

Herausgeber:
Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 39/2023

Forschungsplan des Bundesministeriums für Wirtschaft
und Klimaschutz

Forschungskennzahl 3722 41 511 0

FB001241

Projektionsbericht 2023 für Deutschland

Gemäß 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 sowie §10 (2) des Bundes-Klimaschutzgesetzes

von

Ralph O. Harthan, Hannah Förster (beide Projektleitung), Kerstin Borkowski, Hannes Böttcher, Sibylle Braungardt, Veit Bürger, Lukas Emele, Wolf Kristian Görz, Klaus Hennenberg, Luca Lena Jansen, Wolfram Jörß, Peter Kasten, Charlotte Loreck, Sylvie Ludig, Felix Chr. Matthes, Roman Mendelevitch, Lorenz Moosmann, Christian Nissen, Julia Repenning, Margarethe Scheffler, Inia Steinbach, Malte Bei der Wieden, Kirsten Wiegmann

Öko-Institut, Berlin, Freiburg, Darmstadt

Heike Brugger, Tobias Fleiter, Tim Mandel, Matthias Rehfeldt, Clemens Rohde, Songmin Yu
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Jan Steinbach, Jana Deurer
IREES GmbH, Karlsruhe

Roland Fuß, Joachim Rock, Bernhard Osterburg, Sebastian Rüter, Sascha Adam, Karsten Dunger, Claus Rösemann, Wolfgang Stümer, Bärbel Tiemeyer, Cora Vos

Thünen-Institut, Braunschweig, Hamburg, Eberswalde

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Öko-Institut
Borkumstr. 2
13189 Berlin

Abschlussdatum:

August 2023

Redaktion:

Umweltbundesamt
Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie
Kai Wehnmann, Karlotta Schultz, (Kirsten op de Hipt - Layout)

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, 3. Auflage; aktualisierte Fassung Dezember 2023

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

Kurzbeschreibung: Projektionsbericht 2023 für Deutschland

Der deutsche Projektionsbericht 2023 beschreibt die projizierte Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland in einem Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) sowie in einem Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS). Der abgedeckte Zeitraum ist 2021 bis 2050. 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 MMS im Zeitraum 1990 bis 2030 eine projizierte Minderung um 63 %, und bis 2050 wird eine Minderung von 83 % projiziert. Im MWMS wird bis 2030 eine Minderung von 65 % bis 2030 und von 87 % bis 2050 gegenüber 1990 projiziert. Im MMS werden damit die Minderungszielvorgaben des Bundesklimaschutzgesetzes bis 2030 kumuliert um rund 331 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente verfehlt. Im MWMS sinkt die Zielverfehlung auf 194 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente.

Es gibt mehrere Haupttreiber der projizierten Emissionsentwicklung: Zum einen werden die erneuerbaren Energien stark ausgebaut. So erhöht sich beispielsweise der erneuerbare Anteil am Bruttostromverbrauch bis 2030 in beiden Szenarien auf über 80 %. Zum anderen führen Energieeffizienz- und Energieeinsparmaßnahmen zu deutlich niedrigeren End- und Primärenergieverbräuchen. Darüber hinaus gibt es Maßnahmen, um die nicht mit Energieverbräuchen zusammenhängenden Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

Um Abweichungen der Ergebnisse durch veränderte Annahmen besser abschätzen zu können, wurden insgesamt sechs Sensitivitätsanalysen durchgeführt. In diesen wurden die Parameter für Wirtschaftswachstum, den Brennstoff- und EU-ETS-Preisen, BEHG-Preisen und dem Grad der Biomassenutzung verändert.

Abstract: Projection Report 2023 for Germany

The German Projection Report 2023 describes the projected development of greenhouse gas emissions in Germany in a 'With existing measures' Scenario (MMS) as well as in a 'With additional Measures' Scenario (MWMS). The period covered is 2021 to 2050. The report follows the requirements of Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action.

For total GHG emissions (excluding land use, land use change and forestry), the MMS results in a projected reduction of 63 % from 1990 to 2030, and a reduction of 83 % is projected by 2050. The MWMS projects a reduction of 65 % by 2030 and 87 % by 2050 compared to 1990. In the MMS the mitigation targets of the Federal Climate Change Act are projected to not be met by 2030. The cumulative deviation from the target is projected at 331 million tons of CO₂ equivalent. Considering also additional measures the cumulative deviation from the target is projected to be reduced to 194 million tons of CO₂ equivalent.

There are several main drivers of the projected emissions development: On the one hand, renewable energies are strongly expanded. For example, the renewable share of gross electricity consumption increases to over 80 % in both scenarios by 2030. On the other hand, energy efficiency and energy saving measures lead to significantly lower final and primary energy consumption. In addition, there are measures to reduce greenhouse gas emissions not related to energy consumption.

In order to be able to better estimate deviations in the results due to changed assumptions, a total of six sensitivity analyses were carried out. In these, the parameters for economic growth,

fuel and EU-ETS prices, BEHG prices (national carbon pricing) and the degree of biomass use were changed.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	19
Zusammenfassung.....	22
Summary	28
Kernindikatoren.....	34
1 Einleitung.....	55
2 Methodischer Ansatz.....	57
2.1 Prozess der Projektionserstellung.....	57
2.2 Definition und Abgrenzung der Sektoren	57
2.3 Methodischer Ansatz für die Emissionsprojektionen	61
2.4 Berücksichtigung des Ukraine-Krieges in den Projektionen	63
2.5 Abgrenzung der Szenarien	64
2.5.1 Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS).....	64
2.5.2 Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS)	65
2.5.3 Überblick über die in den Szenarien berücksichtigten Instrumente	65
3 Gesamtergebnisse.....	72
3.1 Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren	73
3.2 Treibhausgasemissionen in EU-ETS, ESR und nEHS	76
3.3 Sensitivitätsanalysen.....	79
3.3.1 Wirtschaftswachstum	80
3.3.2 Brennstoff- und ETS-Preise	81
3.3.3 BEHG-Preise	84
3.3.4 Nutzung von Biomasse.....	89
3.4 Primärenergieverbrauch	90
3.4.1 Primärenergieverbrauch nach Energieträgern	90
3.4.2 Verbrauch an Biomassebrennstoffen und potenzieller Importbedarf	92
3.5 Endenergieverbrauch.....	97
3.6 Nachfrage nach strombasierten Brennstoffen (E-Fuels)	100
3.7 Bruttostromverbrauch	101
3.8 Strom- und Wärmeerzeugung	106
4 Energiewirtschaft	122
4.1 Zentrale Ergebnisse.....	122

4.2	Instrumentenbewertung.....	129
4.3	Sektorspezifische Parameter & Annahmen	134
5	Industrie	142
5.1	Zentrale Ergebnisse.....	142
5.2	Instrumentenbewertung.....	150
5.2.1	Beschreibung und Modellierung der Instrumente	150
5.2.1.1	MMS.....	152
5.2.1.2	MWMS	163
5.2.2	Instrumentenwirkung	165
5.3	Sektorspezifische Parameter & Annahmen	170
5.3.1	Annahmen zu Preiserwartungen/Preisvoraussicht	170
5.3.2	Annahmen zur Entwicklung der Produktionsmengen	171
5.3.3	Neue Produktionsverfahren: Diffusion und Differenzkosten	172
5.3.4	Annahmen zur Differenzkostenberechnung.....	180
6	Gebäude	183
6.1	Zentrale Ergebnisse.....	183
6.2	Instrumentenbewertung.....	191
6.3	Sektorspezifische Parameter & Annahmen	198
7	Verkehr	201
7.1	Zentrale Ergebnisse.....	201
7.2	Instrumentenbewertung.....	210
7.3	Sektorspezifische Parameter & Annahmen	215
8	Landwirtschaft.....	217
8.1	Zentrale Ergebnisse.....	217
8.2	Instrumentenbewertung.....	224
8.3	Sektorspezifische Parameter & Annahmen	227
9	Abfallwirtschaft	229
9.1	Zentrale Ergebnisse.....	229
9.2	Instrumentenbewertung.....	231
9.3	Sektorspezifische Parameter & Annahmen	232
10	LULUCF	234
10.1	Zentrale Ergebnisse.....	234
10.2	Instrumentenbewertung.....	237
10.3	Sektorspezifische Parameter & Annahmen	242

11	Quellenverzeichnis	243
A	Anhang	253
A.1	Datenanhang mit Kernindikatoren	253
A.2	Rahmenannahmen.....	253
A.3	Instrumente	253
A.4	Methodik.....	254
A.4.1	Energiewirtschaft.....	254
A.4.2	Industrie	256
A.4.3	Gebäude.....	260
A.4.4	Verkehr	262
A.4.5	Landwirtschaft	263
A.4.6	Abfallwirtschaft.....	264
A.4.7	LULUCF	265
A.4.8	Ergebnisintegration.....	267
B	Anhang	270
B.1	Zusätzliche Informationen zur ESR	270

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland zwischen 2021 und 2050 im MMS und MWMS (ohne LULUCF)	22
Figure 2:	Development of greenhouse gas emissions in Germany between 2021 and 2050 in MMS and MWMS (without LULUCF)	28
Abbildung 3:	Modellübersicht zur Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen	62
Abbildung 4:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland zwischen 2021 und 2050 im MMS und MWMS (ohne LULUCF)	73
Abbildung 5:	Kumulierte Zielerreichung / -verfehlung der KSG-Sektoren im MMS und MWMS, 2023-2030	75
Abbildung 6:	Projektion der Treibhausgasemissionen im ESR und gesamt, 2021 bis 2030	76
Abbildung 7:	Komponentenanalyse für die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen (MWMS)	80
Abbildung 8:	Preispfade Steinkohle	82
Abbildung 9:	Preispfade Erdgas	82
Abbildung 10:	Preispfade Rohöl	83
Abbildung 11:	Preispfade EU-ETS	83
Abbildung 12:	Preispfade BEHG	87
Abbildung 13:	ESR-Emissionen im MWMS und BEHG-Sensitivitäten	88
Abbildung 14:	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS und MWMS, 2019-2050	91
Abbildung 15:	Veränderung des Primärenergieverbrauchs im MWMS gegenüber dem MMS, 2030	92
Abbildung 16:	Projizierter Verbrauch an Biomassebrennstoffen und potenzieller Importbedarf in den Jahren 2030 und 2045 im MMS und MWMS	96
Abbildung 17:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS und MWMS, 2019-2050	99
Abbildung 18:	Veränderung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern im MWMS gegenüber dem MMS, Jahr 2030	100
Abbildung 19:	Projizierte Nachfrage und Bereitstellung von Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im MMS und MWMS, Jahr 2030	101
Abbildung 20:	Veränderung des Bruttostromverbrauchs im MWMS gegenüber dem MMS, 2030	106
Abbildung 21:	Nettostromerzeugung im MMS, 2023-2050	112
Abbildung 22:	Nettostromerzeugung im MWMS, 2023-2050	114

Abbildung 23:	Bereitstellung netzgebundener Wärme (einschließlich Industrie-KWK und BHKW) in MMS und MWMS, 2019-2050	116
Abbildung 24:	CO ₂ -Emissionen der Kraftwerke nach Energieträgern im MMS, 2019-2050.....	117
Abbildung 25:	CO ₂ -Emissionen der Kraftwerke nach Energieträgern im MWMS, 2019-2050.....	119
Abbildung 26:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft.....	122
Abbildung 27:	Entwicklung des Energieverbrauchs in Anlagen der übrigen Energiewirtschaft im MMS	125
Abbildung 28:	Entwicklung des Energieverbrauchs in Anlagen der übrigen Energiewirtschaft im MWMS	126
Abbildung 29:	Installierte Leistung der Kohlekraftwerke im MMS.....	135
Abbildung 30:	Entwicklung der projizierten Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie.....	144
Abbildung 31:	Endenergiebedarf Industriesektor (AGEB-Definition)	148
Abbildung 32:	Strombedarf nach Anwendungsbereichen (AGEB-Definition)	149
Abbildung 33:	Wasserstoffnutzung (stofflich und energetisch)	150
Abbildung 34:	Annahmen zu Produktionsmengen ausgewählter Produkte .	172
Abbildung 35:	Verfahren der Rohstahlerzeugung bis 2050 im MMS und MWMS.....	173
Abbildung 36:	CO ₂ -Abscheidung in MMS und MWMS	174
Abbildung 37:	Verfahren der Ethylenherstellung bis 2050 im MMS	175
Abbildung 38:	Energieträgernutzung in der Prozesswärmeerzeugung im MMS	176
Abbildung 39:	Differenzkosten für wasserstoffbasierte Chemieprodukte im MMS	177
Abbildung 40:	Differenzkosten für CCS-Anwendungen in MMS	178
Abbildung 41:	Differenzkosten elektrifizierten Glasschmelzens im MMS.....	179
Abbildung 42:	Differenzkosten für wasserstoffbasierte Stahlerzeugung im MMS	180
Abbildung 43:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude	183
Abbildung 44:	Endenergieverbrauch des Gebäudesektors nach Anwendungsgruppe im MMS und MWMS.....	186
Abbildung 45:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser im MMS und MWMS.....	187
Abbildung 46:	Entwicklung der installierten Wärmeversorgungssysteme im MMS und MWMS	189
Abbildung 47:	Erreichte Sanierungstiefe im MMS und MWMS in den Jahren 2020 bis 2040	190

Abbildung 48:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse im Gebäudesektor im MMS und MWMS191
Abbildung 49:	Minderungswirkung der Instrumente des MMS im Jahr 2030 im Vergleich zu den Sektoremissionen 2021 (Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser).....195
Abbildung 50:	Minderungswirkung der Instrumente des MWMS im Jahr 2030 im Vergleich zum MMS (Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser).....198
Abbildung 51:	Entwicklung der Heizgradtage im Zeitraum 2018 bis 2050....200
Abbildung 52:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr202
Abbildung 53:	Antriebsverteilung der Pkw-Neuzulassungen in MMS/MWMS205
Abbildung 54:	Entwicklung des Pkw-Bestands in MMS/MWMS206
Abbildung 55:	Antriebsverteilung der Lkw-Neuzulassungen >12t in MMS und MWMS.....207
Abbildung 56:	Personenverkehrsnachfrage in MMS und MWMS.....208
Abbildung 57:	Güterverkehrsnachfrage in MMS und MWMS.....209
Abbildung 58:	Entwicklung des Endenergiebedarfs in MMS und MWMS.....210
Abbildung 59:	Beiträge der Instrumente zur Treibhausgasminderung 2030 in MMS und MWMS214
Abbildung 60:	Verlauf der EU-CO ₂ -Standards für Pkw.....216
Abbildung 61:	Entwicklung der projizierten Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft im Vergleich zu den Zielen/Werten im KSG ..218
Abbildung 62:	Entwicklung der Tierbestände im MMS221
Abbildung 63:	Entwicklung der Stickstoffausbringung im MMS.....222
Abbildung 64:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Sektors Landwirtschaft nach Energieträger zwischen 2019 und 2050 im MMS und MWMS223
Abbildung 65:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft229
Abbildung 66:	Projizierte Entwicklung der Nettobilanz des LULUCF-Sektors ohne Maßnahmen (OMS), mit Maßnahmen (MMS) und mit weiteren Maßnahmen (MWMS)235
Abbildung 67:	Projizierte Entwicklung der Flächennutzung im MMS236
Abbildung 68:	Überblick des Modells FORECAST-Industry258
Abbildung 69:	Struktur des Simulationsmodells Invert/ee-Lab.....261
Abbildung 70:	Struktur von ENUSEM und Interaktion mit anderen Modellen267

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Vergleich der Szenarien, 2019-2050.....	24
Tabelle 2:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Sektoren mit Jahresemissionsmengen im Vergleich der Szenarien, 2019-2050	25
Tabelle 3:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den Sektoren LULUCF, internationaler Luft- und Seeverkehr im Vergleich der Szenarien, 2019-2050	26
Tabelle 4:	Entwicklung der Treibhausgasemission im Vergleich der Szenarien, 2023-2050	34
Tabelle 5:	Wesentliche Rahmendaten, 2023-2050	36
Tabelle 6:	Entwicklung energiebezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050	37
Tabelle 7:	Entwicklung von Nachfrage und Produktion neuer Treib- und Brennstoffe im Vergleich der Szenarien, 2023-2050.....	37
Tabelle 8:	Entwicklung energiewirtschaftsbezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050.....	39
Tabelle 9:	Entwicklung industriebezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050	42
Tabelle 10:	Entwicklung gebäudebezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050	44
Tabelle 11:	Entwicklung verkehrsbezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050	47
Tabelle 12:	Entwicklung landwirtschaftsbezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2025-2050.....	51
Tabelle 13:	Entwicklung abfallwirtschaftsbezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050.....	53
Tabelle 14:	Entwicklung LULUCF-bezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050	53
Tabelle 15:	Zuordnung von CRF-Kategorien zu KSG-Sektoren und zur Inventarstruktur laut UNFCCC und Governance-Verordnung ..	60
Tabelle 16:	Überblick über die in MMS und MWMS berücksichtigten Instrumente und Maßnahmen	66
Tabelle 17:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren in ausgewählten Jahren zwischen 2019 und 2050 im MMS und MWMS.....	74
Tabelle 18:	Entwicklung der kumulierten Treibhausgasemissionen ab 2023	75
Tabelle 19:	EU-ETS- und ESR-Emissionen im MMS, 2005-2050	78
Tabelle 20:	EU-ETS- und ESR-Emissionen im MWMS, 2005-2050	79
Tabelle 21:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnungen 1 und 2 (MWMS).....	81

Tabelle 22:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnungen 3 und 4 (MWMS).....	84
Tabelle 23:	BEHG-Preise MWMS und Sensitivitäten.....	85
Tabelle 24:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnung 5a bis 5d (MWMS)	88
Tabelle 25:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnung 6 (MMS)	89
Tabelle 26:	Projizierter Verbrauch von Biomassebrennstoffen nach Sektoren in den Jahren 2030 und 2045 im MMS und MWMS.	93
Tabelle 27:	Projizierter Verbrauch an Biomassebrennstoffen nach Herkunft und potenzieller Importbedarf in den Jahren 2030 und 2045 im MMS und MWMS	95
Tabelle 28:	Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im MMS und MWMS, 2019-2050.....	97
Tabelle 29:	Bruttostromverbrauch im MMS in TWh, 2008-2050	103
Tabelle 30:	Bruttostromverbrauch im MWMS in TWh, 2008-2050.....	105
Tabelle 31:	Bruttostromverbrauch, Bruttostromerzeugung der erneuerbaren Energien und Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch.....	106
Tabelle 32:	Installierte Nettonennleistung im MMS, 2019-2050.....	108
Tabelle 33:	Installierte Nettonennleistung im MWMS, 2019-2050	109
Tabelle 34:	Nettostromerzeugung im MMS, 2019-2050	111
Tabelle 35:	Nettostromerzeugung im MWMS, 2019-2050.....	113
Tabelle 36:	Elektrolyseurleistung, Wasserstoffproduktion und -importe sowie Stromproduktion in Wasserstoffkraftwerken im MMS, 2025-2050.....	115
Tabelle 37:	Elektrolyseurleistung, Wasserstoffproduktion und -importe sowie Stromproduktion in Wasserstoffkraftwerken im MWMS, 2025-2050.....	115
Tabelle 38:	Aufteilung der CO ₂ -Emissionen der Kraftwerke auf Energiewirtschaft und Industrie im MMS in Mio. t CO ₂ -Äq., 2019 bis 2050	117
Tabelle 39:	Aufteilung der CO ₂ -Emissionen der Kraftwerke auf Energiewirtschaft und Industrie im MWMS in Mio. t CO ₂ -Äq., 2019 bis 2050	119
Tabelle 40:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Kraftwerke zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien	120
Tabelle 41:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS	123
Tabelle 42:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS.....	124

Tabelle 43:	Entwicklung der Emissionen von Anlagen der übrigen Energiewirtschaft zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien	127
Tabelle 44:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MMS, 1990-2050	128
Tabelle 45:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MWMS, 1990-2050.....	128
Tabelle 46:	Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien	129
Tabelle 47:	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im MMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung	130
Tabelle 48:	Installierte Leistung erneuerbarer Energien in GW in der kontrafaktischen Entwicklung	131
Tabelle 49:	Stromerzeugung erneuerbarer Energien in TWh in der kontrafaktischen Entwicklung	131
Tabelle 50:	Direkte Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente im MMS	132
Tabelle 51:	Umsetzung und Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung im MWMS.....	133
Tabelle 52:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen pro Jahr für ausgewählte Instrumente im MWMS	134
Tabelle 53:	Bruttozubau von Erdgas-KWK-Kraftwerken im MMS in MW _{el}	136
Tabelle 54:	Installierte elektrische Leistung der Wasserstoffkraftwerke in GW	136
Tabelle 55:	Installierte Elektrolyseurleistung für H ₂ - und PtL-Produktion in GW im MMS und MWMS	137
Tabelle 56:	Installierte Leistung der Batteriespeicher in GW im MMS und MWMS.....	138
Tabelle 57:	Nettostromerzeugung aus Abfall	138
Tabelle 58:	Installierte Leistung neuer Fernwärmeerzeugung in GW im MMS	139
Tabelle 59:	Neue Fernwärmeerzeugung in TWh in MMS	139
Tabelle 60:	Installierte Leistung neuer Fernwärmeerzeugung in GW im MWMS.....	140
Tabelle 61:	Neue Fernwärmeerzeugung in TWh in MWMS.....	140
Tabelle 62:	Wasserstoff in Raffinerien in TWh, 2019 bis 2050	141
Tabelle 63:	Entwicklung der projizierten Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS	145

Tabelle 64:	Entwicklung der projizierten Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS.....	146
Tabelle 65:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien	147
Tabelle 66:	Übersicht der Instrumente in den Sektoren Industrie (IND) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD): Methodik und Annahmen zu Überschneidungs- und Mitnahme- bzw. Übertragungseffekten	151
Tabelle 67:	Budgetverteilung der Förderprogramme im MMS	153
Tabelle 68:	Minderungswirkungen der Einzelinstrumente im Bündel „Instrumente zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren Förderprogramme"	154
Tabelle 69:	Minderungswirkung der Instrumente auf die Treibhausgasemissionen im Industriesektor für MMS und MWMS (ggü. kontrafaktischer Entwicklung).....	165
Tabelle 70:	Wirkung der Instrumente auf den Strombedarf im Industriesektor für MMS und MWMS (ggü. kontrafaktischer Entwicklung)	167
Tabelle 71:	Wirkung der Instrumente auf den Brennstoffbedarf im Industriesektor für MMS und MWMS (ggü. kontrafaktischer Entwicklung)	168
Tabelle 72:	Wirkung der Instrumente auf den Endenergiebedarf im Industriesektor für MMS und MWMS (ggü. kontrafaktischer Entwicklung)	169
Tabelle 73:	Annahmen zu CAPEX der durch Förderprogramme adressierten Technologien	181
Tabelle 74:	Annahmen zur OPEX-Differenzkostenberechnung	182
Tabelle 75:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS.....	184
Tabelle 76:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS	184
Tabelle 77:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien	185
Tabelle 78:	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im MMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung	192
Tabelle 79:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente im MMS (ohne Wirkungen auf Umwandlungssektor, Bilanzraum Gebäude)	194
Tabelle 80:	Umsetzung und Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung im MWMS.....	196

Tabelle 81:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen pro Jahr für ausgewählte Instrumente im MWMS gegenüber dem MMS (ohne Wirkungen auf Umwandlungssektor) (Bilanzraum Gebäude)197
Tabelle 82:	Vergleich der Anzahl privater Haushalte verschiedener Quellen199
Tabelle 83:	Entwicklung der Bevölkerung sowie absolute und relative Entwicklung der spezifischen Wohnfläche199
Tabelle 84:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS202
Tabelle 85:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS203
Tabelle 86:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien203
Tabelle 87:	Bündelung der Instrumente im MMS211
Tabelle 88:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente im Verkehrssektor (MMS)212
Tabelle 89:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente im Verkehrssektor (MWMS)213
Tabelle 90:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS219
Tabelle 91:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS219
Tabelle 92:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien220
Tabelle 93:	Entwicklung der energetischen Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2050 im MMS und MWMS223
Tabelle 94:	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im MMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung224
Tabelle 95:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente des Landwirtschaftssektors im MMS225
Tabelle 96:	Umsetzung und Annahmen für die Bewertung der Instrumente im Landwirtschaftssektor im MWMS226
Tabelle 97:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente des Landwirtschaftssektors im MWMS227

Tabelle 98:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS und MWMS.....	230
Tabelle 99:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstige zwischen 1990 und 2050.....	231
Tabelle 100:	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im MMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung	232
Tabelle 101:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente des Abfallsektors im MMS	232
Tabelle 102:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor LULUCF nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS.....	236
Tabelle 103:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor LULUCF nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS	237
Tabelle 104:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor LULUCF zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien	237
Tabelle 105:	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im LULUCF-Sektor im MMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung	238
Tabelle 106:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen pro Jahr für ausgewählte Instrumente im LULUCF-Sektor im MMS	239
Tabelle 107:	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im LULUCF-Sektor im MWMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung	240
Tabelle 108:	Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen pro Jahr für ausgewählte Instrumente im LULUCF-Sektor im MWMS (Zusatzwirkung zum MMS*)	241
Tabelle 109:	Klassifikation der Instrumententypen	253
Tabelle 110:	Branchenstruktur von FORECAST-Industry (angelehnt an AGEB)	259
Tabelle 111:	ESR-Emissionen im MMS und MWMS, 2021 bis 2030	271
Tabelle 112:	Für den ESR-Zielpfad genutzte Daten, in Mio. t CO ₂ -Äq.....	271
Tabelle 113:	Treibhausgasemissionen im MMS in EU-ETS, ESR und nEHS nach KSG-Sektoren in Mio. t CO ₂ -Äq.	272
Tabelle 114:	Treibhausgasemissionen im MWMS in EU-ETS, ESR und nEHS nach KSG-Sektoren in Mio. t CO ₂ -Äq.	273

Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BesAR	Besondere Ausgleichsregelung
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (engl.: Battery Electric Vehicle)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BWS	Bruttowertschöpfung
CCfD	Carbon Contracts for Difference
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CCS	Carbon Capture and Storage
CH ₄	Methan
CNG	Verdichtetes Erdgas (engl.: Compressed Natural Gas)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq	CO ₂ -Äquivalente
CRF	Common Reporting Format
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DOC	Degradable Organic Carbon
E-Bus/ -Pkw/ -Lkw	Elektrobus/ -Pkw/ -Lkw
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
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
EV	Elektrofahrzeug (engl.: Electric Vehicle)
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (engl.: Fuel Cell Electric Vehicle)
FKW	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
Gt	Gigatonne
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde
GWP	Global Warming Potential
GuD	Gas und Dampf
H ₂	Wasserstoff (engl. Hydrogen)
HFKW	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland

KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KSPr 2030	Klimaschutzprogramm 2030
KVBG	Kohleverstromungsbeendigungsgesetz
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Autogas (engl.: Liquefied Petroleum Gas)
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
MAC	Mobile Air Condition (Systems)
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
MiD	Mobilität in Deutschland
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
MWMS	Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario
N ₂ O	Lachgas (Distickstoffmonoxid)
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
PtL	Power to Liquid
PV	Photovoltaik

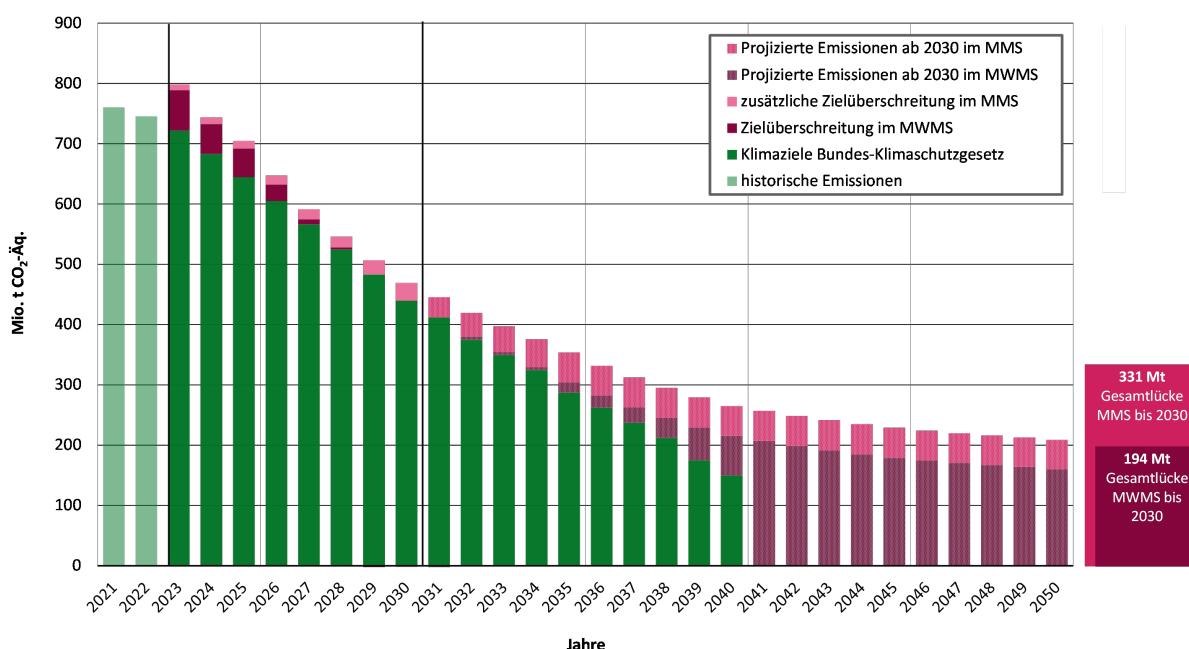
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
StBA	Statistisches Bundesamt
TCO	Gesamtbetriebskosten (engl.: Total Cost of Ownership)
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
TWh	Terawattstunde
TYNDP	Ten Year Network Development Plan
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	United Nations Framework Conference on Climate Change
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

Zusammenfassung

Hinweis

Es wird darauf hingewiesen, dass Projektionen nicht als Prognose kommender Jahre missverstanden werden dürfen. Für Projektionen werden Modelle eingesetzt, die eine langjährige, plausible Emissionsentwicklung unter den Bedingungen und Annahmen zum Start des Modellierungszeitpunktes projizieren. Auftretende Sondereffekte und unvorhergesehene, kurzfristige Ereignisse, wie z.B. vergangenes Jahr die Energiekrise, sind methodisch nicht oder nur begrenzt integrierbar. Vor diesem Hintergrund sollte eine Betrachtung zeitnaher Projektionsjahre nicht losgelöst erfolgen.

Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland zwischen 2021 und 2050 im MMS und MWMS (ohne LULUCF) ¹



Quelle: Modellierung: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut; Inventardaten: (UBA 2023a), (UBA 2023b).

Deutschland hat sich mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) einen gesetzlichen Rahmen für seine Klimaschutzziele gegeben. Bis 2030 sollen die Treibhausgasemissionen um mindestens 65 % gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 reduziert werden. Dieses Ziel wurde in Sektorziele heruntergebrochen. Bis zum Jahr 2040 sollen die Treibhausgasemissionen um 88 % reduziert werden und bis zum Jahr 2045 soll Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden.

Im Projektionsbericht 2023 werden zwei Szenarien beschrieben: Das Mit-Maßnahmen-Szenarien (MMS) modelliert und analysiert die Wirkung bereits implementierter und beschlossener Klimaschutzinstrumente. Das zweite Szenario ist das Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS), in dem zusätzlich von der Bundesregierung geplante Klimaschutzinstrumente berücksichtigt werden.

Die Projektion erfolgt entlang der im KSG definierten Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Sonstiges sowie Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF). Die für Deutschland relevanten Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs werden modelliert und nachrichtlich ausgewiesen.

¹ Detaillierte, jährliche Daten sowie Kernindikatoren sind im Anhang A.1 zu finden.

Bis zum Jahr 2030 wird durch die bestehenden Maßnahmen eine Emissionsreduktion von knapp 63 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 projiziert, die sich durch die zusätzlichen Maßnahmen im MWMS auf gut 65 % erhöht. Bis zum Jahr 2050 projiziert das MMS eine Emissionsreduktion von gut 83 % und das MWMS gut 87 %. Im Jahr 2045 stehen im MMS Gesamtemissionen in Höhe von 229 Mio. t CO₂-Äq. einer Emissionssenke des LULUCF-Sektors in Höhe von 17 Mio. t CO₂-Äq. gegenüber. Im MWMS reduzieren sich die Gesamtemissionen 2045 auf knapp 179 Mio. t CO₂-Äq. und die LULUCF-Senke erhöht sich auf knapp 22 Mio. t CO₂-Äq. Das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045 wird also in beiden Szenarien deutlich verfehlt.

Szenarien, die in das Jahr 2050 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 durch einzelne Ressorts erstellt wurden, können im Einzelnen zu abweichenden Ergebnissen kommen.

Für die einzelnen Sektoren wird gemäß der vorliegenden Forschungsarbeit eine heterogene Entwicklung projiziert:

In der Energiewirtschaft geschieht der Großteil der Emissionsreduktionen bereits bis zum Jahr 2030. Dies liegt vor allem am vorgezogenen Kohleausstieg und dem starken Ausbau der erneuerbaren Energien. Nach 2030 verlangsamt sich die Emissionsreduktion deutlich. Im MMS haben die erneuerbaren Energien 2030 einen Anteil von 86 % am Bruttostromverbrauch. Im MWMS führen die zusätzlichen Maßnahmen zu einem deutlich höheren Stromverbrauch, daher liegt der erneuerbare Anteil am Bruttostromverbrauch im Jahr 2030 in diesem Szenario mit 83 % etwas niedriger.

In der Industrie sinken die Emissionen zwischen 2022 und 2030 im MMS um 23 % und im MWMS um 27 %. Die wirkmächtigsten Instrumente sind die Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren, der EU-Emissionshandel und das Maßnahmenbündel zur Steigerung der Energieeffizienz. Dennoch überschreiten in beiden Szenarien die projizierten jährlichen Emissionen die im KSG festgelegten Jahresemissionsmengen für alle Jahre von 2023 bis 2030.

Im Gebäudesektor wird die Lücke zum KSG-Zielpfad in beiden Szenarien durch politische Instrumentierung und hohe Energiepreise infolge des Ukraine-Krieges gegenüber dem letzten Projektionsbericht 2021 deutlich reduziert. Für das MWMS wird eine ambitionierte Umsetzung der Beschlüsse des Koalitionsvertrags angenommen, insbesondere die Nutzungspflicht von 65 % Erneuerbaren Energien bei neueingebauten Heizungen. Dadurch wird der Phase-Out der fossilen Wärmeerzeuger in Gebäuden eingeleitet – zugunsten von Wärmepumpen, Fernwärme und Biomassenutzung. Dadurch erreicht der Gebäudesektor im MWMS für das Jahr 2030 beinahe das KSG-Sektorziel.

Im Verkehr werden die Ziele des KSG bis 2030 jährlich verfehlt und es baut sich im MMS eine Emissionsminderungslücke in der Höhe von 210 Mio. t CO₂-Äq. auf, die sich durch die vorgeschlagenen Maßnahmen im MWMS auf 187 Mio. t CO₂-Äq. verringert. Der Pkw-Bestand weist im MMS im Jahr 2030 8,2 Mio. batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) auf und bleibt daher hinter der Zielgröße von 15 Mio. BEV im Jahr 2030 im Pkw-Bestand zurück.²

² Andere Studien und Abfragen, die im Auftrag der Bundesregierung durch einzelne Ressorts durchgeführt wurden, weisen im Ergebnis einen signifikant höheren Pkw-Bestand im Jahr 2030 von BEV auf. Dies ist auf Unterschiede in den Annahmen, Methoden und verwendeten Datenquellen zurückzuführen.

Im KSG-Sektor Landwirtschaft werden die Ziele des KSG in beiden Szenarien deutlich übererfüllt. Zum einen führen zurückgehende Tierbestände und geringere Stickstoff-Ausbringungsmengen zu sinkenden Emissionen. Zum anderen führten methodische Verbesserungen in der Berechnung im Treibhausgasinventar dazu, dass sowohl für historische Jahre als auch in der Projektion die Emissionen der Landwirtschaft deutlich niedriger liegen.³

Die Emissionen im KSG-Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges reduzieren sich bis 2030 deutlich. Gründe dafür sind eine Ausweitung der Maßnahmen zur Deponiebelüftung, der optimierten Gaserfassung sowie der Reduktion der Lebensmittelabfälle. Das Sektorziel für das Jahr 2030 von 5 Mio. t CO₂-Äq. wird jedoch um knapp 1 Mio. t CO₂-Äq. überschritten. Betrachtet man den gesamten Zeitraum 2023 bis 2030 ergibt sich hingegen eine leichte Zielübererfüllung.

Für den LULUCF-Sektor legt das KSG Zielwerte für Emissionssenkungen für die Jahre 2030, 2040 und 2045 fest.⁴ Diese werden trotz der vergleichsweise optimistischen Annahmen zur Entwicklung der Waldsenke und zur Reduktion der Emissionen aus organischen Böden durch Moorbodenschutz in beiden Szenarien nicht erreicht.

Die auf den Europäischen Emissionshandel (EU-ETS) entfallenden Emissionen reduzieren sich in beiden Szenarien stärker als die unter die Klimaschutzverordnung (Effort Sharing Regulation (ESR)) fallenden Emissionen. Innerhalb der ESR-Emissionen werden CO₂-Brennstoffemissionen im Nationalen Emissionshandelssystem (nEHS) stärker reduziert als sonstige Emissionen. Die ESR-Ziele für Deutschland werden deutlich verfehlt.

Um Abweichungen der Ergebnisse durch veränderte Annahmen besser abschätzen zu können, wurden insgesamt sechs Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Untersucht wurden ein höheres und ein niedrigeres Wirtschaftswachstum, die zeigen, dass ein halber Prozentpunkt mehr oder weniger langfristiges Wirtschaftswachstum zu einem Prozentpunkt weniger oder mehr Emissionsreduktion führt. Außerdem wurden mehrere Sensitivitäten zu Brennstoff- und CO₂-Preisen gerechnet, von denen die meisten zu niedrigeren Emissionen führen. Zudem zeigt eine Sensitivität, dass eine unbegrenzte Biomassenutzung in den Sektoren Gebäude und Industrie zusätzliche Treibhausgasreduzierungen innerhalb der Bilanzgrenzen Deutschlands auslösen kann. Durch die erhöhte Biomassenachfrage resultierende mögliche Mehremissionen in Drittstaaten wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Tabelle 1: Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen im Vergleich der Szenarien, 2019-2050

Sektor	Einheit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gesamt (ohne LULUCF)								
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	802,0	704,4	467,3	353,7	264,9	229,0	208,8
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	802,0	691,8	437,7	304,5	215,6	178,9	160,1
<i>Minderung MMS ggü. 1990</i>	<i>Prozent</i>	-35,8	-43,6	-62,6	-71,7	-78,8	-81,7	-83,3
<i>Minderung MWMS ggü. 1990</i>	<i>Prozent</i>	-35,8	-44,6	-64,9	-75,6	-82,7	-85,7	-87,2

³ Für das Basisjahr 2019 liegen die Emissionen der Landwirtschaft um etwa 5 % niedriger als bisher.

⁴ Festgelegte Emissionssenkungen in Höhe von 25 Mio. t CO₂-Äq. für das Jahr 2030, 35 Mio. t CO₂-Äq. für das Jahr 2040 und 40 Mio. t CO₂-Äq. für das Jahr 2040, jeweils berechnet als Mittelwert des jeweiligen Zieljahres und der drei vorhergehenden Kalenderjahre.

Sektor	Einheit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Nationales Klimaschutzziel nach Klimaschutzgesetz (KSG)	Mio. t CO ₂ -Äq.		644,5	439,5	287,1	149,8		
Kumulierte Emissionen MMS ab 2023	Mio. t CO ₂ -Äq.		2.246,7	4.998,4	6.985,4	8.469,5	9.680,8	10.762,8
Kumulierte Emissionen MWMS ab 2023	Mio. t CO ₂ -Äq.		2.213,4	4.862,1	6.637,9	7.872,8	8.833,5	9.669,7
Kumulierte Minderung MWMS ggü. MMS ab 2023	Mio. t CO ₂ -Äq.		33,3	136,2	347,6	596,7	847,3	1.093,1
MMS Abweichung vom Minderungsziel KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.		59,9	27,8	66,5	115,1		
<i>MMS Abweichung vom Minderungsziel KSG</i>	<i>Prozent</i>		9,3	6,3	23,2	76,8		
MWMS Abweichung vom Minderungsziel KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.		47,3	-1,8	17,4	65,8		
<i>MWMS Abweichung vom Minderungsziel KSG</i>	<i>Prozent</i>		7,3	-0,4	6,0	43,9		
<i>Gesamtücke MMS</i>			197,3	330,7				
<i>Gesamtücke MWMS</i>			164,0	194,5				

Quelle: (UBA 2022b), (UBA 2022a), Modellierung Öko-Institut, Fraunhofer-ISI und IREES

Anmerkung: Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

Tabelle 2: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Sektoren mit Jahresemissionsmengen im Vergleich der Szenarien, 2019-2050

Sektor	Einheit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Energiewirtschaft								
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	259,5	217,6	79,9	61,6	41,6	42,6	44,4
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	259,5	218,2	78,0	52,1	39,0	38,6	40,7
<i>Minderung MMS ggü. 1990</i>	<i>Prozent</i>	-44,8	-53,7	-83,0	-86,9	-91,1	-90,9	-90,5
<i>Minderung MWMS ggü. 1990</i>	<i>Prozent</i>	-44,8	-53,6	-83,4	-88,9	-91,7	-91,8	-91,3
Industrie								
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	182,7	169,8	127,1	91,8	72,0	63,0	58,2
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	182,7	166,9	120,4	84,6	65,4	56,5	50,9
<i>Minderung MMS ggü. 1990</i>	<i>Prozent</i>	-34,7	-39,3	-54,6	-67,2	-74,3	-77,5	-79,2
<i>Minderung MWMS ggü. 1990</i>	<i>Prozent</i>	-34,7	-40,4	-57,0	-69,8	-76,6	-79,8	-81,8

Sektor	Einheit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gebäude								
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	121,4	103,2	78,3	52,7	37,6	31,0	26,1
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	121,4	96,2	68,2	37,7	20,5	14,2	10,8
Minderung MMS ggü. 1990	Prozent	-42,2	-50,9	-62,7	-74,9	-82,1	-85,2	-87,6
Minderung MWMS ggü. 1990	Prozent	-42,2	-54,2	-67,5	-82,0	-90,3	-93,2	-94,9
Verkehr								
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	163,8	145,4	118,3	86,5	54,3	33,7	21,7
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	163,8	144,1	111,4	73,2	35,7	15,3	4,0
Minderung MMS ggü. 1990	Prozent	-0,4	-10,9	-27,5	-47,0	-66,7	-79,4	-86,7
Minderung MWMS ggü. 1990	Prozent	-0,4	-11,7	-31,8	-55,2	-78,1	-90,6	-97,6
Landwirtschaft								
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	64,4	60,8	57,9	56,6	55,8	55,6	55,5
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	64,4	59,0	53,9	52,5	51,5	51,2	50,8
Minderung MMS ggü. 1990	Prozent	-22,5	-26,8	-30,3	-31,9	-32,8	-33,1	-33,2
Minderung MWMS ggü. 1990	Prozent	-22,5	-29,0	-35,1	-36,8	-38,0	-38,4	-38,8
Abfallwirtschaft & Sonstige								
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	10,1	7,5	5,7	4,4	3,6	3,2	2,9
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	10,1	7,5	5,7	4,4	3,6	3,2	2,9
Minderung MMS ggü. 1990	Prozent	-76,1	-82,3	-86,5	-89,5	-91,6	-92,4	-93,1
Minderung MWMS ggü. 1990	Prozent	-76,1	-82,3	-86,5	-89,5	-91,6	-92,4	-93,1

Quelle: (UBA 2022b), (UBA 2022a), Modellierung Öko-Institut, Fraunhofer-ISI und IREES

Anmerkung: Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

Tabelle 3: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den Sektoren LULUCF, internationaler Luft- und Seeverkehr im Vergleich der Szenarien, 2019-2050

Sektor	Einheit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
LULUCF								
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	-15,0	-12,5	-17,7	-20,6	-18,1	-17,0	-15,0
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	-15,0	-14,5	-20,8	-25,1	-23,9	-21,6	-19,9
Internationaler Luft- und Seeverkehr								
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	33,5	35,7	37,5	38,5	39,4	40,0	40,4
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	33,5	35,7	37,5	38,5	39,4	40,0	40,4

Sektor	Einheit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Minderung MMS ggü. 1990	Prozent	75,1	86,5	95,9	101,5	105,9	109,1	111,3
Minderung MWMS ggü. 1990	Prozent	75,1	86,5	95,9	101,5	105,9	109,1	111,3

Quelle: (UBA 2022b), (UBA 2022a), Modellierung Öko-Institut, Fraunhofer-ISI und IREES

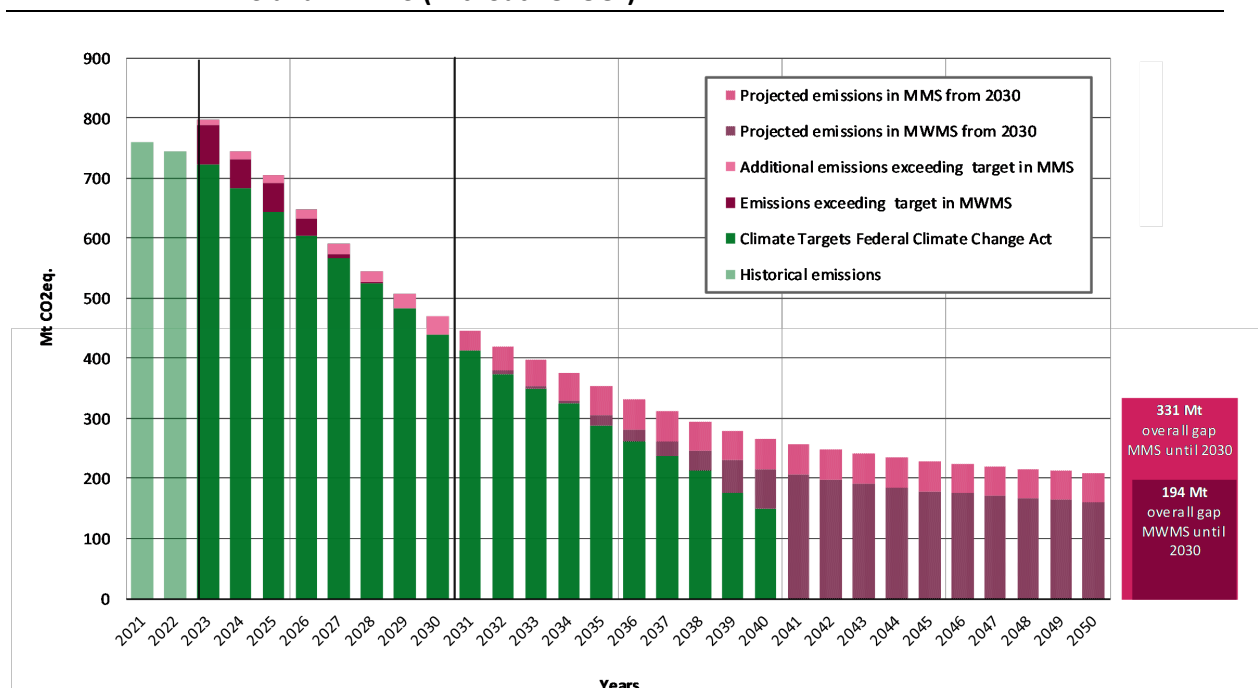
Anmerkung: Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

Summary

Disclaimer

It should be noted that projections should not be misunderstood as a forecast of future years. For projections, models are used that project a long-term, plausible emission development under the conditions and assumptions at the start of the modelling process. Special occurrences and unforeseen, short-term events, such as last year's energy crisis, cannot be integrated methodically, or only to a limited extent. Against this backdrop, near-term projection years should not be interpreted without considering the context.

Figure 2: Development of greenhouse gas emissions in Germany between 2021 and 2050 in MMS and MWMS (without LULUCF)⁵



Source: Modelling: Oeko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut; Inventory data: (UBA 2023a), (UBA 2023b).

With the Federal Climate Change Act (KSG), Germany put in place a legal framework regarding its climate protection goals. By 2030, greenhouse gas emissions need to be reduced by at least 65 % compared to the reference year 1990. This goal has been broken down into sectoral targets. By 2040, greenhouse gas emissions need to be reduced by 88 %. By 2045, Germany intends to reach net greenhouse gas neutrality.

The 2023 Projection Report focusses on two scenarios: The 'with existing measures' scenario (MMS in its German acronym) projects the effects of policies and measures already in place.. The 'with additional measures' scenario (MWMS in its German acronym), also considers additional measures which are currently planned by the German government..

Both scenarios are projected split by the sectors defined in the Climate Change Act: energy, industry, buildings, transport, agriculture, waste management and other, as well as land use, land use change and forestry (LULUCF). Emissions from international aviation and maritime transport are modelled and reported as memo items.

⁵ Detailed annual data and core indicators are to be found in Annex A.1.

By 2030, the existing measures are projected to reduce emissions by just under 63 % compared to the reference year 1990. Considering also additional measures the projected emission reduction increases to 65 %.. By 2050, the MMS projects an emission reduction of 83 % and the MWMS of 87 %.

The goal of net greenhouse gas neutrality by 2045 is projected to be clearly missed in both scenarios: In 2045, total emissions in the MMS are projected at a level of 229 Mt CO₂eq compared to an emission sink of 17 Mt CO₂eq in the LULUCF sector. In the MWMS, total emissions are projected to be reduced to just under 179 Mt CO₂eq in 2045 and the LULUCF sink increases to just under 22 Mt CO₂eq.

Scenarios that extend into the year 2050 include considerable uncertainties. Depending on the assumptions and the methodology used, different trajectories can be projected for the reduction effect of individual policies and measures. Other studies prepared on behalf of the German government by ministerial departments may thus come to different results.

For the individual sectors, the modelling exercise projects heterogeneous developments:

In the energy sector, the majority of emission reductions are projected to take place by 2030, mainly due to the early coal phase-out and the strong expansion of renewable energies. After 2030, emission reductions are projected to slow down significantly. In the MMS, renewable energies make up an 86 % share on gross electricity consumption in 2030. In the MWMS, the additional measures lead to significantly higher electricity consumption. This is why the renewable share of gross electricity consumption in 2030 is at 83 % lower than in the less ambitious MMS scenario.

In the industry sector, and between 2022 and 2030, emissions are projected to decrease by 23 % in the MMS and by 27 % in the MWMS. The most effective policies and measures in this sector are the programmes to promote the introduction of climate-friendly manufacturing processes, the EU Emissions Trading System (EU-ETS) and a package of measures to increase energy efficiency. Nevertheless, in both scenarios the projected annual emissions exceed the annual emission levels set in the Climate Change Act for all years from 2023 to 2030.

In the buildings sector, the gap to the Climate Change Act target path is projected to be significantly reduced in both scenarios. This is mainly due to political instrumentation and higher energy prices as a result of the Ukraine war.. For the MWMS, an ambitious implementation of the coalition agreement is assumed, in particular the obligation to use 65 % renewable energy in newly installed heating systems. This will initiate the phase-out of fossil heat generators in buildings in favour of heat pumps, district heating and biomass use. As a result, in the MWMS, the buildings sector almost achieves the Climate Change Act sector target for the year 2030.

In the transport sector, the Climate Change Act targets are projected to be missed every year until 2030: an emission reduction gap of 210 Mt CO₂eq will build up in the MMS. This is projected to be reduced to 187 Mt CO₂eq considering the additional measures of the MWMS. In the MMS, the passenger car fleet is projected at 8.2 million battery electric vehicles (BEVs) in 2030 and therefore falls short of the target of 15 million BEVs in the passenger car fleet in 2030.⁶

In the agriculture sector, the Climate Change Act targets are projected to be clearly overachieved in both scenarios. On the one hand, declining livestock numbers and lower nitrogen application

⁶ Other studies and surveys prepared on behalf of the German government by ministerial departments show a significantly higher number of BEVs in 2030. This is due to differences in assumptions, methods and data sources used.

rates lead to falling emissions. On the other hand, methodological improvements in the calculation in the greenhouse gas inventory led to agricultural emissions being significantly lower for historical years and thus also in the projection.⁷

Emissions in the sector waste management and other are projected to decline significantly by 2030. The reasons for this are an expansion of measures for landfill aeration, optimised gas collection and the reduction of food waste. However, the sector target for 2030 of 5 Mt CO₂eq is projected to be exceeded by almost 1 Mt CO₂eq. Looking at the entire period from 2023 to 2030, however, emissions remain slightly below the target.

For the LULUCF sector, the Climate Change Act sets emission reduction targets for the years 2030, 2040 and 2045.⁸ These are projected to be missed in both scenarios despite the comparatively optimistic assumptions about the future development of the forest sink and the reduction of emissions from organic soils through peatland protection.

Emissions attributable to the EU-ETS are projected to decline more than those covered by the Effort Sharing Regulation (ESR) in both scenarios. Within the ESR emissions, the CO₂ fuel emissions in the National Emissions Trading Scheme (nEHS) are projected to be reduced more than other emissions. The ESR targets for Germany are projected to be clearly missed.

A total of six sensitivity analyses were carried out. This helps to better estimate potential deviations in the results due to changed assumptions. Higher and lower economic growth were examined, showing that half a percentage point more or less in long-term economic growth leads to one percentage point less or more emission reduction. Several sensitivities regarding fuel- and CO₂ prices were calculated, most of which lead to lower emissions. Moreover, one sensitivity shows that unlimited biomass use in the buildings and industry sectors can trigger additional greenhouse gas reductions within emissions accounting in Germany. Additional emissions in third countries resulting from the increase in biomass demand have not been accounted for.

Table 1: Development of overall greenhouse gas emissions as compared in the scenarios, 2019-2050

Sector	Unit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total (without LULUCF)								
MMS	Mt CO ₂ eq	802.0	704.4	467.3	353.7	264.9	229.0	208.8
MWMS	Mt CO ₂ eq	802.0	691.8	437.7	304.5	215.6	178.9	160.1
<i>Mitigation MMS compared to 1990</i>	<i>Percent</i>	-35.8	-43.6	-62.6	-71.7	-78.8	-81.7	-83.3
<i>Mitigation MWMS compared to 1990</i>	<i>Percent</i>	-35.8	-44.6	-64.9	-75.6	-82.7	-85.7	-87.2
National mitigation target of Federal Climate Change Act (KSG)	Mt CO ₂ eq		644.5	439.5	287.1	149.8		

⁷ For the reference year 2019, emissions from agriculture are approximately 5 % lower than before.

⁸ Emission sinks defined amounting to 25 million t CO₂eq. for the year 2030, 35 million t CO₂eq. for the year 2040 and 40 million t CO₂eq. for the year 2040, calculated in each case as the medium value of the respective target year and the three preceding calendar years.

Sector	Unit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cumulative emissions MMS from 2023	Mt CO ₂ eq		2,246.7	4,998.4	6,985.4	8,469.5	9,680.8	10,762.8
Cumulative emissions MWMS from 2023	Mt CO ₂ eq		2,213.4	4,862.1	6,637.9	7,872.8	8,833.5	9,669.7
Cumulative mitigation MWMS compared to MMS from 2023	Mt CO ₂ eq		33.3	136.2	347.6	596.7	847.3	1,093.1
MMS deviation from mitigation target KSG	Mt CO ₂ eq		59.9	27.8	66.5	115.1		
<i>MMS deviation from mitigation target KSG</i>	<i>Percent</i>		9.3	6.3	23.2	76.8		
MWMS deviation from mitigation target KSG	Mt CO ₂ eq		47.3	-1.8	17.4	65.8		
<i>MWMS deviation from mitigation target KSG</i>	<i>Percent</i>		7.3	-0.4	6.0	43.9		
Cumulative deviation MMS			197,3	330,7				
Cumulative deviation MWMS			164,0	194,5				

Source: (UBA 2022b), (UBA 2022a), Modelling Oeko-Institut, Fraunhofer-ISI and IREES

Note: Further data is to be found in an Excel file which is published separately (Annex A.1).

Table 2: Development of greenhouse gas emissions in sectors with annual emission volumes as compared in the scenarios, 2019-2050

Sector	Unit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Energy								
MMS	Mt CO ₂ eq	259.5	217.6	79.9	61.6	41.6	42.6	44.4
MWMS	Mt CO ₂ eq	259.5	218.2	78.0	52.1	39.0	38.6	40.7
<i>Mitigation MMS compared to 1990</i>	<i>Percent</i>	-44.8	-53.7	-83.0	-86.9	-91.1	-90.9	-90.5
<i>Mitigation MWMS compared to 1990</i>	<i>Percent</i>	-44.8	-53.6	-83.4	-88.9	-91.7	-91.8	-91.3
Industry								
MMS	Mt CO ₂ eq	182.7	169.8	127.1	91.8	72.0	63.0	58.2
MWMS	Mt CO ₂ eq	182.7	166.9	120.4	84.6	65.4	56.5	50.9
<i>Mitigation MMS compared to 1990</i>	<i>Percent</i>	-34.7	-39.3	-54.6	-67.2	-74.3	-77.5	-79.2
<i>Mitigation MWMS compared to 1990</i>	<i>Percent</i>	-34.7	-40.4	-57.0	-69.8	-76.6	-79.8	-81.8

Sector	Unit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Buildings								
MMS	Mt CO ₂ eq	121.4	103.2	78.3	52.7	37.6	31.0	26.1
MWMS	Mt CO ₂ eq	121.4	96.2	68.2	37.7	20.5	14.2	10.8
Mitigation MMS compared to 1990	Percent	-42.2	-50.9	-62.7	-74.9	-82.1	-85.2	-87.6
Mitigation MWMS compared to 1990	Percent	-42.2	-54.2	-67.5	-82.0	-90.3	-93.2	-94.9
Transport								
MMS	Mt CO ₂ eq	163.8	145.4	118.3	86.5	54.3	33.7	21.7
MWMS	Mt CO ₂ eq	163.8	144.1	111.4	73.2	35.7	15.3	4.0
Mitigation MMS compared to 1990	Percent	-0.4	-10.9	-27.5	-47.0	-66.7	-79.4	-86.7
Mitigation MWMS compared to 1990	Percent	-0.4	-11.7	-31.8	-55.2	-78.1	-90.6	-97.6
Agriculture								
MMS	Mt CO ₂ eq	64.4	60.8	57.9	56.6	55.8	55.6	55.5
MWMS	Mt CO ₂ eq	64.4	59.0	53.9	52.5	51.5	51.2	50.8
Mitigation MMS compared to 1990	Percent	-22.5	-26.8	-30.3	-31.9	-32.8	-33.1	-33.2
Mitigation MWMS compared to 1990	Percent	-22.5	-29.0	-35.1	-36.8	-38.0	-38.4	-38.8
Waste management & other								
MMS	Mt CO ₂ eq	10.1	7.5	5.7	4.4	3.6	3.2	2.9
MWMS	Mt CO ₂ eq	10.1	7.5	5.7	4.4	3.6	3.2	2.9
Mitigation MMS compared to 1990	Percent	-76.1	-82.3	-86.5	-89.5	-91.6	-92.4	-93.1
Mitigation MWMS compared to 1990	Percent	-76.1	-82.3	-86.5	-89.5	-91.6	-92.4	-93.1

Source: (UBA 2022b), (UBA 2022a), Modelling Oeko-Institut, Fraunhofer-ISI and IREES

Note: Further data is to be found in an Excel file which is published separately (Annex A.1).

Table 3: Development of greenhouse gas emissions in the sectors LULUCF, international aviation and maritime transport as compared in the scenarios, 2019-2050

Sector	Unit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
LULUCF								
MMS	Mt CO ₂ eq	-15.0	-12.5	-17.7	-20.6	-18.1	-17.0	-15.0

Sector	Unit	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MWMS	Mt CO ₂ eq	-15.0	-14.5	-20.8	-25.1	-23.9	-21.6	-19.9
International aviation and maritime transport								
MMS	Mt CO ₂ eq	33.5	35.7	37.5	38.5	39.4	40.0	40.4
MWMS	Mt CO ₂ eq	33.5	35.7	37.5	38.5	39.4	40.0	40.4
<i>Mitigation MMS compared to 1990</i>	<i>Percent</i>	75.1	86.5	95.9	101.5	105.9	109.1	111.3
<i>Mitigation MWMS compared to 1990</i>	<i>Percent</i>	75.1	86.5	95.9	101.5	105.9	109.1	111.3

Source: (UBA 2022b), (UBA 2022a), Modelling Oeko-Institut, Fraunhofer-ISI and IREES

Note: Further data is to be found in an Excel file which is published separately (Annex A.1).

Kernindikatoren

Tabelle 4: Entwicklung der Treibhausgasemission im Vergleich der Szenarien, 2023-2050

Sektor	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Kumulierte Lücke (2023 bis 2030)
Gesamt									
Minderungsziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021	% Minderung			65%	77%	88%			
MMS gesamt (ohne LULUCF)	Mio. t CO ₂ -Äq.	798	704	467	354	265	229	209	
MMS gesamt (ohne LULUCF)	% Minderung	36%	44%	63%	72%	79%	82%	83%	
Abweichung MMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	77	60	28	67	115			331
MWMS gesamt (ohne LULUCF)	Mio. t CO ₂ -Äq.	789	692	438	305	216	179	160	
MWMS gesamt (ohne LULUCF)	% Minderung	37%	45%	65%	76%	83%	86%	87%	
Abweichung MWMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	67	47	-2	17	66			194
Energiewirtschaft									
KSG-Jahresemissionsmenge	Mio. t CO ₂ -Äq.	238	201	108					
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	288	218	80	62	42	43	44	
Abweichung MMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	50	17	-28					-38
Minderung ggü. 1990	% Minderung	-39%	-54%	-83%	-87%	-91%	-91%	-91%	
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	286	218	78	52	39	39	41	
Abweichung MWMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	48	17	-30					-37
Minderung ggü. 1990	% Minderung	-39%	-54%	-83%	-89%	-92%	-92%	-91%	
Industrie									
KSG-Jahresemissionsmenge	Mio. t CO ₂ -Äq.	173	158	119					
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	178	170	127	92	72	63	58	
Abweichung MMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	4	11	8					83
Minderung ggü. 1990	% Minderung	-37%	-39%	-55%	-67%	-74%	-77%	-79%	
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	177	167	120	85	65	56	51	
Abweichung MWMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	4	8	1					51
Minderung ggü. 1990	% Minderung	-37%	-40%	-57%	-70%	-77%	-80%	-82%	
Gebäude									

Sektor	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Kumulierte Lücke (2023 bis 2030)
KSG-Jahresemissionsmenge	Mio. t CO ₂ -Äq.	101	91	66					
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	110	103	78	53	38	31	26	
Abweichung MMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	9	12	12					96
Minderung ggü. 1990	% Minderung	-47%	-51%	-63%	-75%	-82%	-85%	-88%	
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	105	96	68	38	20	14	11	
Abweichung MWMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	4	5	2					35
Minderung ggü. 1990	% Minderung	-47%	-51%	-63%	-75%	-82%	-85%	-88%	
Verkehr									
KSG-Jahresemissionsmenge	Mio. t CO ₂ -Äq.	133	122	84					
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	152	145	118	87	54	34	22	
Abweichung MMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	20	24	35					210
Minderung ggü. 1990	% Minderung	-7%	-11%	-28%	-47%	-67%	-79%	-87%	
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	152	144	111	73	36	15	4	
Abweichung MWMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	192	22	28					187
Minderung ggü. 1990	% Minderung	-7%	-11%	-28%	-47%	-67%	-79%	-87%	
Landwirtschaft									
KSG-Jahresemissionsmenge	Mio. t CO ₂ -Äq.	67	64	57					
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	62	61	58	57	56	56	55	
Abweichung MMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	-5	-3	1					-20
Minderung ggü. 1990	% Minderung	-25%	-27%	-30%	-32%	-33%	-33%	-33%	
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	61	59	54	52	52	51	51	
Abweichung MWMS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	-6	-5	-3					-40
Minderung ggü. 1990	% Minderung	-27%	-29%	-35%	-37%	-38%	-38%	-39%	
Abfallwirtschaft & Sonstiges									
KSG-Jahresemissionsmenge	Mio. t CO ₂ -Äq.	9	8	5					
MMS = MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	8	8	6	4	4	3	3	
Abweichung M(W)MS/KSG	Mio. t CO ₂ -Äq.	-1	-1	1					-1
Minderung ggü. 1990		-80%	-82%	-87%	-90%	-92%	-92%	-93%	

Sektor	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Kumulierte Lücke (2023 bis 2030)
<i>nachrichtlich:</i>									
LULUCF									
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	-12	-13	-18	-21	-18	-17	-15	
Minderung ggü. 1990		-80%	-82%	-87%	-90%	-92%	-92%	-93%	
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	-14	-15	-21	-25	-24	-22	-20	
Minderung ggü. 1990		-80%	-82%	-87%	-90%	-92%	-92%	-93%	
Internationaler Luft- und Seeverkehr									
MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	33	36	37	39	39	40	40	
Minderung ggü. 1990		-36%	-44%	-63%	-72%	-79%	-82%	-83%	
MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	33	36	37	39	39	40	40	
Minderung ggü. 1990		-37%	-45%	-65%	-76%	-83%	-86%	-87%	

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut

Tabelle 5: Wesentliche Rahmendaten, 2023-2050

Parameter	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bevölkerung	Mio.	83,3	83,5	83,5	83,3	83,2	83,0	82,7
Bruttoinlandsprodukt	Mrd. € ₂₀₁₉	3.461	3.569	3.711	3.889	4.150	4.456	4.767
CO₂-Zertifikatspreis								
MMS	€/EUA (nominal)	93	108	143	182	228	269	318
MWMS	€/EUA (nominal)	93	108	143	182	228	269	318
MMS	€ ₂₀₁₉ /EUA	82	91	109	125	141	151	161
MWMS	€ ₂₀₁₉ /EUA	82	91	109	125	141	151	161
BEHG-Preis								
MMS	€/t (nominal)	30	45	125	200	275	350	425
MWMS	€/t (nominal)	30	45	125	200	275	350	425

Quelle: (Mendelevitch et al. 2022)

Tabelle 6: Entwicklung energiebezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Primärenergieverbrauch								
MMS	PJ	12.122	11.582	10.071	9.292	8.784	8.554	8.435
MWMS	PJ	12.014	11.461	9.916	9.124	8.616	8.361	8.304
MMS	TWh	3.367	3.217	2.798	2.581	2.440	2.376	2.343
MWMS	TWh	3.337	3.184	2.754	2.534	2.393	2.322	2.307
Endenergieverbrauch								
MMS	PJ	8.571	8.433	7.804	7.297	6.904	6.683	6.559
MWMS	PJ	8.473	8.298	7.625	7.072	6.640	6.351	6.216
MMS	TWh	2.381	2.343	2.168	2.027	1.918	1.856	1.822
MWMS	TWh	2.354	2.305	2.118	1.965	1.845	1.764	1.727

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut

Tabelle 7: Entwicklung von Nachfrage und Produktion neuer Treib- und Brennstoffe im Vergleich der Szenarien, 2023-2050

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Elektrische Leistung Elektrolyseure (Wasserstoff und PtL)								
MMS	GW	2,1	2,9	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
MWMS	GW	4,2	5,8	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
Nachfrage nach Elektrolysewasserstoff								
MMS	PJ	1	6	189	435	513	609	648
MWMS	PJ	1	7	196	471	599	591	618
MMS	TWh	0,1	1,8	52,5	120,9	142,5	169,1	179,9
MWMS	TWh	0,2	1,9	54,3	130,9	166,4	164,1	171,7
Inländische Wasserstoffproduktion								
MMS	PJ	1	9	58	132	173	207	181
MWMS	PJ	1	7	93	176	248	293	341

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MMS	TWh	0,2	2,6	16,1	36,6	48,0	57,4	50,2
MWMS	TWh	0,2	1,9	25,8	48,9	68,8	81,4	94,7
Wasserstoffimport								
MMS	PJ	0	-3	131	303	340	402	467
MWMS	PJ	0	0	103	295	351	298	277
MMS	TWh	-0,1	-0,8	36,4	84,3	94,6	111,7	129,7
MWMS	TWh	0,0	0,0	28,5	82,0	97,6	82,8	77,0
Inländischer Stromverbrauch der Elektrolyseure								
MMS	PJ	1	9	58	132	173	207	241
MWMS	PJ	0,9	9,7	128,2	234,7	330,1	390,6	454,5
MMS	TWh	0,2	2,6	16,1	36,6	48,0	57,4	66,9
MWMS	TWh	0,2	2,7	35,6	65,2	91,7	108,5	126,2
Nachfrage strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe								
MMS	PJ	0	0	58	32	25	26	27
MWMS	PJ	0	0	60	33	25	25	24
MMS	TWh	0,0	0,0	16,2	9,0	7,0	7,3	7,6
MWMS	TWh	0,0	0,0	16,7	9,1	7,1	6,9	6,6
Inländische Produktion strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe								
MMS	PJ	0	0	8	8	8	8	8
MWMS	PJ	0	0	8	8	8	8	8
MMS	TWh	0,0	0,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
MWMS	TWh	0,0	0,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Import strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe								
MMS	PJ	0	0	50	24	17	18	19
MWMS	PJ	0	0	52	25	17	17	16
MMS	TWh	0,0	0,0	14,0	6,8	4,8	5,1	5,4

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MWMS	TWh	0,0	0,0	14,5	6,9	4,9	4,7	4,4
Inländischer Stromverbrauch PtL-Herstellung								
MMS	PJ	0	0	16	16	16	16	16
MWMS	PJ	0	0	16	16	16	16	16
MMS	TWh	0,0	0,0	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
MWMS	TWh	0,0	0,0	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

Tabelle 8: Entwicklung energiewirtschaftsbezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bruttostromverbrauch								
MMS	TWh	566,7	579,5	660,6	790,6	931,6	975,0	1009,2
MWMS	TWh	567,9	583,2	712,0	882,8	1026,7	1102,5	1149,5
Anteil erneuerbarer Energien (EE) am Bruttostromverbrauch								
MMS	%	48,6%	56,5%	84,8%	96,1%	97,3%	95,1%	93,5%
MWMS	%	48,6%	56,5%	80,2%	91,9%	93,1%	89,6%	87,8%
Installierte Leistung EE								
MMS	GW	154,0	189,6	351,3	512,2	626,8	634,9	636,1
MWMS	GW	156,0	191,6	353,2	514,0	628,6	636,8	638,1
Stromerzeugung aus EE								
MMS	TWh	267,9	318,9	547,7	744,3	888,5	908,3	925,3
MWMS	TWh	268,9	320,9	558,2	794,7	936,6	968,0	989,0
Installierte Leistung Wind an Land								
MMS	GW	59,1	65,7	106,1	147,1	159,9	160,0	160,0
MWMS	GW	59,1	65,7	106,1	147,1	159,9	160,0	160,0
Installierte Leistung Wind auf See								

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MMS	GW	8,1	10,0	26,6	49,6	62,5	65,0	67,5
MWMS	GW	8,1	10,0	26,6	49,6	62,5	65,0	67,5
Installierte Leistung PV								
MMS	GW	70,8	97,4	201,8	302,5	393,3	400,1	400,1
MWMS	GW	70,8	97,4	201,8	302,5	393,3	400,1	400,1
Installierte Leistung Kohle- kraft								
MMS	GW	35,3	23,5	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MWMS	GW	35,3	23,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Stromerzeugung aus Koh- lekraft								
MMS	TWh	193,2	120,6	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0
MWMS	TWh	193,9	122,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Installierte Leistung Erdgas								
MMS	GW	31,2	32,0	34,4	32,8	29,0	28,4	28,3
MWMS	GW	27,7	28,4	30,0	25,8	19,8	14,5	10,5
Stromerzeugung aus Erd- gas								
MMS	TWh	86,6	107,4	95,7	66,6	40,5	45,9	47,4
MWMS	TWh	82,7	103,4	95,4	51,4	31,6	31,7	30,1
Emissionsfaktor der Strom- erzeugung								
MMS	kg CO ₂ e /MWh	482,2	361,7	92,2	50,4	30,7	29,0	28,9
MWMS	kg CO ₂ e /MWh	482,5	362,0	88,5	40,9	25,9	22,0	20,4
Emissionsfaktor Fern- wärme								
MMS	kg CO ₂ e /MWh	152,1	135,9	114,5	113,9	66,4	79,0	91,4
MWMS	kg CO ₂ e /MWh	148,0	135,2	102,5	81,6	74,1	91,4	109,8
Gesamter Wärmever- brauch in Wärmenetzen								

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MMS	TWh	229,4	227,7	210,9	197,6	186,3	182,2	182,5
MWMS	TWh	228,7	226,6	213,1	204,5	190,3	183,5	190,0
Fossile Kraftwärmekopp- lung Leistung								
MMS	GW	54,0	48,2	33,6	29,1	25,1	24,3	24,2
MWMS	GW	52,5	46,6	28,5	24,2	18,1	15,1	13,0
Fossile Kraftwärmekopp- lung Energiemenge								
MMS	TWh	133,3	125,2	94,9	72,3	24,6	23,8	21,9
MWMS	TWh	128,2	119,2	74,4	31,1	17,6	17,1	23,0
Technologiemix von klima- neutraler Wärmeversor- gung								
... Solarthermie								
MMS	TWh	0,4	0,8	3,1	3,8	5,1	6,2	7,6
MWMS	TWh	0,5	0,8	5,6	8,5	11,7	13,0	13,0
... Geothermie								
MMS	TWh	0,8	0,8	8,4	10,7	13,1	15,4	17,7
MWMS	TWh	2,1	2,7	9,9	13,0	16,0	18,0	17,0
... Wärmepumpen (klein + groß)								
MMS	TWh	1,8	3,9	11,5	15,8	20,2	24,5	28,8
MWMS	TWh	3,5	4,1	17,4	43,1	42,5	36,9	38,6
... Power-to-heat								
MMS	TWh	0,2	0,0	1,6	14,7	56,0	44,0	33,8
MWMS	TWh	0,2	0,0	1,0	9,1	13,2	5,2	3,8
... Heizwerke								
MMS	TWh	21,8	21,3	15,6	8,4	6,8	5,3	3,7
MWMS	TWh	21,8	21,3	15,5	8,3	6,8	5,4	3,8
... KWK grüner Wasserstoff								
MMS	TWh	0,0	0,0	1,8	6,3	3,4	3,8	4,6

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MWMS	TWh	0,0	0,0	1,2	2,4	4,2	2,5	10,6

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

Anmerkungen: Wärmeerzeugung aus Geothermie: Im MMS wird ein moderater Zubau von installierter Leistung der Geothermie angenommen, wohingegen im MWMS ein ambitionierter Pfad nach (Dambeck et al. 2021) zugrunde gelegt wird. Dies ist im Einklang mit dem Instrument „Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umstellen – 50 % klimaneutral bis 2030“. Die Interpolation zwischen Basisjahr und Annahmen in 2025 führt zu Unterschieden am aktuellen Rand.

Tabelle 9: Entwicklung industriebezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Anteil elektrifizierte Prozesswärmeerzeugung (inkl. Umgebungswärme)								
MMS	%	3%	7%	15%	22%	27%	27%	27%
MWMS	%	3%	7%	17%	26%	32%	32%	30%
Preisspread zwischen (Strom+Subvention) und (Erdgas+CO₂)								
MMS	€/MWh	86	41	12	-45	12	19	25
MWMS	€/MWh	86	41	12	-45	12	19	25
Differenzkosten CO₂-armer Produktionsverfahren - (H₂-DRI zu BF/BOF), CO₂-Preis bereits inbegriffen								
MMS	€/t _{Pro- dukt}	181	155	62	30	-	-19	-39
MWMS	€/t _{Pro- dukt}	181	155	62	30	-	-19	-39
Differenzkosten CO₂-armer Produktionsverfahren - (Glas-schmelze vollelektrisch zu Erdgas), CO₂-Preis bereits inbegriffen								
MMS	€/t _{Pro- dukt}	40	56	63	3	-20	-41	-62
MWMS	€/t _{Pro- dukt}	40	56	63	3	-20	-41	-62
Produktionsmengen (elektrische Glasschmelze)								
MMS	Mt _{Pro- dukt}	-	-	5	5	5	5	5

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MWMS	Mt _{Pro-} dukt	-	-	5	5	5	5	5
Produktionsmengen (H₂-DRI)								
MMS	Mt _{Pro-} dukt	-	-	13	19	20	25	25
MWMS	Mt _{Pro-} dukt	-	-	13	19	20	25	25
Produktionsmengen (kalksteinreduzierte Bindemittel)								
MMS	Mt _{Pro-} dukt	-	-	-	-	-	-	-
MWMS	Mt _{Pro-} dukt	-	-	-	-	-	-	-
Produktionsmengen (H₂-basiertes Ammoniak)								
MMS	Mt _{Pro-} dukt	-	-	1	2	2	2	2
MWMS	Mt _{Pro-} dukt	-	-	1	2	2	2	2
Produktionsmengen (H₂-basiertes Ethylen)								
MMS	Mt _{Pro-} dukt	-	-	0	0	0	0	0
MWMS	Mt _{Pro-} dukt	-	-	0	0	0	0	0
Wasserstoffbedarf für Stahl								
MMS	TWh	-	-	23	47	54	67	67
MWMS	TWh	-	-	24	47	54	67	68
Wasserstoffbedarf für Industrie gesamt (ohne chemischen Rohstoff)								
MMS	TWh	-	-	23	47	54	68	69
MWMS	TWh	-	-	24	47	54	69	69
Wasserstoffbedarf als chemischer Rohstoff								
MMS	TWh	-	-	18	44	53	53	54
MWMS	TWh	-	-	18	44	53	53	53

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Elektrifizierungsgrad (Anteil Strom an Endenergiebedarf)								
MMS	%	31%	33%	37%	42%	45%	46%	46%
MWMS	%	31%	33%	38%	43%	47%	47%	47%
Nutzung Erdgas, Kohlen, Öle								
MMS	TWh	379	367	275	201	167	141	130
MWMS	TWh	378	361	260	184	147	120	109

Quelle: Annahmen und Berechnungen Fraunhofer ISI

Tabelle 10: Entwicklung gebäudebezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
-----------	---------	------	------	------	------	------	------	------

Änderung Endenergieverbrauch Gebäudesektor im Vergleich zu 2018 durch:

... Gebäudesanierung

MMS	TWh	-31	-46	-88	-130	-169	-203	-231
MWMS	TWh	-31	-48	-101	-154	-202	-245	-282

... Austausch des Wärmeversorgungssystems

MMS	TWh	-17	-27	-51	-72	-84	-85	-84
MWMS	TWh	-43	-54	-74	-98	-103	-95	-79

Steigende Außentemperatur

MMS	TWh	-13	-19	-34	-48	-58	-68	-76
MWMS	TWh	-13	-19	-32	-44	-52	-59	-64

Anteil klimaneutraler Wärmeversorgung an Neuinstallationen (Technologiemix des Marktabsatzes von Heizungsanlagen)

MMS	%	69%	48%	57%	56%	74%	81%	70%
MWMS	%	69%	59%	77%	77%	89%	90%	86%

Absatz Wärmepumpen nach Installation in Neubau

MMS	absolut	137.517	139.093	134.674	153.408	153.563	137.613	140.854
MWMS	absolut	118.703	109.506	121.501	126.691	133.835	117.688	118.548

Absatz Wärmepumpen nach Installation in Bestand

MMS	absolut	199.831	100.831	240.040	235.714	223.002	297.651	399.370
MWMS	absolut	229.963	160.654	419.924	408.130	310.810	381.646	553.074

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
EEV Raumwärme pro qm Wohnfläche (witterungsbereinigt)								
MMS	kWh/qm	72	69	62	55	51	47	44
MWMS	kWh/qm	69	65	59	53	48	43	40
EEV Warmwasser pro qm Wohnfläche (witterungsbereinigt)								
MMS	kWh/qm	15	15	14	12	12	11	11
MWMS	kWh/qm	15	14	13	12	11	10	10
Anteil „Anteil EE-Wärme“								
MMS	%	17%	19%	27%	38%	45%	48%	51%
MWMS	%	18%	20%	31%	45%	55%	58%	60%
Nutzung erneuerbarer Energien								
... Biomasse								
MMS	TWh	92.537	92.142	110.645	133.746	137.021	127.865	119.726
MWMS	TWh	95.841	95.789	117.627	145.559	153.934	143.419	136.229
...Wärmepumpen								
MMS	TWh	19.072	23.309	43.140	62.906	74.064	77.349	79.037
MWMS	TWh	18.021	25.132	55.267	85.948	99.939	97.840	91.944
Nutzung fossiler Heizarten								
...Erdgas, Heizöl und Kohle								
MMS	TWh	466.481	435.067	328.165	220.006	154.043	124.386	102.426
MWMS	TWh	440.673	402.036	275.733	139.243	63.867	39.129	24.752
Investitionen in die energetische Sanierung der Gebäudehülle								
MMS	€	31.506	33.721	37.271	36.924	30.704	26.468	26.664
MWMS	€	31.481	40.585	37.362	43.191	40.814	43.498	39.054
Elektrische Haushaltsgeräte								
Spezifischer Stromverbrauch elektrischer Geräte im Bestand								
...Beleuchtung								
MMS	kWh/Ge- rät/Jahr	6	5	4	3	3	3	3
MWMS	kWh/Ge- rät/Jahr	6	5	4	3	3	3	3

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
...Fernseher								
MMS	kWh/Gerät/Jahr	86	90	100	104	79	53	52
MWMS	kWh/Gerät/Jahr	86	90	100	104	80	55	52
...Kühlschränke								
MMS	kWh/Gerät/Jahr	267	260	240	226	227	228	228
MWMS	kWh/Gerät/Jahr	267	260	240	226	227	228	229
...Waschmaschinen								
MMS	kWh/Gerät/Jahr	144	139	128	121	120	120	120
MWMS	kWh/Gerät/Jahr	144	139	128	121	120	120	120

Spezifischer Stromverbrauch neuer elektrischer Geräte

...Beleuchtung								
MMS	kWh/Gerät/Jahr	5	4	3	3	3	3	3
MWMS	kWh/Gerät/Jahr	5	4	3	3	3	3	3
...Fernseher								
MMS	kWh/Gerät/Jahr	103	105	108	115	59	60	60
MWMS	kWh/Gerät/Jahr	103	105	108	115	59	60	60
...Kühlschränke								
MMS	kWh/Gerät/Jahr	224	231	229	233	235	235	236
MWMS	kWh/Gerät/Jahr	224	231	229	233	235	235	236
...Waschmaschinen								
MMS	kWh/Gerät/Jahr	124	125	124	125	126	127	127
MWMS	kWh/Gerät/Jahr	124	125	124	125	126	127	127

Quelle: Annahmen und Berechnungen IREES

Tabelle 11: Entwicklung verkehrsbezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Anzahl E-Pkw Bestand								
MMS	Mio.	1,7	3,0	8,2	17,8	28,5	36,7	42,9
MWMS	Mio.	1,7	3,0	8,2	17,8	28,5	36,6	42,9
Anzahl E-Pkw NZL								
MMS	Mio.	0,7	0,8	1,9	2,7	2,5	2,6	2,8
MWMS	Mio.	0,7	0,8	1,9	2,7	2,5	2,6	2,8
Anzahl konventionelle Pkw Bestand								
MMS	Mio.	47,0	46,0	41,5	31,6	20,7	12,2	5,7
MWMS	Mio.	47,0	46,0	41,5	31,6	20,8	12,2	5,8
Anzahl konventionelle Pkw NZL								
MMS	Mio.	2,5	2,4	1,1	23,8	0,0	0,0	0,0
MWMS	Mio.	2,5	2,4	1,1	23,8	0,0	0,0	0,0
Anzahl E-Lkw Bestand								
MMS	Mio.	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7
MWMS	Mio.	0,0	0,0	0,1	0,4	0,6	0,8	1,0
Anzahl E-Lkw NZL								
MMS	Tsd.	5,1	10,3	30,6	48,8	57,8	67,6	74,8
MWMS	Tsd.	4,9	14,7	50,5	76,9	90,4	100,8	107,4
Anzahl konventionelle Lkw Bestand								
MMS	Mio.	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4
MWMS	Mio.	0,8	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1
Anzahl konventionelle Lkw NZL								
MMS	Tsd.	89,7	54,3	61,5	41,5	35,9	33,2	32,6
MWMS	Tsd.	89,9	49,9	41,6	13,4	3,3	0,0	0,0

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Personenverkehrsleistung								
Verkehrsleistung Pkw (Pkm)								
MMS	Mrd. Pkm	874,0	899,3	879,1	915,4	962,1	986,8	1000,4
MWMS	Mrd. Pkm	865,4	889,5	862,1	904,0	956,3	982,2	996,5
Verkehrsleistung Pkw (Fkm)								
MMS	Mrd. Fkm	612,7	629,7	615,7	641,6	674,8	692,7	702,2
MWMS	Mrd. Fkm	606,6	622,7	603,6	633,5	670,6	689,2	698,8
Verkehrsleistung ÖV								
MMS	Mrd. Pkm	81,7	83,1	94,3	75,7	58,2	46,8	40,6
MWMS	Mrd. Pkm	89,1	90,3	104,2	82,5	62,4	50,0	43,7
Verkehrsleistung Bahn								
MMS	Mrd. Pkm	101,4	118,5	140,9	134,5	124,3	119,9	117,7
MWMS	Mrd. Pkm	108,5	126,3	151,2	143,8	132,6	128,6	126,6
Verkehrsleistung Rad								
MMS	Mrd. Pkm	40,8	42,1	47,2	46,7	44,5	43,5	42,5
MWMS	Mrd. Pkm	40,7	42,0	47,3	46,7	44,3	43,3	42,2
Verkehrsleistung Fuß								
MMS	Mrd. Pkm	35,7	35,8	36,1	36,2	35,8	35,6	35,3
MWMS	Mrd. Pkm	35,6	35,7	36,1	36,2	35,7	35,5	35,2
Güterverkehrsleistung								
Elektrische Fahrleistung Lkw								

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MMS	Mrd. Fkm	0,7	3,5	21,6	54,0	85,5	109,1	125,8
MWMS	Mrd. Fkm	0,7	4,2	30,4	73,1	112,7	136,1	152,4
Güterverkehrsleistung Straße (Fkm)								
MMS	Mrd. Fkm	118,3	115,7	119,7	126,4	135,2	145,3	155,6
MWMS	Mrd. Fkm	118,3	115,1	118,6	125,6	135,1	145,5	156,1
Güterverkehrsleistung Straße (tkm)								
MMS	Mrd. tkm	514,8	522,5	532,9	557,5	596,7	641,3	689,5
MWMS	Mrd. tkm	514,8	517,9	525,2	550,6	595,0	642,3	692,2
Güterverkehrsleistung Schiene								
MMS	Mrd. tkm	132,9	145,5	164,7	169,9	179,7	192,3	202,7
MWMS	Mrd. tkm	132,9	149,8	171,8	176,4	181,3	191,3	200,2
Güterverkehrsleistung Schiff								
MMS	Mrd. tkm	50,9	53,9	54,9	54,0	57,2	61,3	64,8
MWMS	Mrd. tkm	50,9	55,0	56,7	55,6	57,6	61,0	64,2
Güterverkehrsleistung Luft								
MMS	Mrd. tkm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
MWMS	Mrd. tkm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Bestandszugehörigkeit E-Pkw								
MMS	durchschnittl. Jahr	18,0	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MWMS	durchschnittl. Jahr	18,0	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1
Bestandszugehörigkeit konventionelle Pkw								
MMS	durchschnittl. Jahr	16,7	16,7	16,5				
MWMS	durchschnittl. Jahr	16,7	16,7	16,6				
Kraftstoffmix fossil								
MMS	PJ	2019,6	1928,1	1518,2	1125,5	708,3	435,4	276,6
MWMS	PJ	2014,3	1910,6	1424,6	948,3	462,1	193,7	46,2
MMS	TWh	561,0	535,6	421,7	312,6	196,8	120,9	76,8
MWMS	TWh	559,5	530,7	395,7	263,4	128,4	53,8	12,8
Kraftstoffmix biogen konventionell / aus Altspeiseölen und Tierfetten								
MMS	PJ	124,3	120,4	100,6	99,5	98,7	93,6	90,2
MWMS	PJ	123,2	119,3	95,2	90,2	88,6	88,5	89,2
MMS	TWh	34,5	33,4	28,0	27,6	27,4	26,0	25,1
MWMS	TWh	34,2	33,1	26,5	25,1	24,6	24,6	24,8
Kraftstoffmix biogen fortschrittlich (nach Anhang IX Teil B der RED)								
MMS	PJ	3,1	7,7	47,8	26,0	17,1	16,4	15,8
MWMS	PJ	3,0	7,6	45,2	23,5	15,4	15,5	15,6
MMS	TWh	0,8	2,1	13,3	7,2	4,8	4,5	4,4
MWMS	TWh	0,8	2,1	12,6	6,5	4,3	4,3	4,3
Kraftstoffmix PtL/H₂								
MMS	PJ	0,2	0,4	58,8	62,0	85,5	122,8	140,1
MWMS	PJ	0,2	0,5	66,0	117,9	161,9	104,5	55,8

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MMS	TWh	0,0	0,1	16,3	17,2	23,7	34,1	38,9
MWMS	TWh	0,0	0,1	18,3	32,7	45,0	29,0	15,5
Strom								
MMS	PJ	68,6	102,3	208,8	394,9	602,2	733,7	825,4
MWMS	PJ	70,9	107,5	248,5	454,5	691,1	881,7	1010,7
MMS	TWh	19,0	28,4	58,0	109,7	167,3	203,8	229,3
MWMS	TWh	19,7	29,9	69,0	126,2	192,0	244,9	280,7

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

Tabelle 12: Entwicklung landwirtschaftsbezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2025-2050

Indikator	Einheit	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Milchkühe							
MMS	(in 1000)	3726	3488	3368	3287	3287	3287
MWMS	(in 1000)	3726	3488	3368	3287	3287	3287
andere Rinder							
MMS	(in 1000)	7289	6982	6745	6612	6573	6554
MWMS	(in 1000)	7221	6932	6638	6457	6402	6318
Schweine (ohne Saugferkel)							
MMS	(in 1000)	18493	15783	15783	15783	15783	15783
MWMS	(in 1000)	18493	15783	15783	15783	15783	15783
Geflügel							
MMS	(in 1000)	200000	200000	200000	200000	200000	200000
MWMS	(in 1000)	200000	200000	200000	200000	200000	200000
Pferde							
MMS	(in 1000)	451	451	451	451	451	451
MWMS	(in 1000)	451	451	451	451	451	451
Schafe							
MMS	(in 1000)	1903	2008	2008	2008	2008	2008

Indikator	Einheit	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MWMS	(in 1000)	1903	2008	2008	2008	2008	2008
Ziegen							
MMS	(in 1000)	151	151	151	151	151	151
MWMS	(in 1000)	151	151	151	151	151	151
Mineraldüngereinsatz							
MMS	(in kt N)	1403	1403	1393	1385	1381	1378
MWMS	(in kt N)	1368	1250	1234	1225	1219	1214
Wirtschaftsdüngerausbringung							
MMS	(in kt N)	888	856	842	836	835	834
MWMS	(in kt N)	893	866	854	847	845	843
Ausscheidung auf der Weide							
MMS	(in kt N)	117	116	113	112	111	111
MWMS	(in kt N)	117	115	111	108	107	106
Ausbringung von Gär- rückständen aus Energie- pflanzen							
MMS	(in kt N)	198	120	88	88	88	88
MWMS	(in kt N)	198	120	88	88	88	88
Ernterückstände							
MMS	(in kt N)	562	597	598	595	592	591
MWMS	(in kt N)	577	603	604	600	597	595

Quelle: Annahmen und Berechnungen Thünen-Institut

Tabelle 13: Entwicklung abfallwirtschaftsbezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050

Indikator	Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Anzahl Depo- nien, die Förde- rung erhalten haben								
MMS = MWMS	absolut	7	7	4	4	4	0	0
Minderungsopo- tenzial								
MMS = MWMS	t CO ₂ -Äq. jährlich	104.375	211.104	637.271	1.022.123	1.180.504	933.247	742.929
Gaserfassung								
MMS = MWMS	% der gesamten Methanemissio- nen aus Depo- nierung	0,4%	1,2%	5%	10%	16%	23%	30%
Ausweitung von Bioabfällen pro Person (ge- trennte Samm- lung)								
MMS = MWMS	kg/Kopf/Jahr	67	70	78	78	78	78	78
Anteil Einmal- Kompostierung vs. Biogasanlage (hier Einmal- Komp.)								
MMS = MWMS	% von Gesamt	59%	58%	55%	53%	50%	50%	50%
Anteil Einmal- Kompostierung vs. Biogasanlage (hier Biogasanl.)								
MMS = MWMS	% von Gesamt	41%	42%	45%	47%	50%	50%	50%

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

Tabelle 14: Entwicklung LULUCF-bezogener Indikatoren im Vergleich der Szenarien, 2023-2050

Indikator		Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wald	MMS	Mio. ha	11	11	11	11	11	11	11

Indikator		Einheit	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ackerland	MMS	Mio. ha	13	12	12	12	12	12	12
Grünland	MMS	Mio. ha	7	7	7	7	7	7	7
Siedlung	MMS	Mio. ha	5	5	5	5	5	5	5
Feuchtgebiete	MMS	Mio. ha	1	1	1	1	1	1	1
Sonstiges Land	MMS	Mio. ha	0	0	0	0	0	0	0
Wald	MWMS	Mio. ha	11	11	11	11	11	11	11
Ackerland	MWMS	Mio. ha	13	12	12	12	12	12	12
Grünland	MWMS	Mio. ha	7	7	7	7	7	7	7
Siedlung	MWMS	Mio. ha	5	5	5	5	5	5	5
Feuchtgebiete	MWMS	Mio. ha	1	1	1	1	1	1	1
Sonstiges Land	MWMS	Mio. ha	0	0	0	0	0	0	0

Quelle: Annahmen und Berechnungen Thünen-Institut

Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

1 Einleitung

Hinweis

Es wird darauf hingewiesen, dass Projektionen nicht als Prognose kommender Jahre missverstanden werden dürfen. Für Projektionen werden Modelle eingesetzt, die eine langjährige, plausible Emissionsentwicklung unter den Bedingungen und Annahmen zum Start des Modellierungszeitpunktes projizieren. Auftretende Sondereffekte und unvorhergesehene, kurzfristige Ereignisse, wie z.B. vergangenes Jahr die Energiekrise, sind methodisch nicht oder nur begrenzt integrierbar. Vor diesem Hintergrund sollte eine Betrachtung zeitnaher Projektionsjahre nicht losgelöst erfolgen.

Dieses Kapitel basiert zu Teilen auf Repenning et al. (2021) und wurde entsprechend aktualisiert.

Im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) aus dem Jahr 2021 sind maximal zulässige Jahresemissionsmengen der einzelnen Sektoren bis zum Jahr 2030 festgelegt. Im KSG ist eine Treibhausgas-minderung von mindestens 65 % im Jahr 2030 und von mindestens 88 % im Jahr 2040 vorgesehen⁹. Bis zum Jahr 2045 soll Deutschland netto-treibhausgasneutral sein und nach dem Jahr 2050 soll eine negative Treibhausgasbilanz erreicht werden.

Der vorliegende Projektionsbericht 2023 stellt dar, wie sich die deutschen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 entwickeln könnten. Es werden zwei Szenarien projiziert. Das Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) beinhaltet alle Klimaschutzinstrumente und -maßnahmen, die bis zum Stichtag 31. August 2022¹⁰ bereits beschlossen und soweit implementiert sind, dass alle Daten und sonstigen Informationen, die für die Parametrisierung der Modelle erforderlich sind, vorliegen. Bisher lediglich geplante, jedoch noch nicht implementierte Maßnahmen werden zusätzlich im Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS) berücksichtigt. Ergänzungen und Korrekturen des Entwurfs des Instrumentenpapiers vom 19. September 2022, die in den folgenden Gesprächen mit den Ressorts eingebracht wurden, wurden auch nach dem oben genannten Stichtag berücksichtigt. Eine genaue Unterscheidung zwischen den beiden Szenarien ist in Abschnitt 2.5 beschrieben.

Insbesondere durch die nach dem Regierungswechsel im Herbst 2021 bereits beschlossenen Instrumente sowie weitere Entwicklungen auf europäischer Ebene als auch aufgrund der sich durch den Krieg in der Ukraine stark veränderten Energiepreise unterscheidet sich dieser Projektionsbericht wesentlich vom Projektionsbericht 2021. Die Projektionsergebnisse werden in Relation zu den Klimaschutzzielen der Bundesregierung, vor allem für das Jahr 2030, sowie den Vorgaben der Europäischen Klimaschutzverordnung (Effort Sharing Regulation (ESR)) gesetzt. Auch die Treibhausgas-minderung der Einzelinstrumente wird abgeschätzt.

Der vorliegende Bericht basiert auf Modellrechnungen eines deutschen Forschungskonsortiums aus Öko-Institut, dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und dem Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES). Diese erarbeiten diesen Bericht im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA). Die modellgestützte Analyse in den Bereichen Landwirtschaft¹¹ und Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) wurden durch das Johann Heinrich von Thünen-Institut durchgeführt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt gemäß

⁹ Dementsprechend wird im Bericht auf den Vergleich mit diesen Zielen abgestellt.

¹⁰ Unter Berücksichtigung des 3. Entlastungspakets, wie im Koalitionsausschuss am 3. September 2022 vereinbart.

¹¹ Mit Ausnahme energiebedingter Emissionen der Landwirtschaft.

dem Zuschnitt der Sektoren des KSG: Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, Landnutzung, LULUCF sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges. Die Ergebnisse der sektoralen Modelle werden hierbei mit Hilfe eines übergeordneten Modells integriert.

Rahmendaten, zu berücksichtigende Instrumente und wesentliche Annahmen für deren Parametrisierung wurden mit den jeweiligen Fachressorts im Herbst 2022 abgestimmt.

Szenarien, die in das Jahr 2050 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 durch einzelne Ressorts erstellt wurden, können im Einzelnen zu abweichenden Ergebnissen kommen.

Das Kapitel 2 enthält eine Übersicht zum methodischen Ansatz der Szenarienentwicklung. Kapitel 3 stellt die Gesamtergebnisse einschließlich der Sensitivitätsanalysen dar. Die Kapitel 4 bis 10 enthalten die Analysen zu den sektoralen Projektionen. Der Anhang A enthält einen Datenanhang mit Kernindikatoren, die verwendeten Rahmenannahmen und untersuchten Instrumente sowie eine Beschreibung der Sektormodelle. Anhang B enthält weitere Ergebnisse zur ESR.

Alle Maßnahmen werden im Rahmen der im Bundeshaushalt 2023 (und der Finanzplanung bis 2027) zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel finanziert. Mehrbedarfe an Personal- und Sachkosten sind in den jeweiligen Einzelplänen gegenzufinanzieren.

2 Methodischer Ansatz

2.1 Prozess der Projektionserstellung

Der Prozess zur Erstellung des Projektionsberichts umfasst mehrere Schritte, die aufeinander aufbauen.

Zunächst werden vom UBA die zum Beginn der Arbeiten aktuellen Daten zu Brennstoffeinsätzen und Emissionen des Treibhausgasinventars zur Verfügung gestellt. Für den Projektionsbericht 2023 war dies das Treibhausgasinventar des Jahres 2022. Daher beziehen sich auch alle dargestellten historischen Werte mit Ausnahme der Diagramme zur Emissionsentwicklung zu Beginn der Sektorkapitel auf den Datenstand 2022. Nach entsprechender Aufbereitung werden die historischen Daten von den Sektorarbeitenden zusammen mit den dazu passenden Energiebilanzdaten zur Kalibrierung ihrer Modelle genutzt.

Parallel dazu bzw. im Anschluss daran wird von den Forschungsnehmenden ein Entwurf möglicher Rahmendaten (vor allem Bevölkerungsentwicklung, Bruttoinlandsprodukt sowie Energie- und CO₂-Preise) sowie der in den Szenarien zu berücksichtigenden Politikinstrumente einschließlich deren Parametrisierung erstellt. Diese werden (z.T. in mehreren Abstimmungsrunden) mit dem UBA sowie den beteiligten Fachressorts abgestimmt.

Für die Modellierung werden die Brennstoff- und CO₂-Preise weiter aufbereitet. So werden beispielsweise die Brennstoffpreise frei Kraftwerk oder die Strompreise für die Endverbrauchssektoren abgeleitet. Darüber hinaus werden die Preise auf eine gemeinsame Preisbasis umgerechnet.

Auf Basis der abgestimmten Rahmendaten und Politikinstrumente erfolgt die Modellierung. Einige Modellierungen können parallel erfolgen, andere sequenziell. So kann beispielsweise die Modellierung des Landwirtschaftssektors (überwiegend) unabhängig von den anderen Sektoren erfolgen. Die Modellierung der Stromerzeugung (die wiederum für die Ergebnisse der Energiewirtschaft und der Industrie relevant ist) kann erst nach Abschluss der Modellierung der Endverbrauchssektoren (z.B. Gebäude, Verkehr oder Teile der Industrie) erfolgen. Weitere Emissionsquellen (z.B. flüchtige Emissionen) können erst gegen Ende des Prozesses ermittelt werden.

Nach Abschluss der Modellierungen werden die Ergebnisse integriert und in verschiedenen Ergebnisformaten ausgespielt (z.B. nach KSG- oder ESR-Struktur).

Nach Vorliegen der Ergebnisse für die jeweiligen Teilbereiche kann die Berichtserstellung erfolgen. Dieser wird zunächst vom UBA und dann von den Fachressorts inhaltlich geprüft. Fachlich relevante Kommentare werden von den Forschungsnehmenden in den Bericht eingearbeitet. Am Ende des Prozesses wird eine finale Berichtsversion erstellt und an die Ressorts zur Abnahme geleitet.

Dieser Prozess kann insgesamt acht bis zwölf Monate dauern, vor allem in Abhängigkeit vom zeitlichen Aufwand der verschiedenen Abstimmungsrunden sowie dem Zeitbedarf für die Modellierung. Dies bedeutet somit auch, dass sich die Rahmendaten sowie die Instrumente nach Abschluss der Berichtserstellung im Vergleich zu den ursprünglichen Annahmen weiterentwickelt haben können. Nachträgliche Änderungen können aufgrund der beschriebenen Komplexität der Modellierung jedoch (in der Regel) nicht berücksichtigt werden.

2.2 Definition und Abgrenzung der Sektoren

Dieser Abschnitt basiert zu Teilen auf Repenning et al. (2021) und wurde entsprechend aktualisiert.

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), Raffineriefeuerungen 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 Klimaschutz (BMWK).
- ▶ **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 Sondernverkehrs (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 Klimaschutz (BMWK).
- ▶ **Gebäude:** Der Sektor Gebäude umfasst neben der Gebäudewärme auch den Brennstoffeinsatz für die Warmwasserbereitung¹² 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 für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- ▶ **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 ebenfalls behandelt, allerdings werden deren Treibhausgasemissionen nicht auf die inländischen Emissionen angerechnet, sondern lediglich nachrichtlich ausgewiesen. Sondernverkehre 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 der Erdgaspipelinetransport (1.A.3.e) in der Energiewirtschaft enthalten. Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV).
- ▶ **Landwirtschaft:** Neben den biologisch-chemischen Emissionen von Tieren und landwirtschaftlichen Böden (3) umfasst dieser Sektor auch die energetischen Emissionen der Land-

¹² Emissionen in Bezug auf den Stromverbrauch für Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung werden im Bereich der Stromerzeugung bilanziert (siehe Abschnitt 3.8).

wirtschaft, 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, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV).
- ▶ **Landnutzung und Forstwirtschaft:** Dieser Sektor umfasst die Emissionen von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (englisch: Land use, land-use change and forestry) (4).¹³ Federführende Ressorts für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) sowie das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV).

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. Entsprechendes gilt für eine Substitution fossiler Brennstoffe durch Fernwärme.

Tabelle 15 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.

Weitere Infos zur Zuordnung von Treibhausgasemissionen zu Inventarkategorien können Emele et al. (2019) entnommen werden.

¹³ Gegenüber den anderen KSG-Sektoren weist dieser Sektor zwei Besonderheiten auf: Zum einen gibt es kein Emissionsminderungsziel wie in den anderen Sektoren, jedoch ein quantifiziertes Senkenziel. 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 15: 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, Dienstleitungen	Gebäude	GHD	
1.A.4.b Haushalte	Gebäude	Private Haushalte	
1.A.4.c Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei	Landwirtschaft	GHD	Energiebedingte Emissionen
1.A.5 Andere Bereiche	Gebäude	GHD	Militär (stationär und mobil)
1.B Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	Energiewirtschaft	Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	
1.D.1 Internationaler Luftverkehr und Hochseeschifffahrt	Keiner	Keiner	
2 Industrieprozesse	Industrie	Industrieprozesse und Produktverwendung	Einschließlich Produktverwendung
3 Landwirtschaft	Landwirtschaft	Landwirtschaft	Biologisch-chemische Emissionen
4 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft	Landnutzung und Forstwirtschaft	LULUCF	
5 Abfall und Abwasser	Abfallwirtschaft und Sonstiges	Abfallwirtschaft	Abfallverbrennung ist in Energiewirtschaft und Industrie enthalten

Quelle: (Repenning et al. 2021)

2.3 Methodischer Ansatz für die Emissionsprojektionen

Dieser Abschnitt wurde zu Teilen Repenning et al. (2021) und Repenning et al. (2023) entnommen.

Die Erstellung der Projektionen für die (deutschen) Treibhausgasemissionen bis 2050 erfolgt auf der Basis von mit den Ressorts abgestimmten Annahmen zur

- ▶ Bevölkerungsentwicklung,
- ▶ Wirtschaftsentwicklung,
- ▶ Energie- und CO₂-Preisentwicklungen sowie
- ▶ technische und sektorspezifische Faktoren.

Grundsätzlich erfolgt die Modellierung instrumentengetrieben. Dabei werden klimapolitische Instrumente parametrisiert, beispielsweise Gesetze, Regulierungen, ökonomische Instrumente (z. B. CO₂-Bepreisung) oder vorgesehene Haushaltsmittel. Die klimapolitischen Instrumente zielen auf ein breites Spektrum an Klimaschutzmaßnahmen und damit verbundenen Treibhausgasminderungen. Der Ermittlung der aus den Klimaschutzinstrumenten resultierenden Effekte wie z. B. die Entwicklung des Absatzes von Elektrofahrzeugen, von Wärmepumpen oder die Stromerzeugung nach Brennstoffen erfolgt modellendogen.

Neben quantifizierbaren Instrumenten gibt es flankierende Instrumente, deren Wirkung nicht quantifiziert werden kann. Flankierende Instrumente unterstützen die Umsetzung quantifizierbarer Instrumente. So können beispielsweise informatorische Instrumente Hemmnisse für andere Instrumente in einzelnen Sektoren reduzieren. Die Instrumentenwirkung wird dabei dem quantifizierbaren Instrument zugeordnet.

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

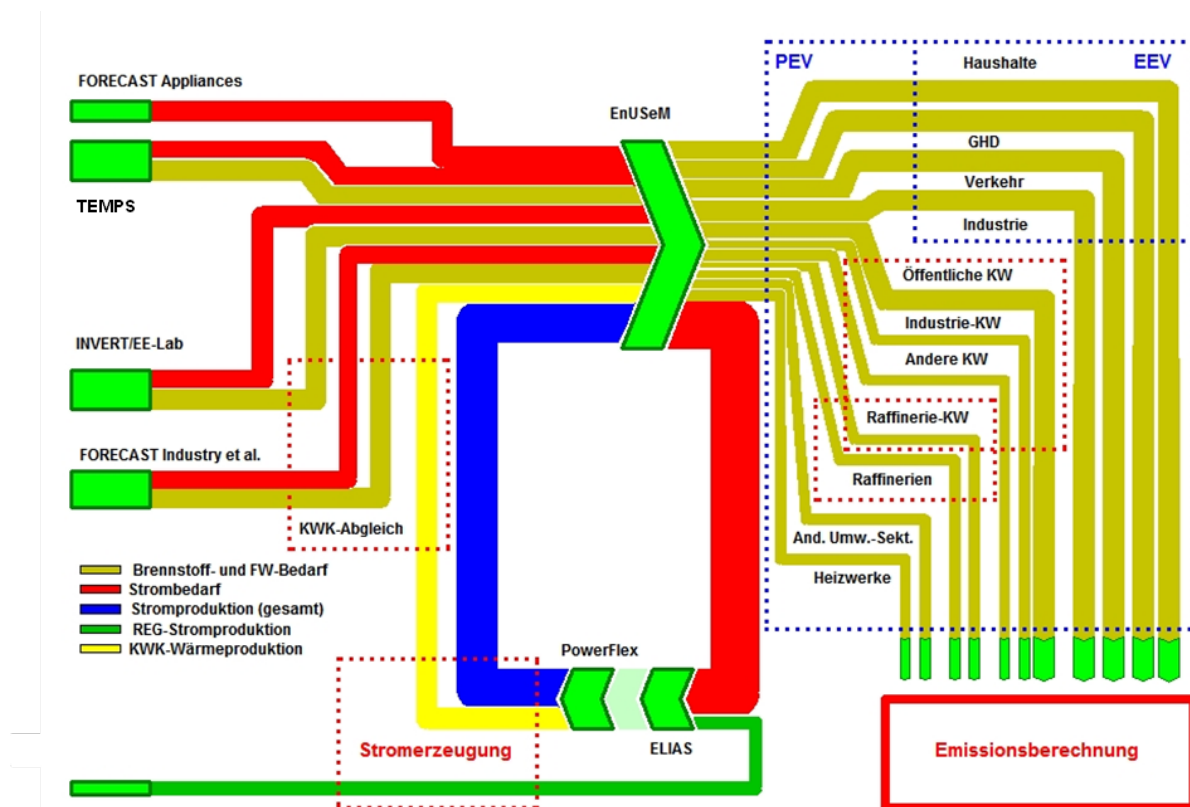
Für die energiebedingten Treibhausgasemissionen aus Verbrennungsprozessen basieren die Analysen auf einem komplexen System verschiedener Modelle (Abbildung 3)

- ▶ Die Stromerzeugung auf Basis fossiler Energieträger sowie die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird mit dem PowerFlex-Modell¹⁴ des Öko-Instituts analysiert. 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.
- ▶ Für den Verkehrsbereich erfolgt die Modellierung mit dem Modell TEMPS des Öko-Instituts.

¹⁴ Die Kraftwerksstilllegung wird auf Basis des Stilllegungsmoduls des Modells ELIAS durchgeführt.

- 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.
- Analysen für den verbleibenden Brennstoff- und Strombedarf im Sektor Gebäude werden unter der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI durchgeführt.
- Die Analysen für den Strom- und Brennstoffbedarf der Sektoren Industrie sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistung erfolgen unter Zuhilfenahme der Modellplattform FORECAST des Fraunhofer ISI, die auf einzelnen Sektormodellen beruht.
- 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.

Abbildung 3: Modellübersicht zur Analyse der energiebedingten Treibhausgasemissionen



Quelle: (Repenning et al. 2021)

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.

Für die Emissionen aus Industrieprozessen werden die folgenden Ansätze verfolgt:

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

- ▶ 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.
- ▶ 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.
- ▶ Für die HFKW-, FKW-, SF₆- und NF₃-Emissionen werden vorliegende Projektionen aktualisiert und im Modell ProFI angepasst.

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

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

Die Berechnungen der Szenarien in diesem Bericht sind in großem Maß vom nationalen Treibhausgasinventar abhängig. Das aktuelle zum Zeitpunkt der Berechnung verfügbare Treibhausgasinventar ist aus dem Berichtsjahr 2022 und wurde unter Anwendung der 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC 2006) unter Verwendung der Inventar-Berichterstattungsrichtlinien der Klimarahmenkonvention (UNFCCC 2013) erstellt. Es wurden die Daten für die Jahre 1990 bis 2020 verwendet. Die primären Datenquellen zur Erstellung dieses Berichts sind die historischen Daten im Treibhausgasinventar (UBA 2022b) sowie eine zu diesem Inventar konsistente Datenauspielung aus dem Zentralen System Emissionen (ZSE) im UBA (UBA 2022a). 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.

Die in diesem Projektionsbericht 2023 verwendeten Treibhausgaspotenziale entsprechen denen des 5. Sachstandsberichts (Assessment Report) des IPCC (AR5)¹⁵. Im Projektionsbericht 2021 wurden die Treibhausgaspotenziale des 4. Sachstandsberichts des IPCC (AR4)¹⁶ verwendet. Diese methodische Umstellung wirkt sich auch auf die Berechnung der Treibhausgasemissionen aus.

2.4 Berücksichtigung des Ukraine-Krieges in den Projektionen

Der Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine wirkt sich in verschiedenen Aspekten auf die Projektionen aus. So war die Erwartung zur wirtschaftlichen Entwicklung nach Beginn des Krieges weitaus schlechter als zum Zeitpunkt der Berichtserstellung. Dies wirkt sich vor allem auf die Modellierung des Industriesektors aus. Darüber hinaus hat sich die Abschätzung der Bevölkerungsentwicklung in Deutschland durch den Zuzug von Geflüchteten aus der Ukraine geändert.

¹⁵ <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>

¹⁶ <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar4/>

Die wichtigsten Auswirkungen sind jedoch vor allem die gestiegenen Energiepreise, insbesondere von Kohle und Erdgas. Höhere Energiepreise wirken sich entsprechend auch auf die Modellierung der Treibhausgasemissionen verschiedener Sektoren aus. Eine detaillierte Diskussion der Ableitung dieser Rahmendaten unter Berücksichtigung des Effekts des Ukrainekriegs kann dem veröffentlichten Rahmendatenpapier für diesen Projektionsbericht (Mendelevitch et al. 2022) entnommen werden. Die Energiepreise zeigten nicht nur im Jahr 2022, sondern auch noch in der ersten Hälfte 2023 eine starke Dynamik. Zum Zeitpunkt der Ableitung der Rahmendaten im Sommer 2022 herrschte erhebliche Verunsicherung auf den Brennstoffmärkten, was sich insbesondere in sehr stark gestiegenen und auch für die nächsten Jahre sehr hohen Preisen für Kohle und Erdgas äußerte. Die Situation hat sich seitdem erkennbar beruhigt. Sorgen um Versorgungsengpässe haben sich nicht bewahrheitet. Darüber hinaus besteht im Vergleich zu den Erwartungen aus dem Vorjahr keine weitere Knappheit durch die Notwendigkeit der Befüllung der Erdgasspeicher und keine weitere Knappheit durch die kurzfristige Steinkohlebevorratung. Dadurch sind Erdgas- und Kohlepreise deutlich gesunken und sind jetzt z.T. auf Niveaus, die im ursprünglichen Datensatz erst für 2026-2027 abgeschätzt wurden. Die aktuelle, deutlich moderatere Preisentwicklung im laufenden Jahr 2023 konnte jedoch nicht mehr in den Rahmendaten und damit in der Gesamtmodellierung berücksichtigt werden. Eine Sensitivität mit niedrigeren Brennstoffpreisen für Erdgas und Steinkohle für den Zeitraum 2023 bis 2030 zeigt jedoch die Effekte in der Energiewirtschaft auf (siehe Abschnitt 3.3.2).

2.5 Abgrenzung der Szenarien

Es werden zwei Szenarien modelliert: das Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) sowie das Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS). Das MMS entspricht dem Umsetzungsstand, während das MWMS den Planungsstand darstellt und dessen Umsetzung damit unsicherer ist.

Nach Festlegung durch das UBA sowie Diskussion mit dem Modellierungskonsortium wurden das MMS und MWMS im Rahmen der Treibhausgasprojektionen 2023 wie folgt abgegrenzt.

Wesentliche Voraussetzung für alle Politiken und Maßnahmen (PaMs) ist dabei, dass sie eine wesentliche Änderung der deutschen Treibhausgasemissionen zur Folge haben.

Änderungen der Zuordnung der Instrumente zu den beiden Szenarien, die während der auf den Entwurf des Instrumentenpapiers folgenden Gespräche mit den Ressorts erfolgten, wurden im Instrumentenpapier berücksichtigt.

2.5.1 Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS)

Die Politiken und Maßnahmen des MMS sind umgesetzt oder angenommen. Dies wird im Detail wie folgt definiert:

- ▶ Grundsätzlich ist anzunehmen, dass bei Politiken und Maßnahmen im MMS keinerlei Änderungen mehr im Legislativ-Prozess erfolgen.
- ▶ Umgesetzte Maßnahmen und Instrumente, d.h. direkt anwendbares nationales oder EU-Recht.
- ▶ Angenommene Maßnahmen und Instrumente, d.h. Politiken und Maßnahmen, die mit einer offiziellen Regierungsentscheidung legislativ unterlegt sind. Diese Entscheidungen bzw. Politiken und Maßnahmen müssen klar definiert und eine Umsetzung muss (fast) sicher sein. Sofern Informationen zur Umsetzung nicht vorliegen, werden die Politiken und Maßnahmen im MWMS betrachtet.

- ▶ (Detaillierte) (Maßnahmen-)Ziele ohne Hinterlegung mit Instrumenten werden nicht im MMS betrachtet, sondern im MWMS, sofern sie den entsprechenden Anforderungen entsprechen.
- ▶ Freiwillige Vereinbarungen mit privaten Akteuren können im Rahmen des MMS berücksichtigt werden.

Vor diesem Hintergrund sollten die Politiken und Maßnahmen des MMS (mindestens) die folgenden Instrumente beinhalten:

- ▶ PaMs aus dem Projektionsbericht 2021, unter der Voraussetzung, dass die obenstehende Definition zutrifft
- ▶ PaMs, die nach dem Projektionsbericht 2021 bis zum 31. August 2022 (unter Berücksichtigung des 3. Entlastungspakets, wie im Koalitionsausschuss am 3. September 2022 vereinbart) angenommen oder bereits umgesetzt wurden
- ▶ Osterpaket der Bundesregierung (da bereits legislativ unterlegt)
- ▶ PaMs gemäß interner Umsetzungsabfrage des BMWK

2.5.2 Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS)

Die Politiken und Maßnahmen des MWMS sind wie folgt definiert:

- ▶ Geplante Instrumente, die eine realistische Chance haben, verabschiedet zu werden; dazu gehören auch verabschiedete Ziele, für die eine realistische Chance besteht, dass entsprechende Instrumente verabschiedet werden.
- ▶ Instrumente, die bis zum 31. August 2022 soweit finalisiert wurden, dass sie als geplant gelten, aber noch nicht angenommen oder umgesetzt wurden
- ▶ Die Politiken und Maßnahmen müssen hinreichend klar definiert sein
- ▶ Allgemein ist anzunehmen, dass noch Änderungen bei MWMS-PaMs im Legislativ-Prozess erfolgen können.

Vor diesem Hintergrund sollten die Politiken und Maßnahmen des MWMS (mindestens) die folgenden Instrumente beinhalten:

- ▶ PaMs, die der obenstehenden Definition entsprechen
 - Sofortprogramm Gebäude (BMWK/BMWSB)
 - Sofortprogramm Verkehr (BMDV)
- ▶ Fit for 55: Politiken und Maßnahmen auf EU-Ebene bzw. deren Umsetzung in nationales Recht, die ausreichend beschrieben sind, sich bereits im Trilog befinden und die eine realistische Chance zur Verabschiedung haben.

2.5.3 Überblick über die in den Szenarien berücksichtigten Instrumente

Tabelle 16 gibt einen Überblick über die in den Szenarien berücksichtigten Instrumente. Eine detaillierte Beschreibung sowie die jeweilige Parametrisierung kann dem Instrumentenpapier entnommen werden (Anhang A.3).

Tabelle 16: Überblick über die in MMS und MWMS berücksichtigten Instrumente und Maßnahmen

Instrumentenname ¹⁷	MMS	MWMS
Sektorübergreifende Instrumente		
EU-Emissionshandelssystem*	X	X
EEG-Umlagesenkung*	X	X
Energie- und Strombesteuerung*	X	
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)*	X	X
Klima- und Transformationsfondsgesetz (KTFG)*	X	X
Nationale Klimaschutzinitiative (NKI)*	X	X
Nationale Wasserstoffstrategie*	X	X
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie*	X	X
Energielabel – EU-Verordnung zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung*	X	X
NEC-Richtlinie über nationale Emissionsminderungsverpflichtungen für bestimmte Luftschadstoffe	X	X
Klimaneutrale Bundesverwaltung bis 2030*	X	X
Freiwillige Produktkennzeichnungen für energierelevante Produkte (Blauer Engel, Energy Star, EU-Umweltzeichen)	X	X
Förderung von Contracting	X	X
Stärkung der Forschung für mehr Energieeffizienz	X	X
Verbesserung der Rahmenbedingungen für Energieeffizienzdienstleistungen	X	X
Finanzpolitik / Sustainable Finance	X	X
Forschung und Innovation	X	X
Klimaschutz und Gesellschaft	X	X
Flankierende Instrumente aus der Effizienzstrategie 2050	X	X
Energetische Stadtsanierung	X	X
Ambitionierte Ausgestaltung von Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie*		X
Umweltfreundliche und kreislaforientierte Produkte – EU Ökodesign-Richtlinie*		X
Revision der EU-Energieeffizienzrichtlinie (EED)*		X
Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über kurzfristig wirksame Maßnahmen (EnSiku MaV)*	X	X

¹⁷ * Sektorübergreifende, jedoch auf sektoraler Ebene quantifizierte Maßnahmen

Instrumentenname ¹⁷	MMS	MWMS
Stromsektor / Energiewirtschaft		
Schrittweise Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung auf Basis des KVBG (bis 2038) und des aktuellen Gesetzentwurfs zur Beschleunigung des Braunkohleausstiegs im Rheinischen Revier	X	
Schrittweise Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung bis 2030		X
Ausbau der Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung (KSPr 2030 Maßnahme 3.4.1.2 / SPr 2021 Maßnahme II.4) und Energiesofortmaßnahmenpaket entsprechend den Ausbaumengen im EEG	X	
Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung (KSPr 2030 Maßnahme 3.4.1.2 / SPr 2021 Maßnahme II.4) und Energiesofortmaßnahmenpaket auf 80 % des Bruttostromverbrauchs		X
Weiterentwicklung und umfassende Modernisierung der Kraft-Wärme-Kopplung (KSPr 2030 Maßnahme 3.4.1.3)	X	X
Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umstellen - Fördervolumen nach BEW (KSPr 2030 Maßnahme 3.4.1.4 und SPr 2021 Maßnahme II.1)	X	
Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umstellen – 50 % klimaneutral bis 2030 (KSPr 2030 Maßnahme 3.4.1.4 und SPr 2021 Maßnahme II.1)		X
Investitionsprogramm – Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft (KSPr 2030 Maßnahme 3.4.1.9 / 3.4.4.1)	X	X
Förderung der Produktion grünen Wasserstoffs (Offshore Elektrolyseure) (SPr 2021 Maßnahme II.2)	X	X
Wasserstoff Global (H2Global) (SPr 2021 Maßnahme II.3)	X	X
Wasserstoffkraftwerke (EEG 2023)	X	X
Energieeffizienzstrategie 2050 (EffSTRA) (KSPr 2030 Maßnahme 3.4.1.6) (nicht quantifizierbar)	X	X
Reallabore der Energiewende (KSPr 2030 Maßnahme 3.4.1.5) (nicht quantifizierbar)	X	X
Begleitmaßnahmen Energiewende (KSPr 2030 Maßnahme 3.4.1.7) (nicht quantifizierbar)	X	X
EU-Kooperation (KSPr 2030 Maßnahme 3.4.1.8) (nicht quantifizierbar)	X	X
Kommunale Wärmeplanung (nicht quantifizierbar)		X
Verkehr		
Kaufprämie E-Pkw	X	X
Absenkung der Dienstwagenbesteuerung für E-Pkw bis 2030	X	X
Stärkere Gewichtung der CO ₂ -Komponente der Kraftfahrzeugsteuer ab 2021	X	X
Senkung der Stromkosten – Abschaffung EEG-Umlage	X	X

Instrumentenname ¹⁷	MMS	MWMS
Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler	X	X
CO ₂ -Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr (BEHG)	X	X
Attraktivität des ÖPNV erhöhen	X	X
Ausbau von Radwegen und Fahrradparkmöglichkeiten sowie Verbesserung der Rahmenbedingungen	X	X
Zuschuss für schwere Nutzfahrzeuge mit klimaschonenden Antrieben	X	X
Mautbefreiung von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben	X	X
Bundesfinanzhilfen zum Ausbau der Landstromversorgung in Häfen	X	X
Höhere CO ₂ -Emissionsstandards für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	X	X
CO ₂ -Emissionsstandards für schwere Nutzfahrzeuge	X	X
THG-Quote (inklusive Förderprogramm für fortschrittliche Biokraftstoffe und strombasierte Kraftstoffe)	X	X
Beimischquote für PtL im Flugverkehr	X	X
Tank- und Ladeinfrastruktur ausbauen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	X	X
Tank-, Lade- und Oberleitungsinfrastruktur ausbauen für Nutzfahrzeuge	X	X
Investitionen in die Schiene	X	X
Hybridelektrisches Fliegen / Klimaneutrales Fliegen	X	X
Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen und innovative Mobilitätsformen ermöglichen	X	X
Digitalstrategie Deutschland	X	X
Förderung Binnenschifffahrt (verschiedene Programme)	X	X
Nullemissionen Schiff / Maritimes Forschungsprogramm	X	X
Beschleunigung von Planung und Umsetzung neuer Infrastrukturen	X	x
Erweiterung der kommunalen Handlungsspielräume / Gebühren für Bewohnerparkausweise	X	X
CO ₂ -Differenzierung der Lkw-Maut / Erweiterung der Lkw-Maut auf alle Lkw		X
Einführung des Deutschlandtickets für den Nahverkehr		X
Ausbau der Förderung effizienter Trailer		X
Hybridelektrisches Fliegen / Klimaneutrales Fliegen (MWMS)	X	X
Gebäude		
Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)	X	X
Steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung	X	X
Installationsverbot von neuen Ölkesseln ab 2026	X	X

Instrumentenname ¹⁷	MMS	MWMS
Gebäudeenergiegesetz	X	X
Serielle Sanierung	X	X
Vorbildfunktion Bundesgebäude	X	X
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	X	X
Energieausweis	X	X
Bundesförderung für Energieberatung	X	X
Fortentwicklung des Innovationsprogramms Zukunft Bau	X	X
Modernisierungsumlage	X	X
Pflicht zur Nutzung von 65 % erneuerbaren Energien (GEG)		X
Weiterentwicklung der energetischen Standards (GEG)		X
Mindestenergieeffizienzstandards für Bestandsgebäude		X
Umlagebegrenzung des BEHG	X	X
Zielvorgaben für kumulierten Energieaufwand (KEA) und Treibhausgasemissionen für den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden		X
Energieeinsparverordnung für Bundesgebäude	X	X
Überarbeitung Energieausweise		X
Teilwarmmieten-Modell als Alternative zur Modernisierungsumlage		X
Aufbauprogramm und Qualifikationsoffensive Wärmepumpe		X
Heizungsoptimierung (EnSimiMaV)	X	X
Private Haushalte – Strom		
Energie- und Strombesteuerung	X	X
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)	X	X
EEG-Umlagesenkung	X	X
Mindesteffizienzstandards - EU Ökodesign-Richtlinie	X	X
Energielabel – EU-Verordnung zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung	X	X
Beratung einkommensschwacher Haushalte (Stromsparcheck)	X	X
Einführung intelligenter Messgeräte (Smart Meter) zur Stromverbrauchsmessung	X	X
Ambitionierte Ausgestaltung von Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie		X
Umweltfreundliche und kreislaforientierte Produkte – EU Ökodesign-Richtlinie		X

Industrie

Instrumentenname ¹⁷	MMS	MWMS
EU-Emissionshandel	X	X
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme	X	X
EEG-Umlagesenkung	X	X
Spitzenausgleich	X	X
Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft	X	X
Kälte-Klima-Richtlinie	X	X
NKI: Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen	X	X
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie	X	X
Energieberatung Mittelstand	X	X
Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz	X	X
Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke	X	X
Pilotprogramm Einsparzähler	X	X
Energieauditpflicht für Nicht-KMU	X	X
KfW-Effizienzprogramm – Produktionsanlagen/-prozesse	X	X
Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft	X	X
Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie	X	X
EU-ETS-Innovationsfonds	X	X
Klimaschutzverträge	X	X
IPCEI Wasserstoff in der Industrieproduktion	X	X
Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)	X	X
Leitmärkte für klimafreundliche Produkte		X
Digitale Ökosysteme für eine klimafreundliche Industrie		X
"Superabschreibungen" für Klimaschutz		X
Verpflichtung zur Einführung von Energiemanagementsystemen		X
Zusätzlich flankierende Instrumente	X	X
EU-F-Gase-Verordnung 517/2014	X	X
EU-MAC-Richtlinie 2006/40/EG	X	X
Chemikalien-Klimaschutzverordnung	X	X
Kälte-Klima-Richtlinie	X	X
Selbstverpflichtung SF ₆	X	X
Verschärfter HFKW-Phase-Down per Revision der EU-F-Gase-Verordnung 517/2014		X

Instrumentenname ¹⁷	MMS	MWMS
Inverkehrbringungsverbote für SF ₆ in elektrischen Schaltanlagen		X
Landwirtschaft		
Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft	X	X
Ausbau des Ökolandbaus	X	X
Energieeffizienz in der Landwirtschaft	X	X
Senkung der Stickstoffüberschüsse und Verbesserung der Stickstoffeffizienz	X	X
Verringerung der Treibhausgasemissionen in der Tierhaltung	X	X
Forschungsinitiative zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030	X	X
LULUCF		
Begrenzung der Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke bis 2030 auf unter 30 Hektar pro Tag	X	X
Humuserhalt und -aufbau im Ackerland	X	X
Erhalt von Dauergrünland	X	X
Schutz von Moorböden einschließlich Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten	X	X
Erhaltung und nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder und Holzverwendung	X	X
Honorierung der Ökosystemleistung des Waldes	X	X
Forschungsinitiative Klimaschutz in Land- und Forstwirtschaft	X	X
Holzbauinitiative		X
Abfallwirtschaft		
Deponieverordnung	X	X
Kreislaufwirtschaftsgesetz	X	X
Förderung der Deponiebelüftung	X	X
Förderung von Technologien zur optimierten Erfassung von Deponiegasen in Siedlungsabfällen	X	X
Förderung von Klimafreundlicher Abwasserbehandlung	X	X
Reduktion von Lebensmittelabfällen	X	X

Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut

3 Gesamtergebnisse

Für diesen Projektionsbericht wurden Treibhausgasemissionen im MMS und im MWMS für alle Jahre von 2023 bis 2050 berechnet. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Gesamtemissionen in diesen beiden Szenarien und vergleicht sie mit historischen Emissionen sowie mit den Zielen des KSG¹⁸.

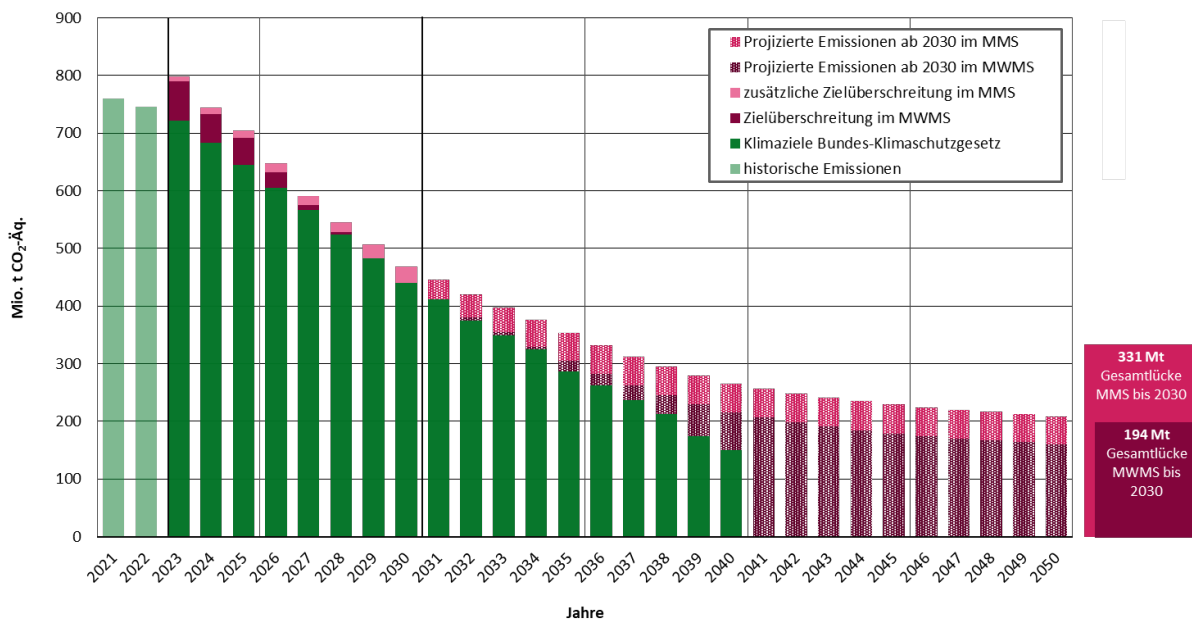
Im MMS werden für das Jahr 2030 Treibhausgasemissionen (ohne LULUCF) von rund 467 Mio. t CO₂-Äq. projiziert. Dies entspricht einer Emissionsreduktion von knapp 63 % gegenüber dem Referenzjahr 1990. Im MWMS betragen die projizierten Emissionen im Jahr 2030 rund 438 Mio. t CO₂-Äq.; die Emissionsreduktion beläuft sich auf rund 65 %. Bis zum Jahr 2050 projiziert das MMS eine Emissionsreduktion von gut 83 % und das MWMS gut 87 %. In den Jahren 2023 bis 2030 liegen die Gesamtemissionen im MMS (dargestellt durch hellrote Balken) über den im KSG festgelegten JEM¹⁹. Die projizierten Gesamtemissionen im MWMS (dargestellt durch dunkelrote Balken) liegen von 2023 bis 2028 ebenfalls über den JEM, während 2029 und 2030 die JEM in diesem Szenario eingehalten werden.

Für die Jahre nach 2030 liegen die projizierten Gesamtemissionen in beiden Szenarien über jenen Emissionen, die sich aus den jährlichen Minderungszielen gemäß Anlage 3 des KSG ergeben. Für die Jahre nach 2040 wurden keine Ziele im KSG festgelegt. Es muss jedoch bis 2045 Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden, wobei die Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre, insbesondere im LULUCF-Sektor mitberücksichtigt wird. Da die verbleibenden projizierten Emissionen im MMS und MWMS ab 2045 rund 200 Mio. t CO₂-Äq. jährlich betragen, wird ohne weitere Maßnahmen die Annahme in der Gesetzeskommentierung zum KSG 2021, die Restemissionen auf 3 % ggü. 1990 (ca. 39 Mio. t CO₂-Äq.) zu begrenzen, deutlich verfehlt. Auch die angestrebten Restemissionen im Koalitionsvertrag 2021 von 5 % würden deutlich nicht ausreichen, um Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen.

¹⁸ Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

¹⁹ Die JEM wurden durch Addition der im KSG festgelegten sektoralen JEM bestimmt. Da im KSG für die Energiewirtschaft nur JEM für 2022 und 2030 angegeben sind, wurden die Werte für 2023 bis 2029 durch Interpolation bestimmt, um die Regelung des § 4 Absatz 1 abzubilden, nach der im Sektor Energiewirtschaft „die Treibhausgasemissionen zwischen den angegebenen Jahresemissionsmengen möglichst stetig“ sinken sollen.

Abbildung 4: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland zwischen 2021 und 2050 im MMS und MWMS (ohne LULUCF)



Anmerkung: Die Treibhausgasemissionen im Jahr 2021 wurden dem nationalen Inventarbericht 2023 entnommen; der Wert für 2022 der Vorjahresschätzung.

Quelle: Modellierung: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut; Inventardaten: (UBA 2023a), (UBA 2023b).

In Abbildung 4 ergibt sich der relativ hohe projizierte Wert im Jahr 2023 daraus, dass in den verwendeten Rahmendaten auf Grund des Angriffskrieges Russlands auf die Ukraine ein relativ hoher Gaspreis für 2023 angenommen wurde, der einen erhöhten Einsatz von Kohlekraftwerken und damit höhere Treibhausgasemissionen nach sich zieht. Im Anschluss an die Festlegung der Rahmendaten reduzierte sich jedoch der Gaspreis. In der Sensitivitätsanalyse (Kapitel 3.3) wurde ein niedrigerer Gaspreis für 2023 angenommen.

3.1 Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren

Der projizierte Verlauf der Treibhausgasemissionen entwickelt sich in den Sektoren unterschiedlich, wie in Tabelle 17 zu sehen ist. Im Sektor Energiewirtschaft wird die JEM für 2030 sowohl im MMS als auch im MWMS eingehalten. Im Sektor Landwirtschaft wird die JEM 2030 nur im MWMS eingehalten, und in den restlichen Sektoren werden die JEM 2030 in beiden Szenarien überschritten.

Die projizierten Gesamtemissionen aller Sektoren liegen im MMS über der JEM 2030; im MWMS wird diese JEM unterschritten.

Die Sektoren LULUCF und internationaler Luft- und Seeverkehr, für die keine JEM festgelegt wurden, zeigen keine ausgeprägten Fluktuationen im Verlauf des projizierten Zeitraums. Im MWMS stellt der LULUCF-Sektor eine größere Senke als im MMS dar, verfehlt aber dennoch die Zwischenziele in den Jahren 2030, 2040 und 2045.

Tabelle 17: Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren in ausgewählten Jahren zwischen 2019 und 2050 im MMS und MWMS

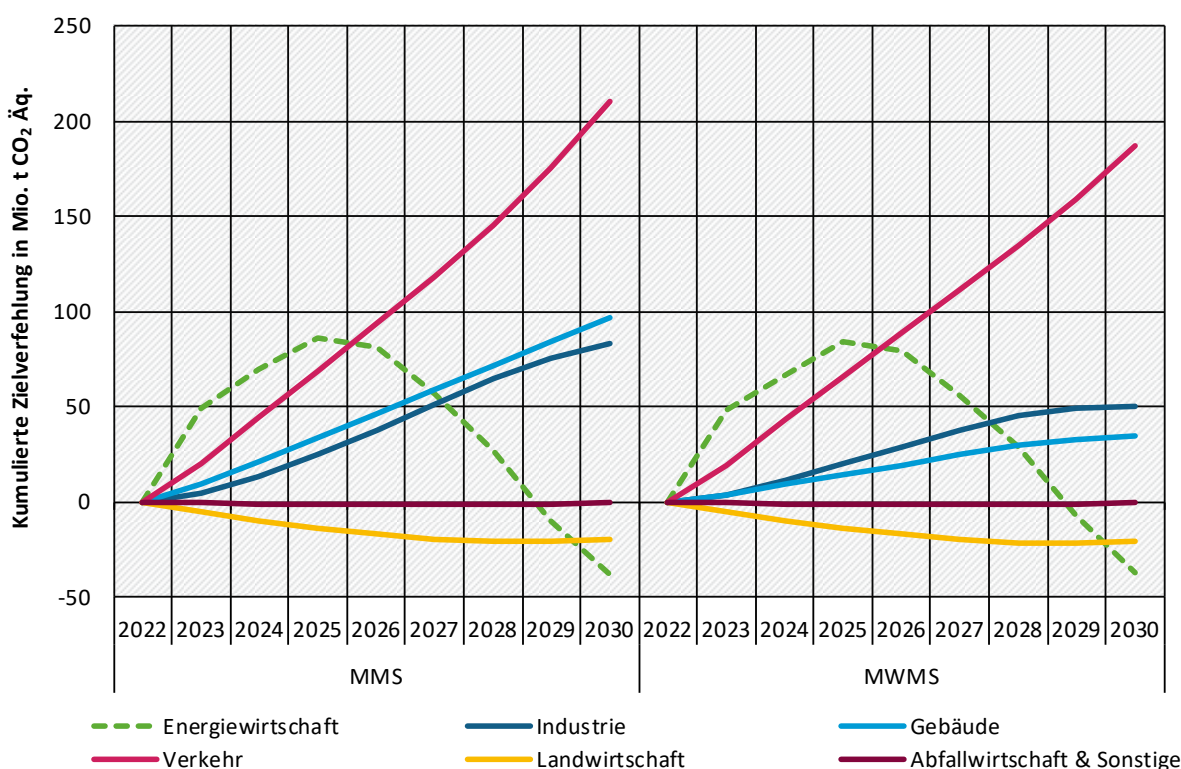
Sektor	Szenario	2019	2025	2030	JEM 2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.									
Energiewirtschaft	MMS	259,5	217,6	79,9	108,1	61,6	41,6	42,6	44,4
	MWMS	259,5	218,2	78,0		52,1	39,0	38,6	40,7
Industrie	MMS	182,7	169,8	127,1	119,4	91,8	72,0	63,0	58,2
	MWMS	182,7	166,9	120,4		84,6	65,4	56,5	50,9
Gebäude	MMS	121,4	103,2	78,3	65,9	52,7	37,6	31,0	26,1
	MWMS	121,4	96,2	68,2		37,7	20,5	14,2	10,8
Verkehr	MMS	163,8	145,4	118,3	83,7	86,5	54,3	33,7	21,7
	MWMS	163,8	144,1	111,4		73,2	35,7	15,3	4,0
Landwirtschaft	MMS	64,4	60,8	57,9	57,3	56,6	55,8	55,6	55,5
	MWMS	64,4	59,0	53,9		52,5	51,5	51,2	50,8
Abfallwirtschaft und Sonstiges	MMS	10,1	7,5	5,7	5,0	4,4	3,6	3,2	2,9
	MWMS	10,1	7,5	5,7		4,4	3,6	3,2	2,9
Gesamt	MMS	802,0	704,4	467,3	439,5	353,7	264,9	229,0	208,8
	MWMS	802,0	691,8	437,7		304,5	215,6	178,9	160,1
Nachrichtlich:									
LULUCF	MMS	-15,0	-12,5	-17,7	Nicht festgelegt	-20,6	-18,1	-17,0	-15,0
	MWMS	-15,0	-14,5	-20,8		-25,1	-23,9	-21,6	-19,9
Internationaler Luft- und Seeverkehr	MMS	33,5	35,7	37,5	Nicht festgelegt	38,5	39,4	40,0	40,4
	MWMS	33,5	35,7	37,5		38,5	39,4	40,0	40,4

Anmerkung: Prozentuale Änderungen der Emissionen gegenüber 1990 sind in Tabelle 1 dargestellt.

Überschreitungen der JEM 2030 sind fett dargestellt.

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES und Thünen-Institut

Wie in Tabelle 17 ersichtlich ist, liegen die projizierten Gesamtemissionen 2030 im MMS über der JEM von 439,5 Mio. t CO₂-Äq. Werden die kumulierten Emissionen der Jahre 2023 bis 2030 betrachtet, so liegen sie in beiden Szenarien über der Summe der JEM. Dabei bestehen jedoch große Unterschiede zwischen den Sektoren: In der Energiewirtschaft und Landwirtschaft sind die projizierten Emissionen von 2023 bis 2030 insgesamt geringer als die JEM; in den Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie ergibt sich jedoch eine kumulierte Zielverfehlung (Abbildung 5).

Abbildung 5: Kumulierte Zielerreichung / -verfehlung der KSG-Sektoren im MMS und MWMS, 2023-2030

Quelle: Modellierung: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut

Anmerkung: Für den Sektor Energiewirtschaft wurden keine JEM festgelegt. Hier wird eine lineare Interpolation der Ziele zwischen 2022 und 2030 verwendet.

Die Entwicklung der projizierten Emissionen in den einzelnen Sektoren wird in den Kapiteln 4 bis 10 im Einzelnen diskutiert.

In Tabelle 18 ist die Entwicklung der projizierten kumulierten Gesamtemissionen ab 2023 dargestellt. So ergeben sich bis 2030 im MMS kumuliert rund 5 Gt CO₂-Äq., und bis 2050 rund 10,8 Gt CO₂-Äq. Im MWMS sind die projizierten kumulierten Emissionen bis 2030 um rund 136 Mio. t CO₂-Äq. geringer als im MMS und bis 2050 um knapp 1,1 Gigatonnen CO₂-Äq. geringer als im MMS. In Tabelle 18 sind auch die kumulierten JEM gemäß KSG für 2025 und 2030 angegeben. Im Vergleich mit diesen kumulierten JEM verbleibt im Jahr 2030 eine projizierte Gesamtlücke von rund 331 Mio. t CO₂-Äq. im MMS und rund 194 Mio. t CO₂-Äq. im MWMS.

Tabelle 18: Entwicklung der kumulierten Treibhausgasemissionen ab 2023

Sektor	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.						
Kumulierte Emissionen MMS ab 2023	2.246,7	4.998,4	6.985,4	8.469,5	9.680,8	10.762,8
Kumulierte Emissionen MWMS ab 2023	2.213,4	4.862,1	6.637,9	7.872,8	8.833,5	9.669,7
Kumulierte Minderung MWMS ggü. MMS ab 2023	33,3	136,2	347,6	596,7	847,3	1.093,1
Kumulierte JEM gemäß KSG	2049,4	4667,7				

Sektor	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gesamtlücke MMS	197,3	330,7				
Gesamtlücke MWMS	164,0	194,5				

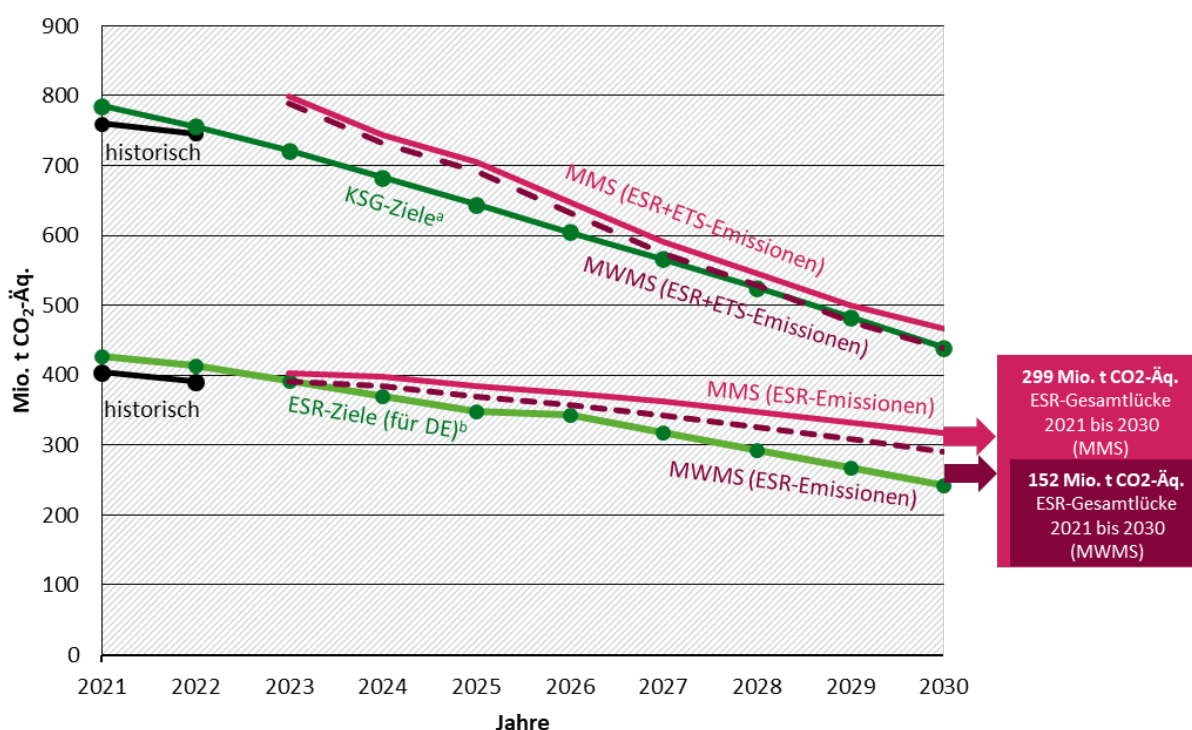
Quelle: Modellierung Öko-Institut, Fraunhofer-ISI und IREES

3.2 Treibhausgasemissionen in EU-ETS, ESR und nEHS

Die europäische Klimaschutzarchitektur unterscheidet zwischen Europäischem Emissionshandel (EU-ETS) einerseits und der Effort Sharing Regulation (ESR) andererseits. Unter den EU-ETS fallen Großfeuerungsanlagen und die emissionsintensivsten industriellen Prozesse und somit wesentliche Teile der KSG-Sektoren Energiewirtschaft und Industrie. Darüber hinaus umfasst der EU-ETS den kommerziellen Flugverkehr (und somit einen Teil des KSG-Sektors Verkehr) sowie einen kleinen Teil des Gebäudesektors (Graichen et al. 2021). Alle nicht dem EU-ETS unterliegenden Emissionen mit Ausnahme des LULUCF-Sektors unterliegen der ESR.

Innerhalb des ESR hat Deutschland mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) das nationale Emissionshandelssystem (nEHS) etabliert, das die wesentlichen CO₂-Brennstoffemissionen außerhalb des EU-ETS bepreist.

Abbildung 6: Projektion der Treibhausgasemissionen im ESR und gesamt, 2021 bis 2030



Quelle: Modellierung: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut; historische Daten: Umweltbundesamt (2023), (EEA 2023).

Anmerkung: ^a KSG-Ziele interpoliert. ^b Die ESR-Ziele wurden aufgrund historischer Daten bis 2022 sowie Projektionsdaten für 2023 abgeschätzt, siehe Anhang B.1.

Im Zeitraum 2023 bis 2030 werden in den Sektoren Energiewirtschaft und Industrie die größten absoluten Emissionsminderungen erzielt. Diese beiden Sektoren unterliegen größtenteils dem EU-ETS und ihre Emissionsminderung ist im MMS etwa dreieinhalb Mal so hoch wie die Emissionsminderung der hauptsächlich unter die Europäische Klimaschutzverordnung (ESR) fallenden Sektoren Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft und Abfall. Im MWMS ist die Emissionsminderung in

den Sektoren Energiewirtschaft und Industrie noch rund drei Mal so hoch wie in den restlichen Sektoren. Daher werden in beiden Szenarien die ESR-Emissionen deutlich langsamer reduziert als die Gesamtemissionen (Abbildung 6).

Während sich im MMS die Gesamtemissionen zwischen 2023 und 2030 dem KSG-Zielpfad annähern, wächst die Lücke zwischen ESR-Zielpfad und den projizierten Emissionen an. Im MWMS wird ab 2029 der KSG-Zielpfad übererfüllt, aber dennoch verbleibt eine deutliche Lücke bei den ESR-Emissionen. Insgesamt ergibt sich so für die modellierten Jahre eine ESR-Verfehlung von 344 Mio. t CO₂-Äq. im MMS und 198 Mio. t CO₂-Äq. im MWMS. Da in den Jahren 2021 und 2022 die historischen Emissionen unter dem ESR-Zielpfad²⁰ blieben, ergibt sich für den ESR-relevanten Gesamtzeitraum von 2021 bis 2030 eine Lücke von 299 Mio. t CO₂-Äq. im MMS und 152 Mio. t CO₂-Äq. im MWMS. Diese Lücken sind ähnlich groß wie die kumulierten Zielverfehlungen in den KSG-Sektoren, wo im MMS bis 2030 eine Gesamtlücke von 331 Mio. t CO₂-Äq. und im MWMS von 194 Mio. t CO₂-Äq. entsteht. Es gibt aber einen strukturellen Unterschied zwischen beiden Zielverfehlungen. Die kumulierte KSG-Zielverfehlung steigt bis 2028 und sinkt anschließend wieder ab. Bei der ESR hingegen entsteht die kumulierte Gesamtlücke erst 2025 (MMS) bzw. 2026 (MWMS) und wächst anschließend kontinuierlich an.

In Tabelle 19 und Tabelle 20 wird die langfristige Entwicklung der ESR-Emissionen den Emissionen im EU-ETS gegenübergestellt. In Tabelle 111 im Anhang sind die ESR-Emissionen für alle Jahre 2021 bis 2030 dargestellt. Ebenfalls im Anhang zeigen Tabelle 113 und Tabelle 114 detailliert für jeden KSG-Sektor die Emissionen in EU-ETS, ESR und nEHS auf.

Während die Emissionen im EU-ETS im MMS bis 2030 um gut 71 % gegenüber dem für EU-ETS und ESR relevanten Bezugsjahr 2005 reduziert werden, ist die Reduktion der ESR-Emissionen bis 2030 (Minderung um knapp 35 %) weniger als halb so groß. Im MWMS zeigt sich, dass die zusätzlichen Emissionsreduktionen vor allem bei ESR-Emissionen geschehen. Bei den ESR-Emissionen werden im MWMS durch die zusätzlichen Maßnahmen im Jahr 2030 gut fünf zusätzliche Prozentpunkte Emissionsminderung erzielt. Bei den EU-ETS-Emissionen hingegen beträgt der Unterschied zwischen MMS und MWMS im Jahr 2030 weniger als einen Prozentpunkt. Ein wesentlicher Grund hierfür, ist das die zusätzlichen Stromverbräuche im MWMS hauptsächlich durch weniger Stromexporte ausgeglichen werden.

Die grundsätzliche Entwicklung, dass die Emissionen im EU-ETS stärker als die ESR-Emissionen reduziert werden, setzt sich bis 2050 fort. Ebenfalls setzt sich die Entwicklung bis 2050 fort, dass die im MWMS gegenüber dem MMS zusätzliche Emissionsminderung vor allem bei den ESR-Emissionen geschieht.

Innerhalb der ESR-Emissionen entwickeln sich die vom nationalen Emissionshandelssystem (nEHS) erfassten CO₂-Brennstoffemissionen einerseits und die sonstigen von der ESR erfassten Emissionen andererseits sehr unterschiedlich. Während die CO₂-Brennstoffemissionen zwischen 2019 und 2030 im MMS bereits um 30 % und im MWMS um 37 % sinken, reduzieren sich die sonstigen ESR-Emissionen im gleichen Zeitraum nur um 18 % (MMS) bzw. 23 % (MWMS). Auf lange Sicht ist dieser Effekt deutlich ausgeprägter: Während im Basisjahr 2019 die CO₂-Brennstoffemissionen im Geltungsbereich des nEHS noch mehr als dreimal so hoch wie die sonstigen Emissionen waren, so liegen im MMS die CO₂-Brennstoffemissionen im Jahr 2050 nur noch wenig über den sonstigen ESR-Emissionen. Im MWMS sinken die CO₂-Brennstoffemissionen sogar deutlich unter das Niveau der sonstigen ESR-Emissionen. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass die sonstigen ESR-Emissionen in beiden Szenarien ab 2040 kaum noch sinken, wohingegen bei den Brennstoffemissionen weiterhin relevante Emissionsminderungen geschehen.

²⁰ Die ESR-Ziele wurden aufgrund historischer Daten bis 2022 sowie Projektionsdaten für 2023 abgeschätzt, siehe Anhang B.1.

Tabelle 19: EU-ETS- und ESR-Emissionen im MMS, 2005-2050

	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Emissionen stationärer EU-ETS ^a	514,9	363,3	316,8	148,4	104,6	73,4	65,9	63,4
Emissionen ESR ^b	484,7	436,5	385,2	316,5	246,8	189,3	161,0	143,3
<i>davon nEHS</i>	<i>349,4</i>	<i>336,3</i>	<i>296,8</i>	<i>234,6</i>	<i>171,8</i>	<i>118,3</i>	<i>90,9</i>	<i>73,6</i>
<i>sonstige Emissionen ESR</i>	<i>135,3</i>	<i>100,2</i>	<i>88,4</i>	<i>81,9</i>	<i>74,9</i>	<i>71,0</i>	<i>70,1</i>	<i>69,7</i>
Summe ESR und stationärer EU-ETS^c	999,6	799,8	702,0	464,9	351,4	262,7	226,9	206,7
Stationärer EU-ETS ggü. 2005	0,0%	-29,4%	-38,5%	-71,2%	-79,7%	-85,7%	-87,2%	-87,7%
ESR ggü. 2005	0,0%	-10,0%	-20,5%	-34,7%	-49,1%	-60,9%	-66,8%	-70,4%
Nachrichtlich:								
Flugverkehr im EU-ETS ^d	8,5	10,8	11,5	11,7	12,0	12,2	12,3	12,4
<i>davon inländisch</i>	<i>2,5</i>	<i>2,2</i>	<i>2,4</i>	<i>2,4</i>	<i>2,3</i>	<i>2,2</i>	<i>2,1</i>	<i>2,0</i>

Anmerkung: ^a Vom ETS erfasste Emissionen in der seit 2013 gültigen Abgrenzung. ^b Für das Jahr 2005 sind die per Durchführungsbeschluss (EU) 2020/2126 festgesetzten ESR-Emissionen angegeben. ^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. ^d Inländischer Flugverkehr zuzüglich anteilig der von Deutschland abgehende internationale Flugverkehr.

Quelle: (BMU 2020), (UBA 2022b), (UBA 2022a), (EEA 2023), Modellierung Öko-Institut

Tabelle 20: EU-ETS- und ESR-Emissionen im MWMS, 2005-2050

	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Emissionen stationärer EU-ETS ^a	514,9	363,3	319,6	144,7	93,5	66,8	58,5	55,7
Emissionen ESR	472,8	436,5	369,8	290,6	208,7	146,6	118,3	102,3
<i>davon nEHS</i>	349,4	336,3	283,5	213,3	139,3	81,3	54,3	39,2
<i>sonstige Emissionen ESR</i>	123,4	100,2	86,3	77,3	69,3	65,3	64,0	63,1
Summe ESR und stationärer EU-ETS^c	987,7	799,8	689,4	435,3	302,2	213,4	176,8	158,0
Stationärer EU-ETS ggü. 2005	0,0%	-29,4%	-37,9%	-71,9%	-81,8%	-87,0%	-88,6%	-89,2%
ESR ggü. 2005	0,0%	-10,0%	-23,7%	-40,0%	-56,9%	-69,7%	-75,6%	-78,9%
Nachrichtlich:								
Flugverkehr im EU-ETS ^d	8,5	10,8	11,5	11,7	12,0	12,2	12,3	12,4
<i>davon inländisch</i>	2,5	2,2	2,4	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0

Anmerkung: ^a Vom ETS erfasste Emissionen in der seit 2013 gültigen Abgrenzung. ^b Für das Jahr 2005 sind die per Durchführungsbeschluss (EU) 2020/2126 festgesetzten ESR-Emissionen angegeben. ^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. ^d Inländischer Flugverkehr zuzüglich anteilig der von Deutschland abgehende internationale Flugverkehr.

Quelle: (BMU 2020), (UBA 2022b), (UBA 2022a), (EEA 2023), Modellierung Öko-Institut

3.3 Sensitivitätsanalysen

Die berechneten Ergebnisse werden wesentlich von den zugrunde gelegten Rahmendaten beeinflusst (siehe Mendelevitch et al. 2022). Die Annahmen für Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftsentwicklung, Energie- und CO₂-Preise wurden bis zum Jahr 2050 angenommen und unterliegen dementsprechenden Unsicherheiten. Um Abweichungen der Ergebnisse durch veränderte Annahmen besser abschätzen zu können, wurden insgesamt sechs Sensitivitätsanalysen durchgeführt. In diesen wurden die Parameter für Wirtschaftswachstum, den Brennstoff- und EU-ETS-Preisen, BEHG-Preisen und dem Grad der Biomassenutzung verändert.

Für die Annahmen zum Wirtschaftswachstum wurden zwei Dekompositionsanalysen durchgeführt. Dabei wurde eine höhere bzw. eine niedrigere Entwicklung des BIP angenommen. Diese Sensitivität gilt für alle Sektoren.

Um den Einfluss der Brennstoff- und EU-ETS-Preisen abzuschätzen wurden einmal mit dem Vorschlag eines Preispfades der EU-Kommission (EC 2022a) sowie einmal mit aktuelleren Energiepreisdaten Strommarktmodellierungen eingesetzt. Beide Sensitivitäten wurden für die Energiewirtschaft modelliert. Auswirkungen auf andere Sektoren wurden nicht berücksichtigt.

Des Weiteren wurden verschiedene Preispfade für die Entwicklung des BEHG-Preispfades angenommen. Diese Sensitivitätsrechnungen wurden für die betroffenen Sektoren Gebäude, Industrie und Verkehr durchgeführt.

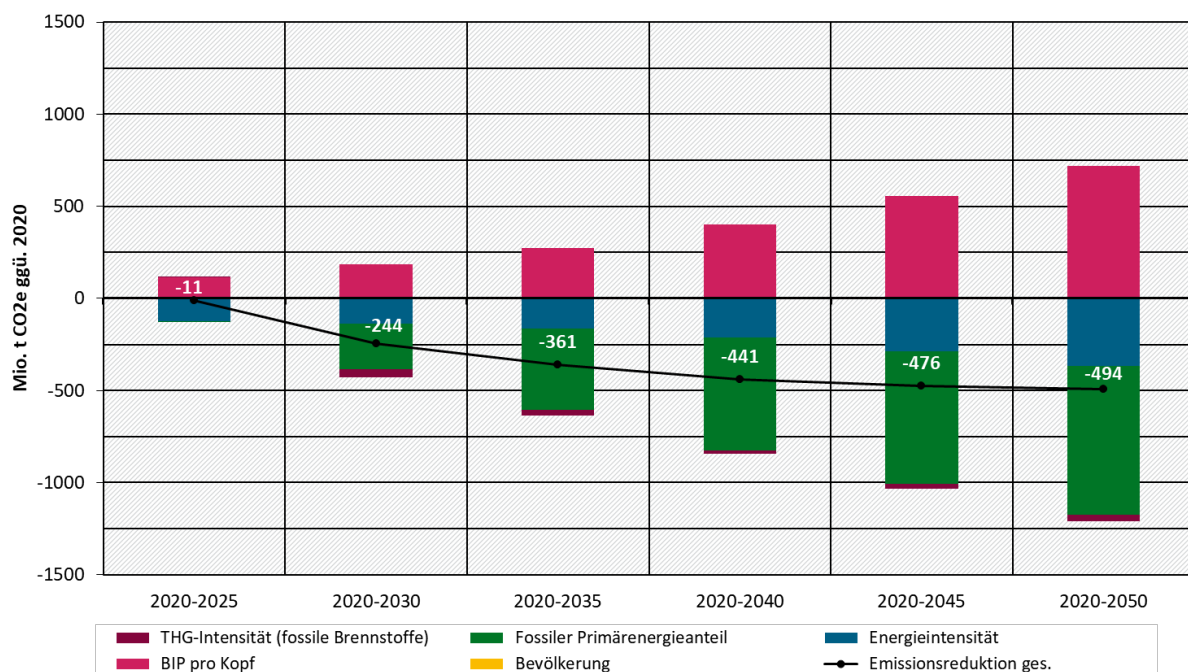
Diese Sensitivitätsanalysen wurden im Vergleich zum MWMS durchgeführt.

Für das MMS wurde eine Sensitivität berechnet. Hierbei wurde eine unbeschränkte Nutzung von Biomasse in den Sektoren Gebäude und Industrie angenommen. Auswirkungen auf andere Sektoren sind damit nicht berücksichtigt.

3.3.1 Wirtschaftswachstum

Abbildung 7 zeigt den Einfluss verschiedener Treiber auf die energiebedingten Treibhausgasemissionen. Insgesamt beträgt die Emissionsminderung im MWMS im Jahr 2030 im Vergleich mit dem Jahr 2020 244 Mio. t CO₂-Äq. und im Jahr 2050 im Vergleich mit dem Jahr 2020 494 Mio. t CO₂-Äq. Vor allem das Wirtschaftswachstum resultiert in steigenden Emissionen (+718 Mio. t CO₂-Äq. zwischen den Jahren 2020 und 2050). Die Energieeffizienz und der sinkende fossile Primärenergieanteil tragen mit -358 Mio. t CO₂-Äq. und -811 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2050 verglichen mit 2020 zur Reduktion der Treibhausgase bei. Der verbleibende Anteil an fossilen Energieträgern hat zudem eine geringere Treibhausgasintensität und trägt im Jahr 2050 verglichen mit 2020 -35 Mio. t CO₂-Äq. bei. Die angenommene Bevölkerungsentwicklung ist bis 2050 relativ stabil und hat daher nur einen unwesentlichen Anteil an der Änderung der Treibhausgasemissionen.

Abbildung 7: Komponentenanalyse für die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen (MWMS)



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

Um den Einfluss des Wirtschaftswachstums auf die Treibhausgasemissionen zu bewerten, wurde auf Grundlage dieser Komponentenanalyse zwei Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

- Sensitivität 1 – höheres reales BIP im Vergleich zu den Rahmendaten (ab dem Jahr 2023 jährlich +0,5 Prozentpunkte ggü. den Rahmendaten)
- Sensitivität 2 – niedrigeres reales BIP im Vergleich zu den Rahmendaten (ab dem Jahr 2023 jährliche -0,5 Prozentpunkte ggü. den Rahmendaten)

Die Ergebnisse der Analysen finden sich in Tabelle 21 wieder. Das stärker steigende BIP führt im Vergleich zum MWMS zu +19,1 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2050. Somit würde die Treibhausgasemissionen ggü. dem Jahr 1990 1,8 % höher ausfallen. Die Annahme der zweiten Sensitivitätsanalyse, dass das BIP weniger stark im Vergleich zum MWMS steigt, führt dementsprechend zu -16,7 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2050 bzw. -1,6 % ggü. dem Jahr 1990.

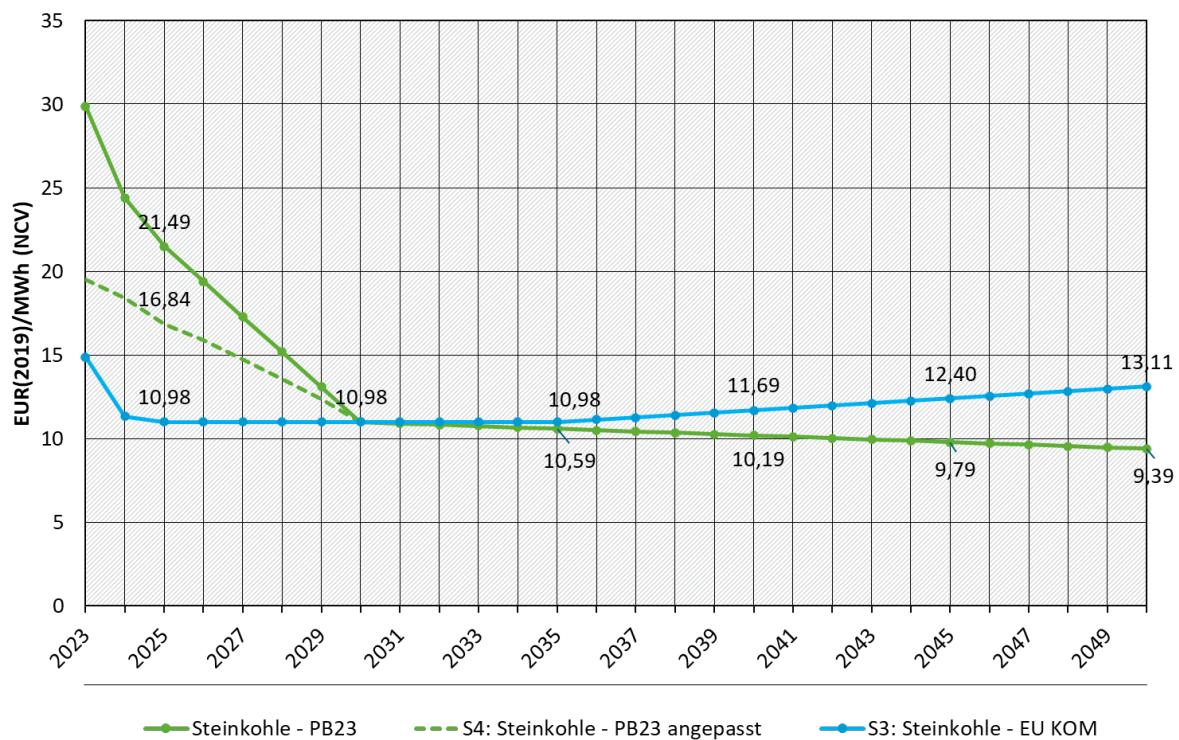
Tabelle 21: Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnungen 1 und 2 (MWMS)

	1990	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.							
Gesamtemissionen (ohne int. Verkehr & LULUCF)	1.248,5	802,0	693,3	441,5	309,4	221,2	184,7	166,1
Sensitivitäten Wirtschaftswachstum (Differenz)								
<i>S1: höheres BIP</i>			9,4	15,8	17,7	17,2	17,7	19,1
<i>S2: niedrigeres BIP</i>			-8,8	-14,3	-16,0	-15,2	-15,8	-16,7

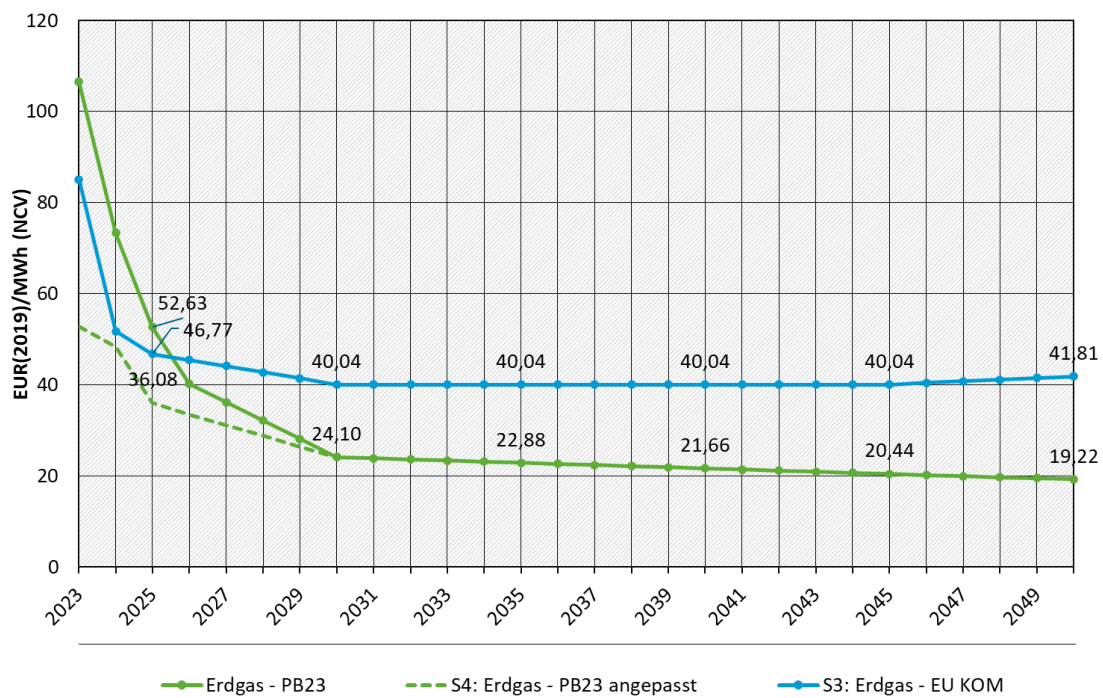
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, Berechnungen: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

3.3.2 Brennstoff- und ETS-Preise

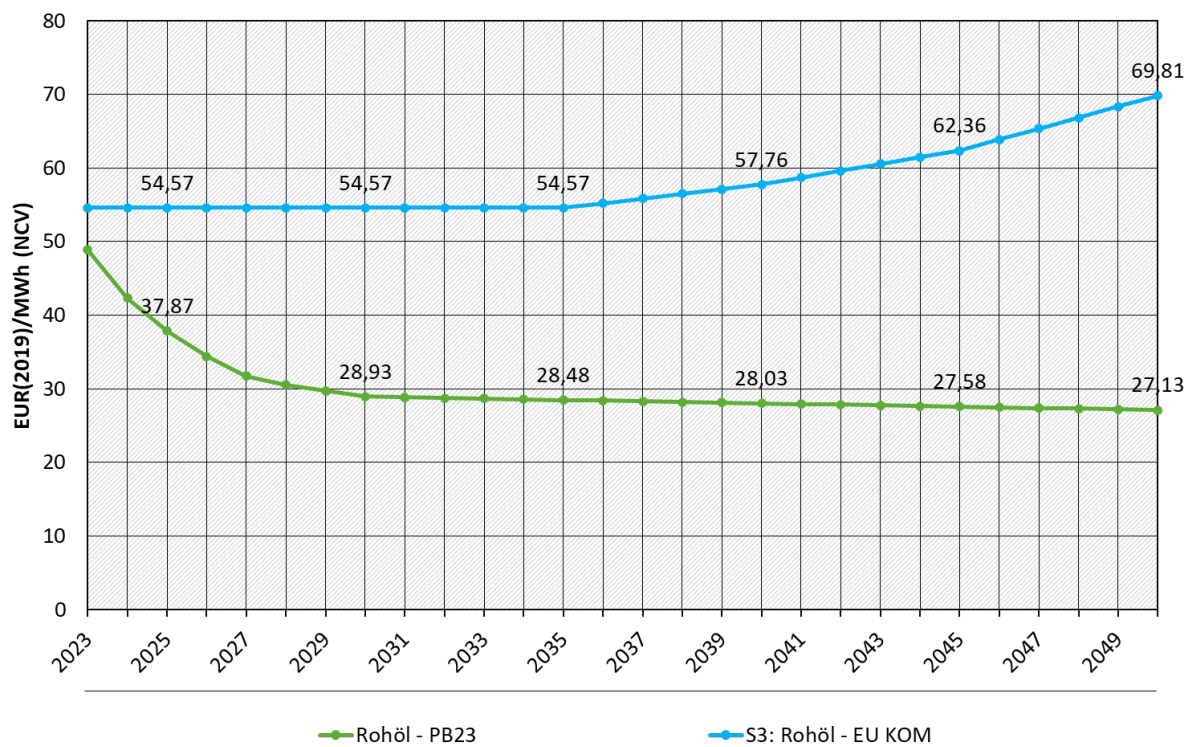
Ein wesentlicher Einflussfaktor der Treibhausgasemissionen im Stromsektor sind die Preise für Brennstoffe und für EU-Emissionszertifikate. Die folgenden Grafiken zeigen die jeweils angenommenen Preispfade für die Projektionen 2023 (grüne durchgezogene Linie) und die jeweiligen Sensitivitäten (blaue und grün gestrichelte Linie). Die Preisannahmen für die Sensitivität stammen von der EU-Kommission (blaue Linie) (EC 2022a). Für die Sensitivität von Steinkohle und Erdgas wurde zusätzlich ein angepasster (grün gestrichelt) Preispfad gerechnet, der die aktuellen Entwicklungen der Energiepreise berücksichtigt.

Abbildung 8: Preispfade Steinkohle

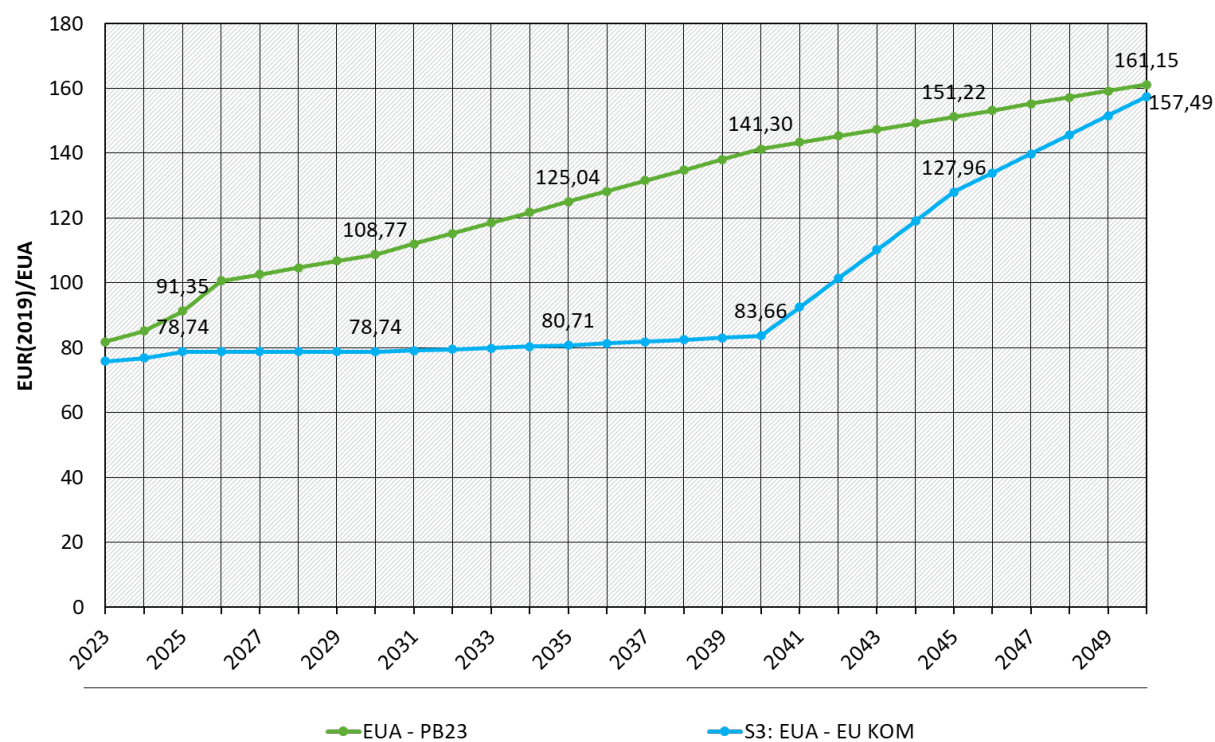
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut nach Mendelevitch et al. (2022) und EC (2022a)

Abbildung 9: Preispfade Erdgas

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut nach Mendelevitch et al. (2022) und EC (2022a)

Abbildung 10: Preispfade Rohöl

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut nach Mendelevitch et al. (2022) und EC (2022a)

Abbildung 11: Preispfade EU-ETS

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut nach Mendelevitch et al. (2022) und EC (2022a)

Tabelle 22 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Sensitivitätsrechnungen 3 und 4. Die Sensitivität 3 zeigt die Differenzen der Treibhausgasemissionen im Stromsektor im Vergleich zum MWMS, wenn die Preispfadvorschläge der EU-Kommission genutzt werden. Vor allem bei den Gas- und Ölpreisen geht die Kommission von langfristig höheren Preisen aus (vergl. Abbildung 9 und Abbildung 10). Bei der Steinkohle geht die EU-Kommission von zunächst niedrigeren Preisen aus, die sich zum Ende dieses Jahrzehnts mit den gewählten Rahmendaten angleichen (vergl. Abbildung 8). Ab Mitte der 2030er Jahre zeigt der Kohlepreispfad der EU-Kommission höhere Preise als die Rahmendaten, dies ist aber aufgrund des Ausstiegs aus der Kohleverstromung zu diesem Zeitpunkt weniger relevant. Abbildung 11 zeigt, dass die EU-Kommission von niedrigeren Zertifikatspreisen ausgeht. In der Gesamtsicht bedeuten diese anderen Preispfade, dass im Jahr 2030 die Minderung der energiebedingten Emissionen im Vergleich zu 1990 zusätzliche 0,6 % beträgt.

Eine deutliche mittelfristige Änderung der Treibhausgasemissionen lässt sich in Sensitivität 4 erkennen. Durch die zunächst niedrigeren Erdgaspreise verschiebt sich im Vergleich zum MWMS die Merit Order zu Gunsten von Erdgaskraftwerken, was zu mittelfristig niedrigeren Emissionen führt. Für das Jahr 2025 bedeutet dies z.B. zusätzliche 2,6 % Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990.

Tabelle 22: Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnungen 3 und 4 (MWMS)

	1990	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.							
Gesamtemissionen (ohne int. Verkehr & LULUCF)	1.248,5	802,0	693,3	441,5	309,4	221,2	184,7	166,1
Sensitivitäten Brennstoffe und EU-ETS-Zertifikate (Differenz)								
<i>S3: Vorschlag EU-KOM</i>			0,0	-6,4	-4,0	-2,3	-3,3	-8,1
<i>S4: angepasste Energiepreise</i>			-27,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, Berechnungen: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

3.3.3 BEHG-Preise

Als Sensitivität für die BEHG-Preise wurden vier verschiedene Preispfade angenommen. Im Vergleich zum im MWMS verwendeten Preispfad, wurden vier weitere Preispfade angenommen, die in Tabelle 23 und Abbildung 12 dargestellt sind. Diese Preispfade unterteilen sich in drei BEHG-Preispfade und einen ETS2-Preispfad.

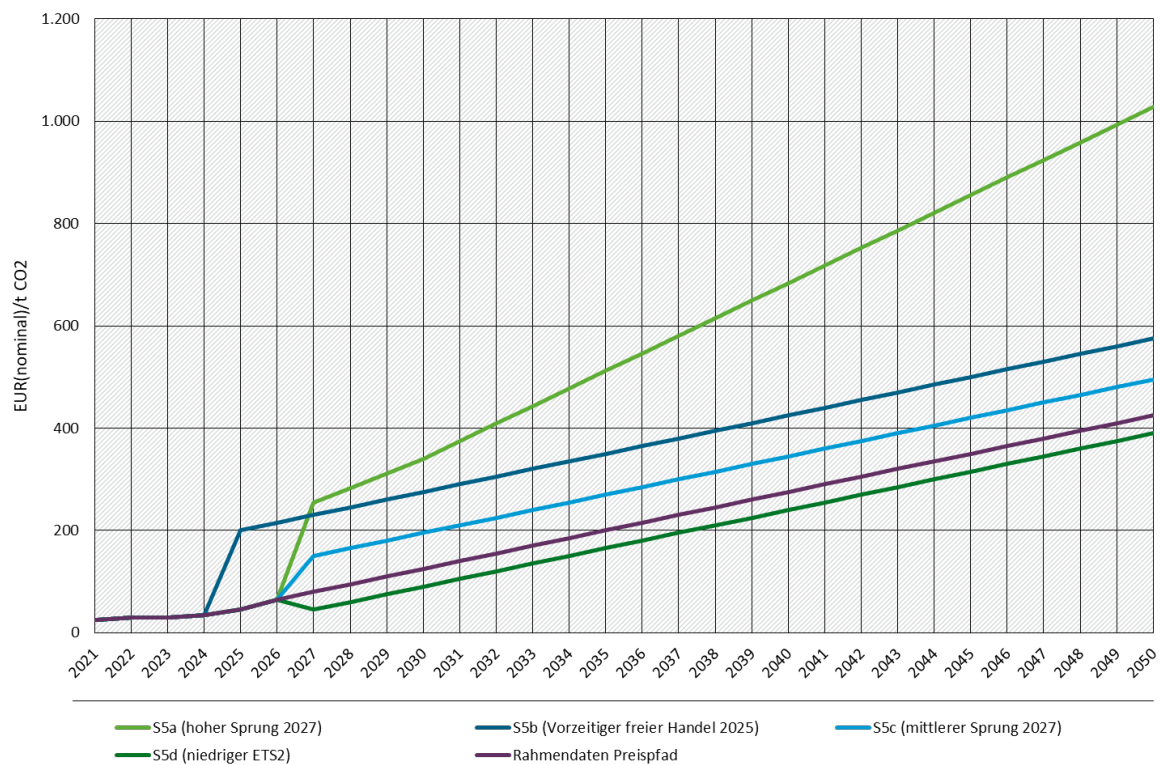
- Sensitivität 5a – hoher Preissprung ab 2027 (kein Preiskorridor ab 2027; hoher Preis bildet sich am Markt)
- Sensitivität 5b – freier Handel der BEHG-Emissionszertifikate wird auf das Jahr 2025 vorgezogen
- Sensitivität 5c – mittlerer Preissprung ab 2027
- Sensitivität 5d – niedriger ETS-2 Preis

Tabelle 23: BEHG-Preise MWMS und Sensitivitäten

Jahr	MWMS	S 5a (hoher Sprung 2027)	S 5b (Vorzeitiger freier Handel 2025)	S 5c (mittlerer Sprung 2027)	S 5d (niedriger ETS2)
	€/t nominal				
2021	25	25	25	25	25
2022	30	30	30	30	30
2023	30	30	30	30	30
2024	35	35	35	35	35
2025	45	45	200	45	45
2026	65	65	215	65	65
2027	80	255	230	150	45
2028	95	283	245	165	60
2029	110	312	260	180	75
2030	125	340	275	195	90
2031	140	374	290	210	105
2032	155	409	305	225	120
2033	170	443	320	240	135
2034	185	478	335	255	150
2035	200	512	350	270	165
2036	215	546	365	285	180
2037	230	581	380	300	195
2038	245	615	395	315	210
2039	260	649	410	330	225
2040	275	684	425	345	240

Jahr	MWMS	S 5a (hoher Sprung 2027)	S 5b (Vorzeitiger freier Handel 2025)	S 5c (mittlerer Sprung 2027)	S 5d (niedriger ETS2)
2041	290	718	440	360	255
2042	305	752	455	375	270
2043	320	787	470	390	285
2044	335	821	485	405	300
2045	350	856	500	420	315
2046	365	890	515	435	330
2047	380	924	530	450	345
2048	395	959	545	465	360
2049	410	993	560	480	375
2050	425	1027	575	495	390

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Abbildung 12: Preispfade BEHG

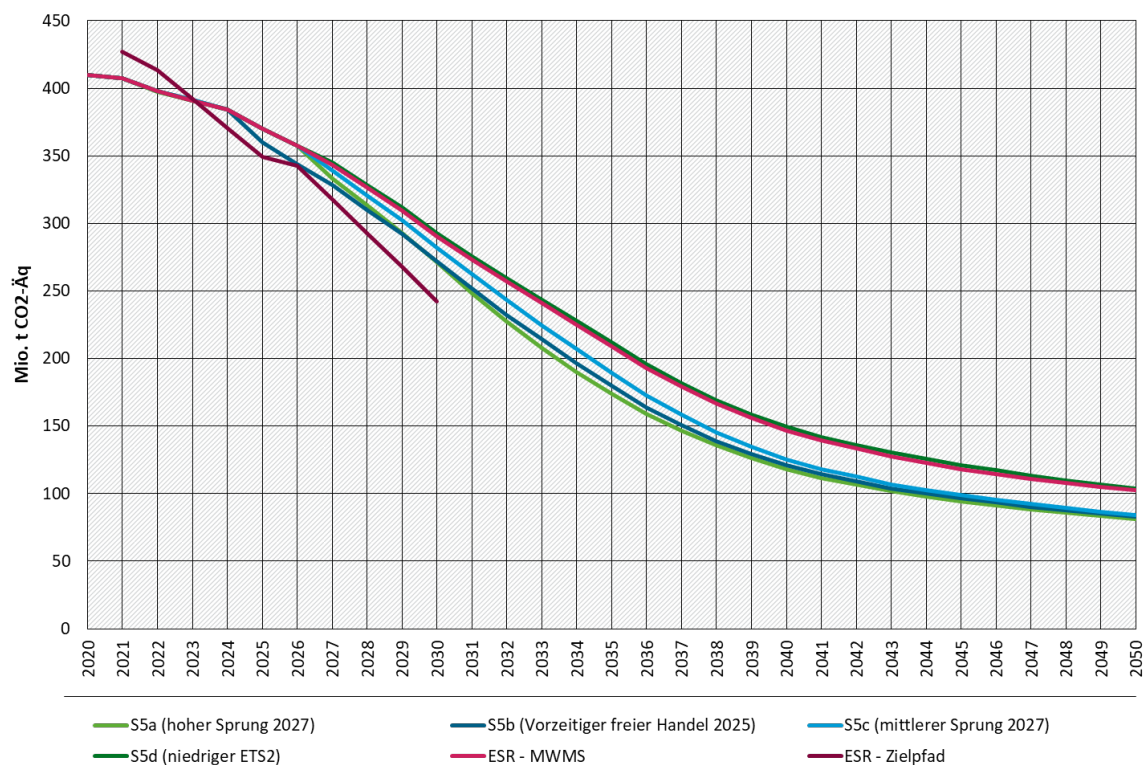
Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

Die oben genannten Sensitivitäten wurden für die betroffenen Sektoren Gebäude, Industrie und Verkehr berechnet. Tabelle 24 zeigt die Auswirkungen der geänderten BEHG-Preise als Differenz zum MWMS. Es fällt grundlegend auf, dass die Sensitivitäten vor allem im Verkehrssektor zu Differenzen im Vergleich zum MWMS führt.

Bei Gebäuden ist bis 2030 nur bei einem sehr hohen CO₂-Preis ab 2027 (5a und 5b) ein wahrnehmbarer Effekt zu beobachten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Energiepreise nur einer von mehreren Entscheidungsfaktoren im Modell ist und geringe Preisänderungen nur unwesentlich auf die Entscheidungsträger:innen wirken. Die angenommenen ordnungsrechtlichen Instrumente (65 %-Regel und erhöhtes Ambitionsniveau im GEG) haben im Vergleich eine größere Wirkung auf die Treibhausgasemissionen. Für große Abweichungen in den Treibhausgasemissionen muss der CO₂-Preis deshalb deutlich höher sein als im MWMS. Perfect Foresight wurde nicht berücksichtigt.

Die drei Sensitivitäten 5a, 5b und 5c mit höheren BEHG-Preisen führen in verschiedener Ausprägung zu zusätzlichen Emissionsminderungen. Abbildung 13 zeigt, dass die Minderungen zwischen den Sensitivitäten 5a, 5b und 5c relativ ähnlich sind. Dies ist aber auf die jährlichen Minderungen bezogen. Kumuliert bedeutet das aber größere Unterschiede.

Die Annahmen für die Sensitivität 5d führen in den Berechnungen zu zusätzlichen Emissionen im Vergleich zum MWMS. Wie in Abbildung 13 ersichtlich, liegen die Emissionsminderungen unter Berücksichtigung der Sensitivitäten 5a, 5b und 5c zwar unter den berechneten MWMS-Emissionen, aber weiterhin deutlich über dem für Deutschland berechneten Zielpfad der ESR.

Abbildung 13: ESR-Emissionen im MWMS und BEHG-Sensitivitäten

Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut, Berechnungen: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

Tabelle 24: Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnung 5a bis 5d (MWMS)

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.						
Emissionen ESR	409,5	369,8	290,6	208,7	146,6	118,3	102,3
S 5a (hoher Sprung 2027)	0,0	-0,0	-19,2	-34,6	-28,7	-23,9	-21,0
Gebäude	0,0	-0,0	-2,0	-2,3	-1,9	-1,9	-1,6
Industrie	0,0	0,0	-0,8	-1,2	-1,4	-1,7	-1,8
Verkehr	0,0	0,0	-16,4	-31,0	-25,4	-20,3	-17,6
S 5b (Vorzeitiger freier Handel 2025)	0,0	-9,7	-18,4	-29,0	-25,7	-21,7	-19,2
Gebäude	0,0	-0,5	-2,0	-1,6	-1,4	-1,2	-0,8
Industrie	0,0	-0,3	-1,1	-1,3	-1,3	-1,3	-1,1
Verkehr	0,0	-8,9	-15,3	-26,2	-23,1	-19,2	-17,3
S 5c (mittlerer Sprung 2027)	0,0	0,3	-8,6	-19,2	-21,2	-19,3	-18,0

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gebäude	0,0	0,0	-0,5	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Industrie	0,0	0,0	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,5
Verkehr	0,0	0,0	-7,8	-18,5	-20,5	-18,5	-17,3
S 5d (niedriger ETS2)	0,0	0,0	2,3	3,0	2,6	2,9	1,6
Gebäude	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Industrie	0,0	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3
Verkehr	0,0	0,0	2,1	2,6	2,2	2,5	1,3

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, Berechnungen: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES

3.3.4 Nutzung von Biomasse

In der Modellierung wird von einem begrenzten Angebot der Biomasse ausgegangen (vergl. Abschnitt 3.4.2). Die aktuellen politischen Rahmenbedingungen begünstigen allerdings eher eine unbeschränkte Nutzung von Biomasse in den Sektoren Gebäude und Industrie. Dies beinhaltet beispielsweise auch den Import von Biomasse zur Deckung der Nachfrage. Die Sensitivität „unbeschränkte Nutzung der Biomasse“ wurde daher als einzige im Vergleich zum MMS durchgeführt. Tabelle 25 zeigt die Differenz der Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der Sensitivität. Es zeigt sich, dass die unbeschränkte Nutzung der Biomasse zwar zusätzliche Treibhausgaseminderungen in den Sektoren Gebäude und Industrie auslösen kann, allerdings ohne Berücksichtigung der Auswirkung auf anderen Sektoren oder von Nachhaltigkeitskriterien bzw. der Verfügbarkeit der Biomasse zu konkurrenzfähigen Preisen (siehe auch Abschnitt 3.4.2). So kann beispielsweise die verstärkte Biomassenutzung zu höheren Emissionen in anderen Sektoren (z.B. im LULUCF-Sektor) oder im Ausland führen. Den größten Anteil an der zusätzlichen Gesamtminderung hat der Industriesektor.

Tabelle 25: Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die Sensitivitätsrechnung 6 (MMS)

Sektor	1990	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.									
Gesamtemissionen (ohne int. Verkehr & LULUCF)	1.052,3	704,1	621,8	621,8	403,6	305,0	224,9	190,9	171,6
Gebäude			0,0	0,0	-0,3	-0,4	-0,3	-0,6	-0,4
Industrie			0,0	-1,8	-3,4	-3,6	-2,7	-2,1	-1,2
Gesamt			0,0	-1,8	-3,7	-4,0	-3,1	-2,7	-1,6

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut; Berechnungen ISI & IREES

3.4 Primärenergieverbrauch

3.4.1 Primärenergieverbrauch nach Energieträgern

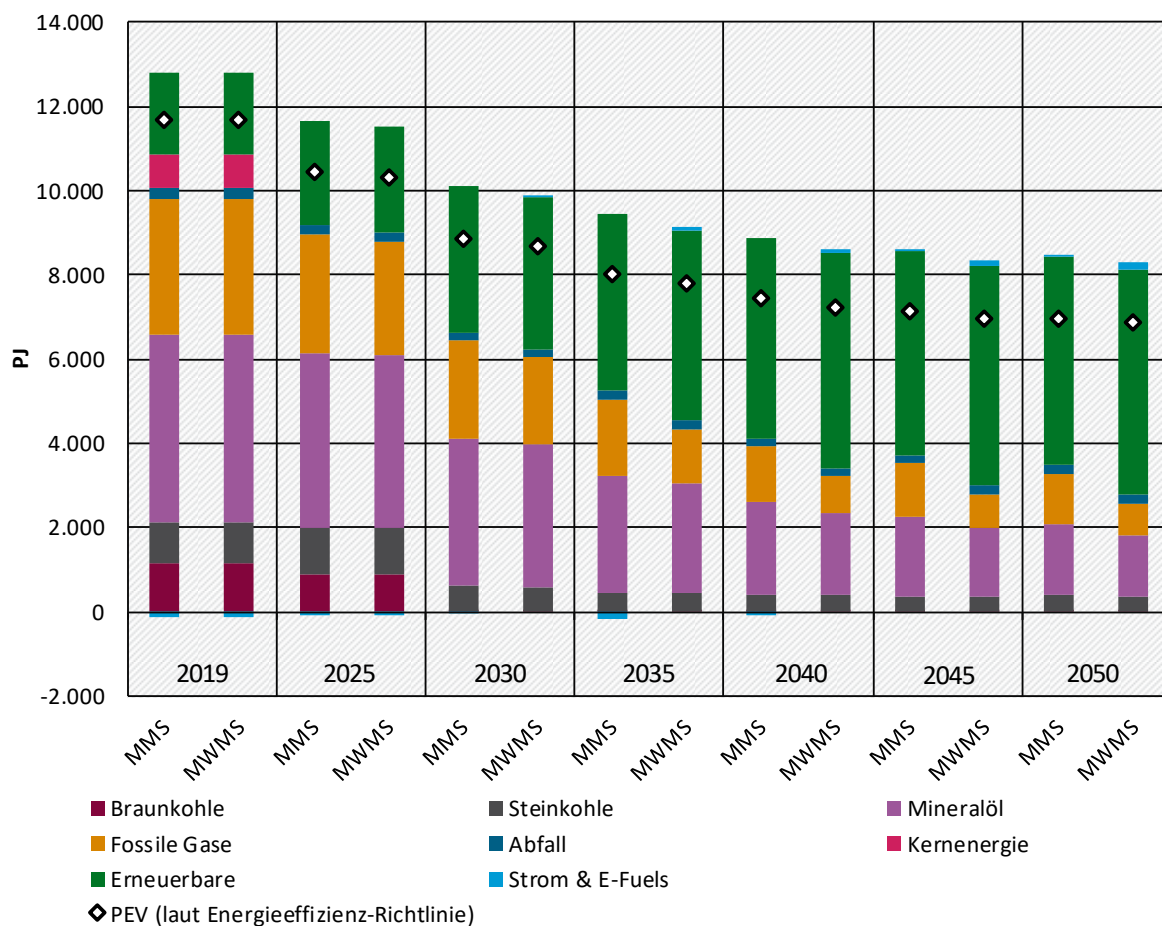
Die hier dargestellte Bilanz des Primärenergieverbrauchs (PEV) sowie die in Abschnitt 3.5 dargestellte Bilanz des Endenergieverbrauchs (EEV) folgen insgesamt dem Schema der Energiebilanzen. Primäre Datengrundlagen für die historischen Daten sind

- das Zentrale System Emissionen (ZSE) beim UBA für alle brennstoffförmigen Energieträger, 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. Um die Konsistenz zwischen historischen und Projektionsdaten zu wahren, sind auch für die historischen Jahre die Primär- und Endenergieverbräuche aus dem Modell aufgeführt, die von den AGEB-Daten abweichen können.

Abbildung 14 zeigt die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in ausgewählten Jahren von 2019 bis 2050, jeweils für das MMS und das MWMS. Der projizierte Einsatz von Kernenergie endet 2023, jener von Braunkohle ist ab 2030 sehr gering (rund 30 PJ im MMS). Mineralöle und fossile Gase sind projiziert auch 2030 noch bedeutende Primärenergiequellen, die erneuerbare Energien sind zusammen im Jahr 2030 aber die größte Quelle von Primärenergie im MWMS (Anteil rund 36 %). Der projizierte Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch erhöht sich bis 2050 auf rund 59 % im MMS und 64 % im MWMS. Da Strom und strombasierte Brennstoffe (E-Fuels) wie Wasserstoff oder PtL-Kraftstoffe Sekundärenergieträger sind, geht für diese nur der Handelssaldo in den Primärenergieverbrauch ein. Die in Abbildung 14 dargestellte Summe von Strom und E-Fuels ist in einzelnen Jahren negativ, da das projizierte Stromhandels-saldo aufgrund von Stromexport negativ ist. Im MWMS tragen E-Fuels nach 2030 rund 2-3 % des Primärenergieverbrauchs bei. Grundsätzlich macht es (wie auch bei Strom selbst) für den PEV einen Unterschied, ob strombasierte Energieträger im Inland erzeugt oder aus dem Ausland importiert werden.²¹

²¹ „Im Inland erzeugte erneuerbare strombasierte Energieträger steigern den PEV grundsätzlich auf Grund von Verlusten in der Umwandlungskette. Die genaue Höhe der Verbrauchsänderung durch die Substitution von fossilen Primärenergieträgern ist von mehreren Faktoren abhängig (bspw. verwendete Prozesstechnik, Art und Entfernung des Transports). Bei Importen wird der PEV aufgrund des gesetzten Bilanzraums wenig beeinflusst, da der im Ausland anfallende zusätzliche Primärenergieverbrauch (Vorketten der Energiebereitstellung, Umwandlungsverluste der Prozesstechnik, Transport) in Deutschland bilanziell nicht erfasst wird. In der Energiestatistik wird nur der Energiegehalt der importierten Energieträger erfasst. Rein bilanziell sinkt der PEV demnach, wenn vorrangig grüne strombasierte Energieträger importiert und weniger im Inland hergestellt werden.“ (Weyland und Herda 2023).

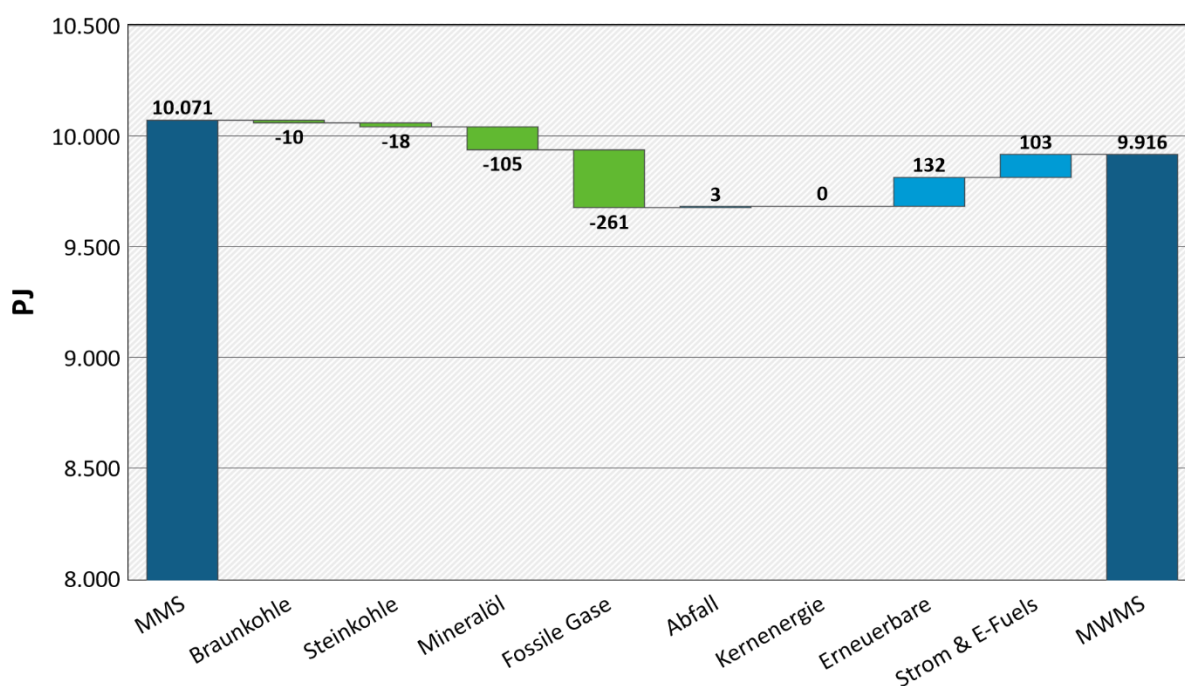
Abbildung 14: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS und MWMS, 2019-2050

Anmerkung: Zusätzlich zum Primärenergieverbrauch in nationaler Abgrenzung ist der Primärenergieverbrauch in der Abgrenzung der europäischen Energieeffizienz-Richtlinie dargestellt. In der nationalen Methode wird Umweltwärme berücksichtigt, in der Methode laut Energieeffizienz-Richtlinie hingegen nicht. Ein weiterer Unterschied ergibt sich durch die unterschiedliche Berechnung des Primärenergieverbrauchs von Hochöfen und Gichtgas.

Analog zur Energiebilanz werden Stromexporte als negative Werte berücksichtigt. In Jahren mit Netto-Export von Strom und E-Fuels ist der Beitrag der Kategorie „Strom & E-Fuels“ in der Abbildung negativ.

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2022a), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2022a; 2008-2022b), Modellierung Fraunhofer-ISI, I-REES und Öko-Institut

Die Veränderungen im projizierten Primärenergieverbrauch zwischen MMS und MWMS sind im Jahr 2030 relativ gering, wie Abbildung 15 zeigt. Im MWMS wird der Einsatz fossiler Energieträger, insbesondere fossiler Gase, weiter reduziert, stattdessen werden mehr E-Fuels eingesetzt. Außerdem ergibt die Modellierung im MWMS einen geringeren Nettoexport von Strom.

Abbildung 15: Veränderung des Primärenergieverbrauchs im MWMS gegenüber dem MMS, 2030

Quelle: Modellierung Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut

3.4.2 Verbrauch an Biomassebrennstoffen und potenzieller Importbedarf

Die Produktion von Biomassebrennstoffen ist mit Effekten auf der Landfläche verbunden. So verringert die Entnahme von Waldenergieholz den Kohlenstoffspeicher auf der Waldfläche (vgl. Kapitel 10) und der landwirtschaftliche Anbau von Bioenergiesubstraten steht im Zusammenhang mit Emissionen aus der Düngegabe (vgl. Kapitel 8). Werden Biomassebrennstoffe im Inland produziert, so werden die Effekte gemäß den internationalen Vorgaben in Deutschland bilanziert und fließen in das nationale Treibhausgasinventar ein. Bei Importen von Biomassebrennstoffen treten mit der Produktion verbundene Treibhausgasemissionen in den Herkunftsländern auf, wo sie auch nach dem Quellprinzip in den dortigen Bilanzen verbucht werden. Die mit importierten Biomassebrennstoffen verbundenen Emissionen werden daher nicht im deutschen Inventar geführt. Dennoch können die mit dem Gesamtverbrauch von Biomassebrennstoffe verbundenen Emissionen zusammen mit ihrer Herkunft identifiziert werden. Die Analyse der Herkunft der Biomassebrennstoffe wird hier zum ersten Mal im Projektionsbericht aufgenommen.

Laut den in Kapitel 4 bis 8 dargestellten Projektionen wird Biomasse in allen energieverbrauchenden Sektoren als fester (z.B. Scheitholz), gasförmiger (z.B. Biogas) oder flüssiger Biomassebrennstoff (z.B. Biodiesel) eingesetzt (Tabelle 26). Ein deutlicher Anteil von ca. Zweidrittel entfällt dabei auf feste Biomassebrennstoffe. So werden im MMS in den Jahren 2030 und 2045 ca. 1.000 PJ an festen Biomassebrennstoffen verbraucht. Hohe Verbräuche entfallen auf die Sektoren Gebäude und Energiewirtschaft, gefolgt von dem Sektor Industrie. Im MWMS liegt der Verbrauch fester Biomassebrennstoffe in diesen Sektoren etwas höher als im MMS. So steigen im MWMS diese Verbräuche in Summe auf über 1.100 PJ an (Tabelle 26).

Gasförmige Biomassebrennstoffe werden im MMS im Jahr 2030 mit über 250 PJ eingesetzt. Dabei liegt ein starker Fokus auf der Energiewirtschaft. Durch eine starke Abnahme in diesem Sektor sinkt der Verbrauch gasförmiger Biomassebrennstoffe bis zum Jahr 2045 deutlich. Lediglich im Gebäudesektor kann im MMS ein leichter Anstieg von gasförmigen Biomassebrennstoffen und im MWMS ein deutlicher Anstieg verzeichnet werden (Tabelle 26).

Flüssige Biomassebrennstoffe werden zu großen Anteilen im Verkehrssektor eingesetzt. In Summe nimmt ihr Verbrauch im MMS von 134 PJ im Jahr 2030 auf 105 PJ im Jahr 2045 ab. Im MWMS wird eine Abnahme von 140 PJ im Jahr 2030 auf 109 PJ im Jahr 2045 projiziert. (Tabelle 26).

Tabelle 26: Projizierter Verbrauch von Biomassebrennstoffen nach Sektoren in den Jahren 2030 und 2045 im MMS und MWMS

Biomassetyp	Sektor	MMS 2030	MMS 2045	MWMS 2030	MWMS 2045
		PJ			
Feste Biomassebrennstoffe	Energiewirtschaft	456	315	493	365
	Industrie	127	175	136	189
	Gebäude	455	519	478	541
	Landwirtschaft	6	7	6	7
	Zwischensumme	1.044	1.017	1.113	1.102
Gasförmige Biomassebrennstoffe	Energiewirtschaft	216	36	216	36
	Gebäude	17	25	23	59
	Verkehr	6	1	8	1
	Landwirtschaft	18	6	18	6
	Zwischensumme	257	68	265	102
Flüssige Biomassebrennstoffe	Gebäude	0,01	>0,01	0,01	0,01
	Verkehr	134	103	140	109
	Landwirtschaft	5	8	5	8
	Zwischensumme	139	111	145	117
Gesamt		1.440	1.196	1.523	1.321

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Modellierung in den genannten Sektoren, Öko-Institut.

Die Herkunft der Biomassebrennstoffe wird in den verwendenden Sektoren nicht modelliert. Für einen Vergleich mit der inländischen Produktion an Biomassebrennstoffen wird auf Ergebnisse der Modellierungen im Sektor Landwirtschaft und LULUCF zurückgegriffen. So wird das Waldenergieholzaufkommen aus inländischer Waldbewirtschaftung als Ergebnis der Modellierung für Wald und Holzprodukte projiziert²² (vgl. Kapitel 10). Im Sektor Landwirtschaft wird der Anbau von Substraten für Biogas/Biomethan und Biokraftstoffen und die Vergärung von Tierexkrementen zu Biogas modelliert (vgl. Kapitel 8). Die Herkunft von Biobrennstoffen aus biogenen Rest- und Abfallrohstoffen wird aktuell nicht modellgestützt abgebildet. Als Abschätzung wird

²² Der Anteil der stofflichen und energetischen Nutzung von Rohholz wird hierfür konstant fortgeschrieben. Für die Abschätzung des Heizwertes der Waldenergieholz-Sortimente (Scheitholz, Waldhackschnitzel) wird von einem Wassergehalt von 15 % ausgegangen.

deren Verbrauch aus den Daten der Rohstoffdatenbank des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ; Stichjahr 2015)²³ ermittelt und konstant fortgeschrieben. Die Reststoffgruppen Tierexkremente und Waldrestholz werden dabei ausgeklammert, da sie bereits in der Modellierung der Landwirtschaft und der Waldbewirtschaftung berücksichtigt sind (s.o.).

In Tabelle 27 und Abbildung 16 ist der projizierte Verbrauch je Biomassetyp dargestellt. Dazu wird die projizierte Menge an inländischer Biomasse für unterschiedliche Herkünfte aus den oben genannten Quellen zusammengestellt und dem projizierten Verbrauch (Tabelle 26) gegenübergestellt.

Ist die Differenz aus projiziertem Verbrauch an Biomassebrennstoffen und dem inländischen Aufkommen an Biomassebrennstoffen größer Null, so ist die Nachfrage nicht gedeckt. Diese Lücke wird als „potenzieller Importbedarf“ ausgewiesen. Bei Werten kleiner Null stehen mehr inländische Biomassebrennstoffe zur Verfügung, als verbraucht werden. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass keine Rückkopplung zwischen dem inländischen Aufkommen an Biomassebrennstoffen und deren inländischen Verbrauch stattfindet. Marktwirtschaftliche Effekte, insbesondere Preisveränderungen in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit der Biomassebrennstoffe, können das modellierte Ergebnis verändern. Für feste und flüssige Biomassebrennstoffe werden durch die Anbindung an globale Märkte und entsprechenden Importoptionen diese Effekte aber als gering eingeschätzt.

Für das Jahr 2030 werden beispielsweise im MMS 354 PJ an inländischem Waldenergieholz projiziert und 302 PJ an inländischen festen Biomassebrennstoffen aus Abfall- und Reststoffen abgeschätzt (Summe: 656 PJ; Tabelle 27). Gegenüber dem projizierten Verbrauch an festen Biomassebrennstoffen von 1.044 PJ (Tabelle 26) ergibt sich ein potenzieller Importbedarf von 388 PJ an fester Biomasse (Tabelle 27). Im Jahr 2045 im MMS sinkt der potenzielle Importbedarf leicht. Im MWMS erhöht sich der potenzielle Importbedarf gegenüber dem MMS um 86 PJ auf 474 PJ im Jahr 2030 bzw. 427 PJ im Jahr 2045. Dies resultiert vor allem aus dem projizierten Anstieg der Verbräuche im Gebäudesektor (Tabelle 26).

Der projizierte inländische Verbrauch an gasförmigen Biomassebrennstoffen nimmt vor allem für Tierexkrementen von 30 PJ im MMS auf 85 PJ im MWMS zu (Tabelle 27). Im Zeitverlauf werden hingegen nur geringe Abnahmen für gasförmige Biomassebrennstoffe aus Anbaubiomasse projiziert. Da der projizierte Verbrauch an gasförmigen Biobrennstoffen aber im Zeitverlauf deutlich sinkt (Tabelle 26), werden sowohl im MMS also auch im MWMS mehr gasförmige Biomassebrennstoffen erwartet, als verbraucht werden (Tabelle 27).

Als Rohstoff für inländische flüssige Biomassebrennstoffe werden vor allem Anbaubiomasse und mit einer geringeren Mengen Rest- und Abfallstoffe erwartet (Tabelle 27). Für flüssige Biomassebrennstoffe tritt wiederum ein potenzieller Importbedarf auf. Dieser sinkt aber von ca. 75 PJ im Jahr 2030 auf ca. 45 PJ im Jahr 2045 bei nur geringen Unterschieden zwischen MMS und MWMS (Tabelle 27).

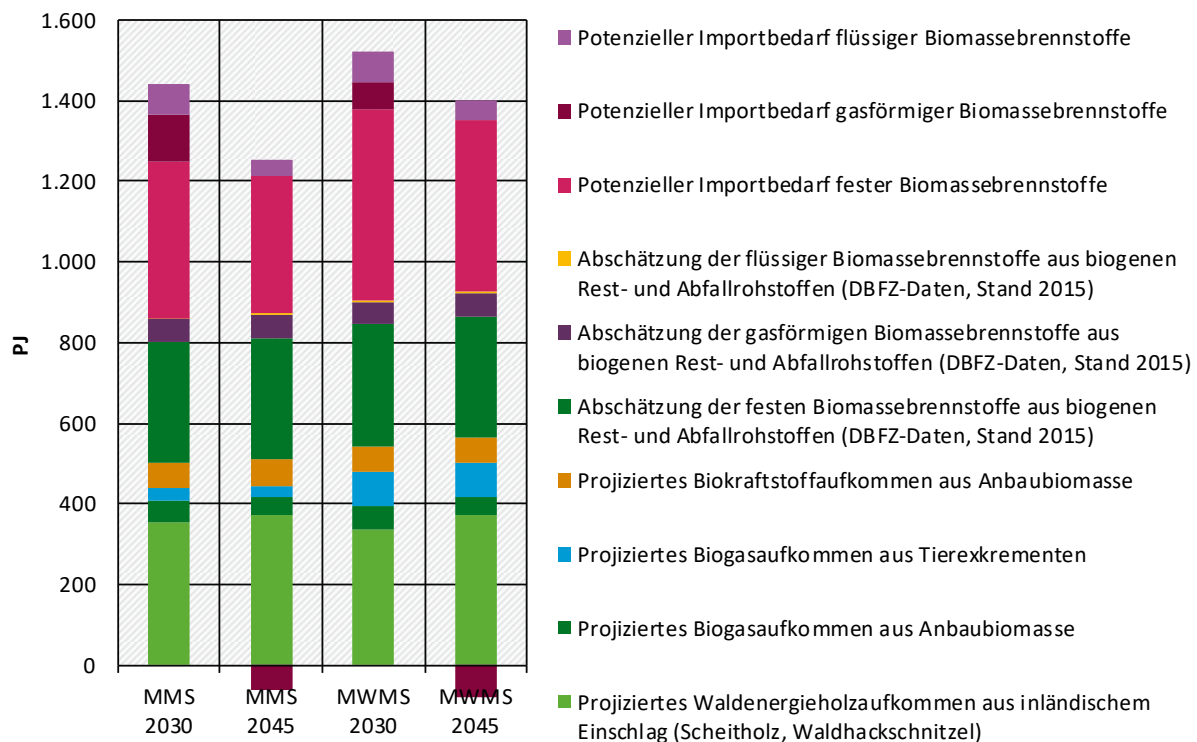
²³ Rohstoffdaten Datenbank des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ): <https://webapp.dbfz.de/resources/?lang=de> (Datendownload am 22.02.2022).

Tabelle 27: Projizierter Verbrauch an Biomassebrennstoffen nach Herkunft und potenzieller Importbedarf in den Jahren 2030 und 2045 im MMS und MWMS

Biomassetyp	Herkunft	MMS 2030	MMS 2045	MWMS 2030	MWMS 2045
		PJ			
Feste Biomassebrennstoffe	Projiziertes Waldenergieholzaufkommen aus inländischem Einschlag (Scheitholz, Waldhackschnittel)	354	374	338	374
	Abschätzung der festen Biomassebrennstoffe aus biogenen Rest- und Abfallrohstoffen (DBFZ-Daten, Stand 2015)	302	302	302	302
	Potenzieller Importbedarf* fester Biomassebrennstoffe	388	341	474	427
Gasförmige Biomassebrennstoffe	Projiziertes Biogasaufkommen aus Anbaubiomasse	55	41	55	41
	Projiziertes Biogasaufkommen aus Tierexkrementen	30	30	85	85
	Abschätzung der gasförmigen Biomassebrennstoffe aus biogenen Rest- und Abfallrohstoffen (DBFZ-Daten, Stand 2015)	55	55	55	55
	Potenzieller Importbedarf* gasförmiger Biomassebrennstoffe	116	-59 ²⁴	69	-80 ²⁴
Flüssige Biomassebrennstoffe	Projiziertes Biokraftstoffaufkommen aus Anbaubiomasse	62	65	65	65
	Abschätzung der flüssigen Biomassebrennstoffe aus biogenen Rest- und Abfallrohstoffen (DBFZ-Daten, Stand 2015)	3	3	3	3
	Potenzieller Importbedarf* flüssiger Biomassebrennstoffe	74	43	76	49
Gesamt		1.440	1.196	1.523	1.321
<i>davon inländisch</i>		<i>862</i>	<i>871</i>	<i>903</i>	<i>925</i>
<i>davon potenzieller Import</i>		<i>578</i>	<i>324</i>	<i>619</i>	<i>396</i>

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Modellierung in den Sektoren Landwirtschaft und LULUCF, Thünen-Institut und Öko-Institut. Ausnahme: Daten zu Rest- und Abfallstoffen (ohne Tierexkremente und Waldrestholz) stammen aus der Rohstoffdatenbank des DBFZ. *Der potenzielle Importbedarf an Biomassebrennstoffen ergibt sich aus dem projizierten Verbrauch an Biomassebrennstoffen minus der Summe des projizierten Aufkommens an Biomassebrennstoffen in der Land- und Forstwirtschaft und der Abschätzung der Biomassebrennstoffe aus biogenen Rest- und Abfallrohstoffen.

²⁴ Negative Zahlen stehen für einen zu erwartenden Überschuss bzw. möglichen Export.

Abbildung 16: Projizierter Verbrauch an Biomassebrennstoffen und potenzieller Importbedarf in den Jahren 2030 und 2045 im MMS und MWMS

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Ergebnisse in Tabelle 27, Thünen-Institut und Öko-Institut. Der potenzielle Importbedarf an Biomassebrennstoffen ergibt sich aus dem projizierten Verbrauch an Biomassebrennstoffen minus der Summe des projizierten Aufkommens an Biomassebrennstoffen in der Land- und Forstwirtschaft und der Abschätzung der Biomassebrennstoffe aus biogenen Rest- und Abfallrohstoffen.

Die Analyse zum projizierten rechnerischen Verbrauch lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

- ▶ Der projizierte Biomasseverbrauch im MMS ist höher als die gemäß Projektion verfügbaren Mengen an inländischen Biomassebrennstoffen. Durch die weiteren Maßnahmen im MWMS steigt dieser weiter an. Importe können mit Risiken für die Umwelt, das Klima und soziale Aspekte in den Herkunftsländern verbunden sein, die positiven Effekten in Deutschland gegenüberstehen. Hierzu bedarf es einer weitergehenden Analyse.
- ▶ Aus dieser Analyse ergibt sich ein potenzieller Importbedarf, der insbesondere für feste Biomassebrennstoffe sehr hoch ist (von 341 PJ im MMS im Jahr 2045 bis 474 PJ im MWMS im Jahr 2030). Im Jahr 2020 lag der Netto-Import an Holzenergieprodukten bei 0,38 Mio. t (Analysen zur deutschen Außenhandelsstatistik in Hennenberg et al. (2022)). Dies entspricht weniger als 10 PJ.
- ▶ Wird Waldenergieholz, das im Ausland eingeschlagen wird, nach Deutschland importiert, so werden die CO₂-Emissionen auf der Waldfläche in dem Treibhausgasinventar des Herkunftslands und nicht in Deutschland bilanziert. Aufgrund der unter UNFCCC bzw. IPCC geltenden Konvention, Treibhausgasemissionen nach dem Quellprinzip zu verbuchen, können Instrumente, die Anreize zur Minderung von Treibhausgasemissionen setzen sollen, bzw. Maßnahmen dazu führen, dass sich zwar das deutsche Treibhausgasinventar verbessert, Treibhausgasemissionen aber ins Herkunftsland externalisiert werden (Leakage).

- Der Treiber für diese Entwicklung ist vor allem der Gebäudesektor. Hier steigen die hohen projizierten Verbrauch an fester Biomasse vom Jahr 2030 bis 2045 weiter an, und sie sind im MWMS höher als im MMS.
- Gerade der als fester Biomassebrennstoff genutzte Rohstoff Holz hat in den meisten Fällen das Potenzial, auch stofflich genutzt zu werden, um so im Holz gebundenen Kohlenstoff weiter zu speichern. Vor allem aufgrund dieser Kohlenstoffspeicherung sind Holzproduktwege aus Klimaschutzsicht besser als Holzenergiepfade.
- Eine Umsetzung von Maßnahmen, die die stoffliche Nutzung von Holz forcieren können (Holzbauinitiative, Kaskadenprinzip in der RED III), ist noch nicht im MWMS berücksichtigt. So wird in der dargestellten Analyse das heutige Verhältnis von stofflicher und energetischer Nutzung von Waldholz und von Rest- und Abfallstoffen als konstant fortgeschrieben. Bei einer möglichen Veränderung hin zu mehr stofflicher Nutzung wird das inländische Aufkommen an festen Biomassebrennstoffen entsprechend abnehmen und sich die Lücke zwischen Nachfrage und nachhaltigem Potenzial weiter vergrößern. Als Konsequenz treten noch höhere potenzielle Importe fester Biomassebrennstoffe auf.
- Vor diesem Hintergrund erscheint es geboten, Maßnahmen derart anzupassen, dass generell der Bioenergieverbrauch in Deutschland sinkt, insbesondere aber für feste Biomassebrennstoffe in den Sektoren Gebäude und Energiewirtschaft. Dabei sollten Aspekte wie die regionale Verfügbarkeiten der Rohstoffe, die Größe und Effizienz von Anlagen und mögliche Alternativen an erneuerbaren Energien einfließen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die dargestellte Analyse zum ersten Mal im Rahmen des Projektionsberichts durchgeführt wurde. Auf der methodischen Ebene sollten im nächsten Projektionsbericht die Analysen zum Aufkommen von Rest- und Abfallstoffen nicht nur anhand historischer Daten abgeschätzt, sondern dynamisch modelliert werden.

3.5 Endenergieverbrauch

Sowohl im MMS als auch im MWMS wurde der Endenergieverbrauch für die einzelnen Sektoren modelliert. Tabelle 28 zeigt diesen projizierten EEV aufgeteilt auf die vier relevanten Sektoren der Energiebilanz – Industrie; Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD); Haushalte sowie Verkehr.

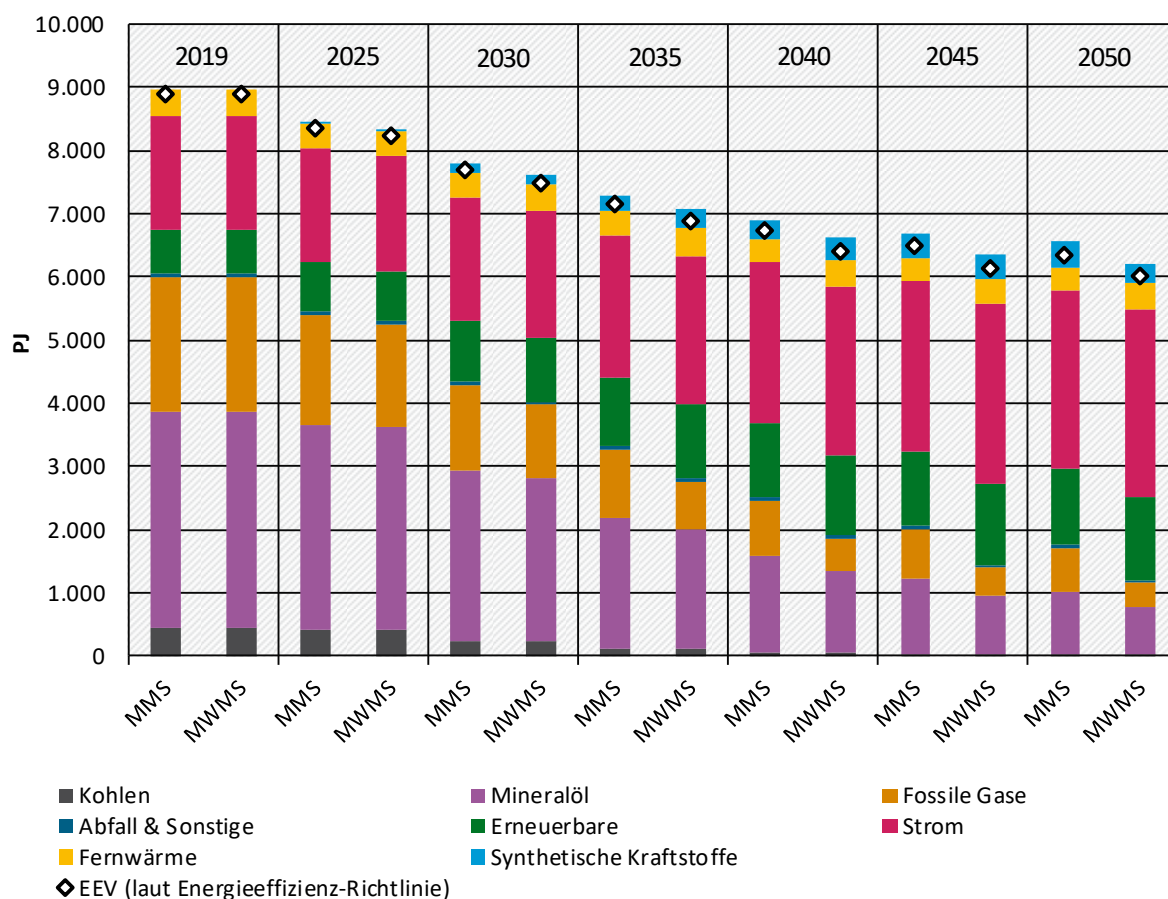
Tabelle 28: Endenergieverbrauch nach Energiebilanzsektoren im MMS und MWMS, 2019-2050

Sektor	Szenario	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
		PJ						
Industrie	MMS	2.500	2.476	2.293	2.192	2.155	2.176	2.202
	MWMS	2.500	2.464	2.260	2.151	2.131	2.155	2.179
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	MMS	1.309	1.132	1.067	1.047	999	948	908
	MWMS	1.309	1.119	1.050	1.019	955	881	876
Haushalte	MMS	2.417	2.230	2.036	1.836	1.687	1.581	1.503
	MWMS	2.417	2.143	1.989	1.804	1.655	1.538	1.440

Sektor	Szenario	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
		PJ						
Verkehr	MMS	2.732	2.595	2.407	2.221	2.064	1.978	1.945
	MWMS	2.732	2.572	2.327	2.099	1.899	1.777	1.720
Endenergieverbrauch gesamt	MMS	8.958	8.433	7.804	7.297	6.904	6.683	6.559
	MWMS	8.958	8.298	7.625	7.072	6.640	6.351	6.216
Änderung ggü. 2019	MMS	0,0 %	-5,9%	-12,9%	-18,5%	-22,9%	-25,4%	-26,8%
	MWMS	0,0 %	-7,4%	-14,9%	-21,0%	-25,9%	-29,1%	-30,6%

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2022a), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2022a; 2008-2022b), Modellierung Fraunhofer-ISI, I-REES und Öko-Institut

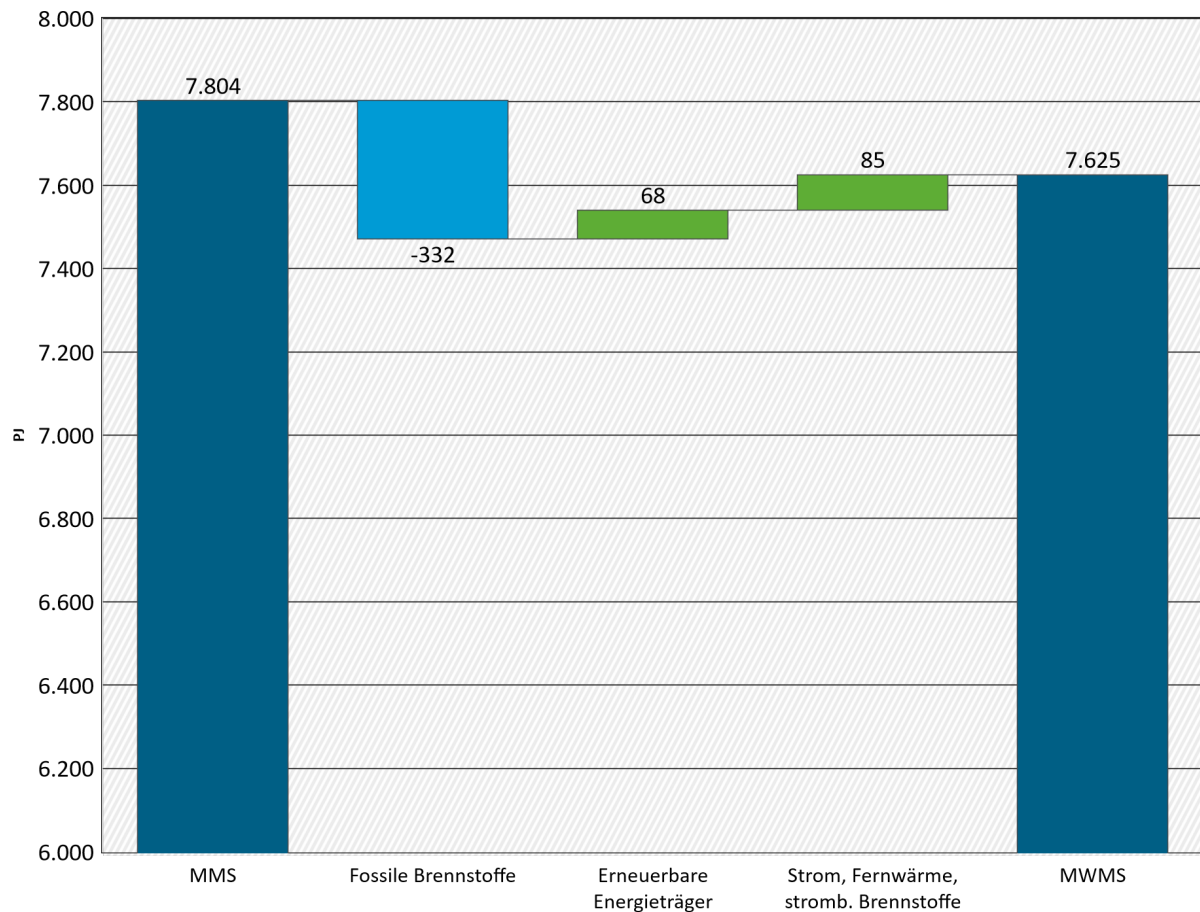
Im Jahr 2030 liegt der projizierte Endenergieverbrauch im MMS rund 13 % unter dem Wert von 2019; im MWMS ist der projizierte Endenergieverbrauch 2030 um rund 15 % geringer als 2019. Bis zum Jahr 2050 beträgt die projizierte Reduktion des Endenergieverbrauchs rund 27 % im MMS und 31 % im MWMS. Deutlichere Änderungen sind jedoch beim Einsatz der Endenergieträger ersichtlich, wie in Abbildung 17 dargestellt. Während z.B. im Jahr 2019 noch rund zwei Drittel der Endenergieträger fossil sind, reduziert sich deren projizierter Anteil im MMS auf rund 56 % im Jahr 2030 und rund 27 % im Jahr 2050. Im MWMS beträgt der projizierte Anteil fossiler Endenergieträger 2030 rund 53 % und 2050 rund 19 %.

Abbildung 17: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im MMS und MWMS, 2019-2050

Anmerkung: Zusätzlich zum Endenergieverbrauch in nationaler Abgrenzung ist der Endenergieverbrauch in der Abgrenzung der europäischen Energieeffizienz-Richtlinie dargestellt. In der nationalen Methode wird Umweltwärme berücksichtigt, in der Methode laut Energieeffizienz-Richtlinie hingegen nicht.

Quelle: Brennstoffe: (UBA 2022a), übrige Energieträger: (AGEB 2008-2022a; 2008-2022b), Modellierung Fraunhofer-ISI, I-REES und Öko-Institut

Die Unterschiede zwischen MMS und MWMS im projizierten Endenergieverbrauch sind im Jahr 2030 relativ gering (Abbildung 18).

Abbildung 18: Veränderung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern im MWMS gegenüber dem MMS, Jahr 2030

Quelle: Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

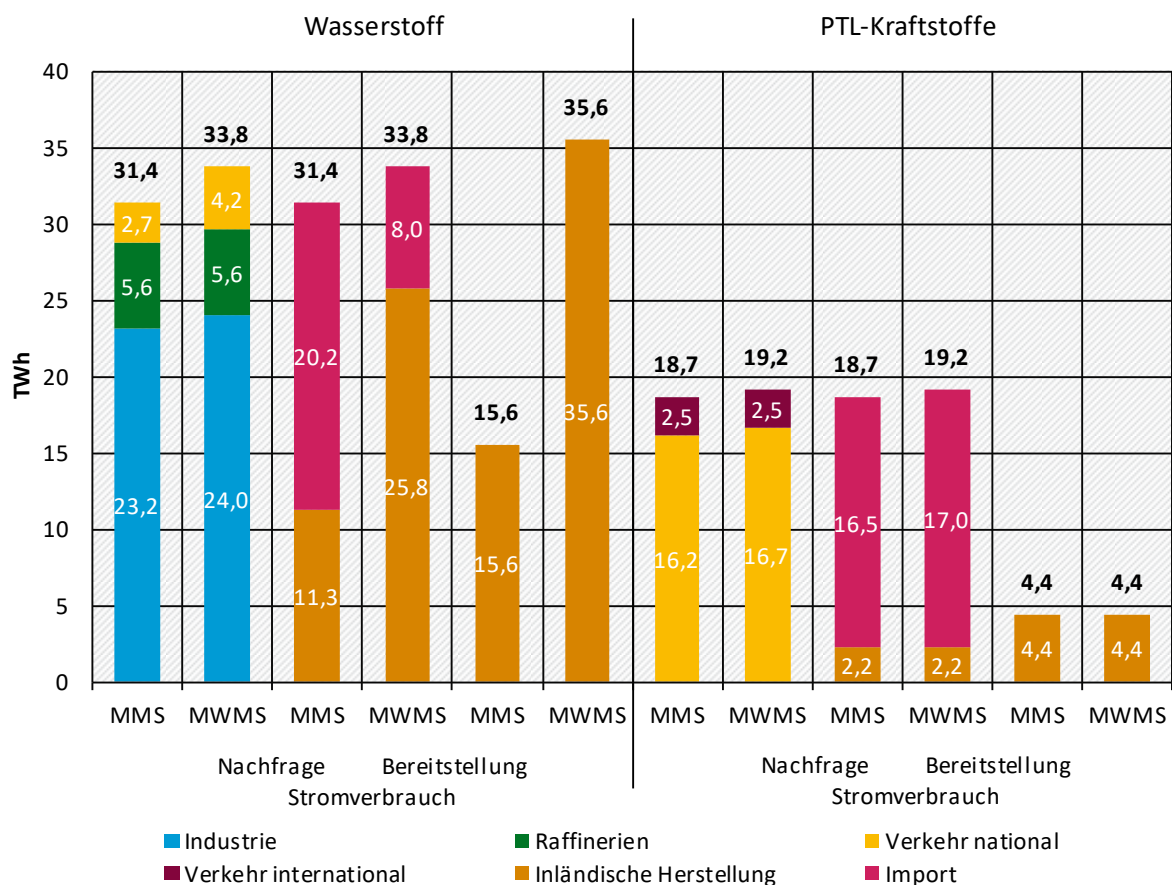
3.6 Nachfrage nach strombasierten Brennstoffen (E-Fuels)

Die projizierte Nachfrage und Bereitstellung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien und von synthetischen Flüssigkraftstoffen im Jahr 2030 ist in Abbildung 19 dargestellt. Die größte Wasserstoff-Nachfrage besteht in der Industrie (vor allem Stahl- und Chemieindustrie)²⁵, gefolgt von den Raffinerien (die ein Teil der Energiewirtschaft sind)²⁶. Die Unterschiede zwischen MMS und MWMS sind dabei gering. Im nationalen Verkehr ist die Nachfrage nach Wasserstoff im MWMS hingegen deutlich höher als im MMS. Im MMS muss der Wasserstoff zum großen Teil importiert werden, während im MWMS eine höhere Kapazität an Elektrolyseuren für die inländische Wasserstoffherstellung zur Verfügung steht. Der Stromverbrauch für die Herstellung des Wasserstoffs ist ebenfalls in der Abbildung dargestellt; im MWMS beträgt dieser 35,6 TWh im Jahr 2030.

Synthetische flüssige Kraftstoffe werden hauptsächlich vom nationalen Verkehr nachgefragt, ein geringerer Anteil auch vom internationalen Flugverkehr. Der Unterschied zwischen MMS und MWMS ist dabei gering. Diese Kraftstoffe müssen zum überwiegenden Teil importiert werden. In beiden Szenarien werden im Jahr 2030 rund 2,2 TWh synthetischer flüssiger Kraftstoffe in Deutschland hergestellt, wofür rund 4,4 TWh Strom benötigt wird.

²⁵ Siehe Abschnitt 5.1.

²⁶ Siehe Abschnitt 4.3.

Abbildung 19: Projizierte Nachfrage und Bereitstellung von Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen im MMS und MWMS, Jahr 2030

Quelle: Modellierung Fraunhofer-ISI, IREES und Öko-Institut

3.7 Bruttostromverbrauch

In Tabelle 29 ist die Entwicklung des Bruttostromverbrauchs dargestellt, der im MMS von knapp 576 TWh im Jahr Basisjahr 2019 auf knapp 661 TWh im Jahr 2030 und auf 1009 TWh im Jahr 2050 ansteigt. Der Bruttostromverbrauch setzt sich zusammen aus dem Endenergieverbrauch von Strom einerseits und dem Stromverbrauch der Energiewirtschaft andererseits.

Der Endenergieverbrauch von Strom zeigt in den verschiedenen Sektoren eine unterschiedliche Entwicklung. In der Industrie führt die Elektrifizierung einer Vielzahl von Prozessen dazu, dass der Stromverbrauch deutlich ansteigt, wobei der größte Anstieg zwischen 2030 und 2040 zu verzeichnen ist. Da es zu deutlichen Einsparungen bei Geräten und Prozessen kommt, sinkt der Stromverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) kontinuierlich bis 2050, trotz zusätzlicher Wärmepumpen. Der Stromverbrauch der privaten Haushalte steigt bis 2040 an, um dann bis 2050 wieder abzusinken. Der wesentliche Treiber für den zusätzlichen Stromverbrauch sind hier die Wärmepumpen. Das Maximum liegt aber niedriger als bereits in der Vergangenheit verzeichnete Verbräuche. Im Verkehr dominiert bisher der Stromverbrauch des Schienenverkehrs. Dieser Stromverbrauch bleibt in etwa konstant, dazu kommt aber der Stromverbrauch des Straßenverkehrs, der 2030 bereits mehr als das Vierfache des Schienenverkehrs verbraucht und 2050 sogar mehr als Haushalte und GHD zusammen verbrauchen wird.

In Summe steigt der Endenergieverbrauch von Strom deutlich an und liegt dann 2030 um gut 48 TWh und 2050 um knapp 281 TWh höher als im Basisjahr 2019. Der Anteil von neuen

Stromanwendungen macht 2030 bereits ein Fünftel und 2050 fast die Hälfte des Stromendenergieverbrauchs aus.

Zum Endenergieverbrauch von Strom kommt noch der Stromverbrauch der Energiewirtschaft selbst hinzu. Die größte Veränderung liegt hier beim hinzukommenden Stromverbrauch durch die Herstellung von Wasserstoff und PtL-Kraftstoffen für die Sektoren Industrie und Verkehr sowie in geringerem Maße der Raffinerien. Aber auch für die Kraftwerke selbst wird ab 2035 Wasserstoff in relevanten Mengen zur Rückverstromung erzeugt. Dieser Stromverbrauch zur Bereitstellung von Wasserstoff tritt zusätzlich zum deutlich ansteigenden Speicherstrom in Pump- und Batteriespeichern auf und ist daher in Tabelle 29 separat aufgeführt. Beim Speicherstrom wird der Anstieg hauptsächlich durch Batterien verursacht. Die Fernwärmeerzeugung mittels Stroms über Elektrodenkessel und Großwärmepumpen ist bis 2040 stark absteigend. Der insgesamt ansteigende Stromverbrauch hat auch höhere Netzverluste zur Folge. Der Umstieg von einem nuklear-fossil-dominierten auf ein vor allem erneuerbares Stromerzeugungssystem führt dazu, dass die Kraftwerkseigenverbräuche bis 2030 zunächst deutlich sinken.²⁷ Anschließend steigen die Kraftwerkseigenverbräuche durch eine Ausweitung der Stromerzeugung insgesamt wieder leicht an. Deutlich sinkend ist der Stromverbrauch von Raffinerien und sonstigen Anlagen der Energiewirtschaft aufgrund rückläufiger Nachfrage nach fossilen Brennstoffen wie Mineralölprodukten und Koks. In Summe vervielfacht sich der Stromverbrauch der Energiewirtschaft, wobei der größte Anstieg zwischen 2025 und 2040 erfolgt.

²⁷ In Dampfkraftwerken (wie z.B. Kern- und Kohlekraftwerken) liegt der Eigenverbrauch verursacht durch den Stromverbrauch der Speisewasserpumpen deutlich höher als bei anderen Stromerzeugungstechnologien.

Tabelle 29: Bruttostromverbrauch im MMS in TWh, 2008-2050

Sektor	2008	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Industrie	232,6	218,4	229,3	242,6	261,6	280,9	286,1	290,2
<i>davon neue Verbraucher</i>	0,0	0,0	7,1	41,6	65,6	85,2	90,2	90,8
GHD	135,3	144,4	115,3	109,1	108,9	105,2	103,1	102,5
<i>davon Wärmepumpen</i>	0,0	0,2	2,1	1,6	2,1	2,7	3,2	3,7
Haushalte	139,5	125,7	130,3	133,1	136,6	137,2	134,2	132,6
<i>davon Wärmepumpen</i>	0,0	0,0	7,0	14,5	22,1	26,0	25,8	25,2
Schienenverkehr	16,5	11,3	12,0	11,8	11,5	11,5	11,5	11,5
Straßenverkehr	0,0	0,3	18,1	51,7	110,2	174,7	215,0	243,9
Stromverbrauch Endenergie	523,9	500,1	504,9	548,4	628,9	709,4	750,0	780,8
<i>Änderung ggü. 2008</i>	0,0%	-4,5%	-3,6%	4,7%	20,0%	35,4%	43,2%	49,0%
Summe Endenergie klassische Verbraucher	523,9	499,6	470,7	439,0	428,8	420,8	415,7	417,2
<i>Änderung ggü. 2008</i>	0,0%	-4,6%	-10,1%	-16,2%	-18,1%	-19,7%	-20,6%	-20,4%
Summe Endenergie neue Verbraucher	0,0	0,6	34,2	109,3	200,1	288,5	334,3	363,6
<i>Anteil am Stromverbrauch Endenergie</i>	0,0%	0,1%	6,8%	19,9%	31,8%	40,7%	44,6%	46,6%
Raffinerien	6,4	6,0	5,7	4,9	3,8	2,8	2,3	1,9
H2/PtL für Endverbrauch	0,0	0,0	2,6	20,0	30,0	40,1	50,1	60,1
H2 für Speicher	0,0	0,0	0,0	0,6	11,0	12,3	11,7	11,2
Übrige Energiewirtschaft	7,7	5,0	3,8	2,5	1,3	0,4	0,3	0,2
Leitungsverluste	30,1	27,5	28,0	31,6	36,9	42,5	45,7	48,3
Pump- & Batteriespeicher	7,9	8,1	8,0	28,8	38,0	39,2	39,8	39,6
Kraftwerkseigenverbrauch	38,3	30,1	24,9	17,6	19,6	20,9	21,3	21,7
Elektrodenkessel und Großwärmepumpen	0,0	0,0	1,6	6,2	21,0	64,1	53,8	45,4
Stromverbrauch Energiewirtschaft	90,5	76,7	74,5	112,2	161,7	222,2	225,0	228,4
<i>Änderung ggü. 2008</i>	0,0%	-15,2%	-17,6%	24,0%	78,7%	145,5%	148,6%	152,4%
Statistische Differenz*	-6,3	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bruttostromverbrauch	620,7	575,6	579,5	660,6	790,6	931,6	975,0	1009,2
<i>Änderung ggü. 2008</i>	0,0%	-7,3%	-6,6%	6,4%	27,4%	50,1%	57,1%	62,6%

Quelle: (AGEB 2008-2022a) und Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer-ISI und IREES

Anmerkung: * Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Datenquellen ergeben sich kleine statistische Differenzen.

Im MWMS (Tabelle 30) steigt der Bruttostromverbrauch deutlich stärker als im MMS. Bis 2030 steigt der Bruttostromverbrauch bereits auf 712 TWh, also um gut 51 TWh mehr als im MMS. Im Jahr 2050 verdoppelt sich der Bruttostromverbrauch gegenüber dem Basisjahr 2019 nahezu auf gut 1149 TWh, was 140 TWh mehr sind als im MMS.

Der Stromverbrauch der Industrie liegt im MWMS etwas höher als im MMS, wobei der größte Unterschied mit 9 TWh im Jahr 2040 auftritt. Der Unterschied bei GHD ist zwischen den beiden Szenarien nur gering. Im Gegensatz dazu liegt der Stromverbrauch der Haushalte im MWMS vor allem durch zusätzlichen Wärmepumpenstrom deutlich höher als im MMS, ca. 8 TWh im Jahr 2030 und mit einem Maximum von 20 TWh im Jahr 2045. Der Stromverbrauch des Schienenverkehrs liegt im MWMS kontinuierlich etwas höher, der Stromverbrauch des Straßenverkehrs steigt im MWMS schneller und stärker an und liegt 2050 um 25 TWh höher als im MMS. In Summe liegt der Stromverbrauch im MWMS im Jahr 2050 um 46 TWh höher als im MMS, was vor allem durch zusätzliche neue Verbraucher erklärt werden kann.

In der Energiewirtschaft sind die wesentlichen Änderungen der zusätzliche Stromverbrauch für die Herstellung von Wasserstoff und PtL-Kraftstoffen für Industrie und Verkehr, der in allen Szenarienjahren ungefähr doppelt so hoch wie im MMS ist. Ebenfalls deutlich höher ist der Stromverbrauch für Einspeicherung in Batterien und Pumpspeichern, wohingegen die Wasserstoffherstellung für Rückspeicherung nur wenig anders ist als im MMS. Bis 2035 wird im MWMS mehr Strom für die Fernwärmebereitstellung über Elektrodenkessel und Großwärmepumpen et, ab 2040 dann aber deutlich weniger als im MMS. Dies wird durch den insgesamt deutlich höheren Stromverbrauch verursacht, der auch höhere Leitungsverluste verursacht. Die Veränderungen der übrigen Stromverbräuche der Energiewirtschaft im MWMS gegenüber dem MMS sind nur gering. In Summe benötigt die Energiewirtschaft im MMS im Jahr 2030 gut 37 TWh mehr Strom als im MWMS und weist im Jahr 2050 einen über 94 TWh höheren Verbrauch auf.

Tabelle 30: Bruttostromverbrauch im MWMS in TWh, 2008-2050

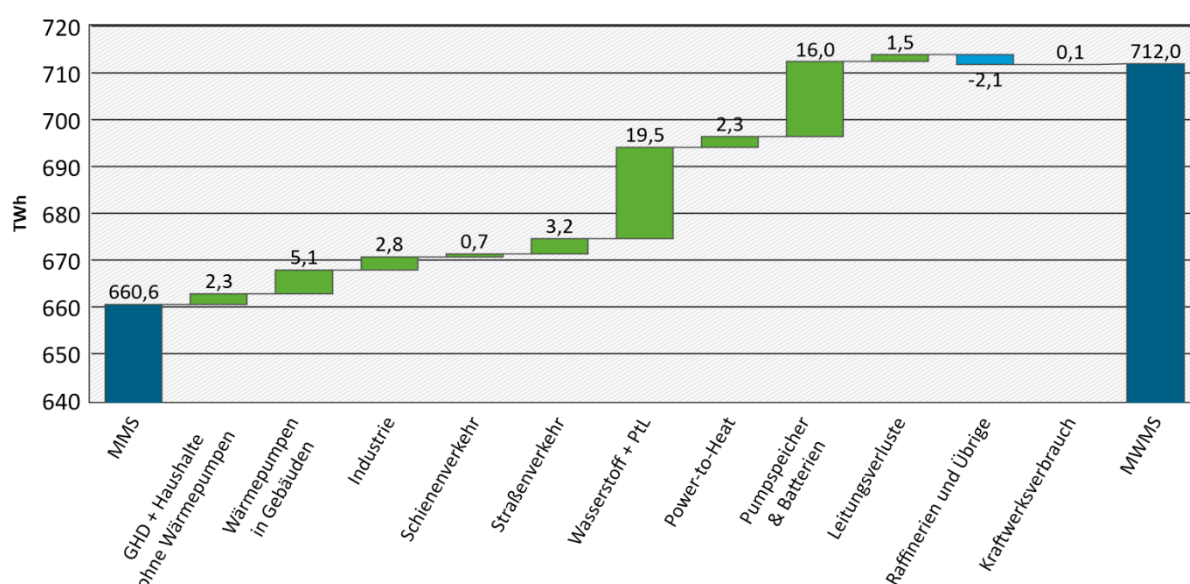
Sektor	2008	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Industrie	232,6	218,4	230,1	245,4	267,0	290,2	293,5	294,4
<i>davon neue Verbraucher</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>7,3</i>	<i>49,0</i>	<i>75,7</i>	<i>98,4</i>	<i>101,4</i>	<i>98,9</i>
GHD	135,3	144,4	114,3	108,5	108,2	104,9	101,9	101,0
<i>davon Wärmepumpen</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,8</i>	<i>1,1</i>	<i>1,5</i>	<i>1,8</i>	<i>2,1</i>	<i>2,4</i>
Haushalte	139,5	125,7	130,0	141,1	152,7	156,6	154,7	150,5
<i>davon Wärmepumpen</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>7,5</i>	<i>20,0</i>	<i>34,2</i>	<i>40,7</i>	<i>39,5</i>	<i>35,8</i>
Schienenverkehr	16,5	11,3	12,7	12,5	12,2	12,2	12,2	12,1
Straßenverkehr	0,0	0,3	16,1	54,9	112,4	178,9	232,5	268,7
Stromverbrauch Endenergie	523,9	500,1	503,2	562,4	652,6	742,7	794,6	826,7
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0%</i>	<i>-4,5%</i>	<i>-3,9%</i>	<i>7,4%</i>	<i>24,6%</i>	<i>41,8%</i>	<i>51,7%</i>	<i>57,8%</i>
Summe Endenergie klassische Verbraucher	523,9	499,8	471,5	437,4	428,7	423,0	419,2	420,9
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0%</i>	<i>-4,6%</i>	<i>-10,0%</i>	<i>-16,5%</i>	<i>-18,2%</i>	<i>-19,3%</i>	<i>-20,0%</i>	<i>-19,6%</i>
Summe Endenergie neue Verbraucher	0,0	0,3	31,7	125,0	223,9	319,8	375,4	405,8
<i>Anteil am Stromverbrauch Endenergie</i>	<i>0,0%</i>	<i>0,1%</i>	<i>6,3%</i>	<i>22,2%</i>	<i>34,3%</i>	<i>43,1%</i>	<i>47,2%</i>	<i>49,1%</i>
Raffinerien	6,4	6,0	5,7	4,7	3,4	2,4	1,8	1,5
H2/PtG/PtL für Endverbrauch	0,0	0,0	2,7	40,1	60,0	80,1	100,2	120,3
H2 für Speicher	0,0	0,0	0,0	0,0	9,6	16,0	12,7	10,4
Übrige Energiewirtschaft	7,7	5,0	2,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2
Leitungsverluste	30,1	27,5	27,8	33,1	39,2	45,3	49,2	52,1
Pump- & Batteriespeicher	7,9	8,1	13,5	44,8	68,7	84,1	97,5	94,1
Kraftwerkseigenverbrauch	38,3	30,1	25,1	17,7	19,8	21,4	21,9	22,5
Elektrodenkessel und Großwärmepumpen	0,0	0,0	1,7	8,6	29,0	34,4	24,4	21,8
Stromverbrauch Energiewirtschaft	90,5	76,7	79,2	149,5	230,2	284,1	308,0	322,9
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0%</i>	<i>-15,2%</i>	<i>-12,5%</i>	<i>65,1%</i>	<i>154,4%</i>	<i>213,9%</i>	<i>240,3%</i>	<i>256,8%</i>
Statistische Differenz*	-6,3	1,2	-0,9	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
Bruttostromverbrauch	620,7	575,6	583,2	712,0	882,8	1026,7	1102,5	1149,5
<i>Änderung ggü. 2008</i>	<i>0,0%</i>	<i>-7,3%</i>	<i>-6,0%</i>	<i>14,7%</i>	<i>42,2%</i>	<i>65,4%</i>	<i>77,6%</i>	<i>85,2%</i>

Quelle: (AGEB 2008-2022a) und Modellrechnungen Öko-Institut, Fraunhofer-ISI und IREES

Anmerkung: * Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Datenquellen ergeben sich kleine statistische Differenzen.

Abbildung 20 stellt für 2030 die einzelnen Beiträge des im MWMS gegenüber dem MMS höheren Stromverbrauchs dar. Der deutlichste Anstieg kommt durch die Herstellung von mehr Wasserstoff und PtL-Kraftstoffen. Auch wird deutlich mehr Strom in Pump- und Batteriespeichern zwischengespeichert, dies vermeidet hohe Abregelungen von fluktuierenden erneuerbaren Energien. Im Vergleich dazu sind die Veränderungen der einzelnen Komponenten des Endenergieverbrauchs deutlich kleiner, aber in Summe in einer ähnlichen Größenordnung. Nennenswert ist auch der zusätzliche Stromverbrauch für Fernwärme („Power-to-Heat“). Die zusätzlichen Leitungsverluste und Kraftwerkseigenverbräuche werden durch geringere Stromverbräuche der Raffinerien und sonstigen fossilen Energiewirtschaft überkompensiert.

Abbildung 20: Veränderung des Bruttostromverbrauchs im MWMS gegenüber dem MMS, 2030



Anmerkungen: Die Hochachse ist abgeschnitten dargestellt, damit die Effekte besser erkennbar sind.

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

3.8 Strom- und Wärmeerzeugung

Die Stromerzeugung (sowohl der öffentlichen Versorgung als auch der Industriekraftwerke), die KWK-Wärmeerzeugung und weitere wärmenetzgebundene (Fern-)Wärmeerzeugung werden in diesem Kapitel berechnet. Im Folgenden sind die zentralen Annahmen und Ergebnisse zusammengefasst. Weitere Parameter und Annahmen für die Strommarktmodellierung sind in Abschnitt 4.3 dokumentiert. Die Emissionen der Kraftwerke teilen sich auf die Energiewirtschaft (Kapitel 4) und die Industrie (Kapitel 5) auf.

Im vorangegangenen Abschnitt wurde der Bruttostromverbrauch bereits detailliert aufgeschlüsselt dargestellt. In Tabelle 31 ist der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch aufgeführt.

Tabelle 31: Bruttostromverbrauch, Bruttostromerzeugung der erneuerbaren Energien und Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch

MMS	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bruttostromverbrauch [TWh]	579,5	660,6	790,6	931,6	975,0	1009,2
Erzeugung EE [TWh]	327,4	560,3	760,0	906,6	926,8	944,0

MMS	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Erneuerbarer Anteil am Bruttostromverbrauch	57%	85%	96%	97%	95%	94%
MWMS	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bruttostromverbrauch [TWh]	583,2	712,0	882,8	1026,7	1102,5	1149,5
Erzeugung EE [TWh]	329,5	571,0	811,4	955,5	987,5	1008,9
Erneuerbarer Anteil am Bruttostromverbrauch	56%	80%	92%	93%	90%	88%

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

Sowohl im MMS als auch im MWMS steigt der Bruttostromverbrauch sukzessive an, wobei er im MWMS stets höher ist. Die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien steigt über den betrachteten Zeitraum stark an: von rund 57 % im Jahr 2025 auf 94 % im MMS und 88 % im MWMS im Jahr 2050. Der Unterschied zwischen den Szenarien liegt hier hauptsächlich in der effektiveren Integration der erneuerbaren Energien in das System im MWMS durch den Einsatz von Batterien, wodurch Abregelungen besser vermieden werden können. Trotzdem führt dies im MWMS aufgrund der erhöhten Nachfrage nicht zu einem höheren Anteil der erneuerbaren Energien. In beiden Szenarien ist im Jahr 2040 der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung am größten und liegt im MMS bei 97 % und im MWMS bei 93 %. In den darauffolgenden Jahren sinkt der Anteil, was daran liegt, dass nach 2040 die installierte Leistung erneuerbarer Energien in etwa konstant bleibt, während der Verbrauch steigt. Es ist zu bemerken, dass auch in den Jahren 2040, 2045 und 2050 noch fossile Stromerzeugung stattfindet. Dabei handelt es sich zum einen um Emissionen aus der Verstromung fossilen Abfalls. Zudem werden weiterhin rund 40 bis 47 TWh Strom in Erdgaskraftwerken erzeugt.

Tabelle 32 zeigt die projizierte Entwicklung der installierten Leistung im MMS. Dargestellt sind die Leistungen zur Jahresmitte. Der Ausbaupfad der Erneuerbaren basiert auf den konkreten Ausschreibungen im EEG 2023 bis 2028 bzw. 2029. Basierend auf den erklärten Ausbauzielen werden die Ausschreibungen in den folgenden Jahren bis 2040 fortgeschrieben, danach bleibt die Leistung der erneuerbaren Energien etwa konstant. Es wird angenommen, dass Ausschreibungen für PV nach einem Jahr und onshore Wind nach zwei Jahren umgesetzt werden. Zudem werden Informationen über den historischen Zubau genutzt, um den Anteil des Zubaus außerhalb der Ausschreibungen abzuschätzen, sowie die Länge des Realisierungszeitraums. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass alle Ausschreibungen laut EEG auch umgesetzt werden, falls dies nicht im ursprünglichen Ausschreibejahr geschieht, wird lediglich von einer Verschiebung ausgegangen. Da die konkreten Ausschreibungen lediglich bis 2028 bzw. 2029 festgeschrieben sind, wird unterstellt, dass die ambitionierten Ziele auch in der Zukunft durch Ausschreibungen untermauert werden. Zudem wird unterstellt, dass sich im Bereich der PV der Trend der Installationsrate von PV-Heimanlagen außerhalb der Ausschreibungen fortsetzt. Die so getroffenen Annahmen stellen bereits einen optimistischen Verlauf des Zubaus dar. Wie Tabelle 32 zeigt, dominieren die erneuerbaren Energien die installierte Leistung. Bereits im Jahr 2023 machen Erneuerbare rund 68 % der gesamten installierten Leistung aus, dieser Anteil steigt bis 2050 auf rund 88 %. Bis Mitte 2030 sind Photovoltaik-Anlagen mit einer Leistung von insgesamt knapp 202 GW, Windkraftanlagen an Land mit insgesamt 106 GW und Windkraftanlagen auf See mit insgesamt 27 GW installiert. Zum Ende des Jahres 2030 liegen die installierten Leistungen für PV bei 213 GW, für Wind an Land bei 110 GW und Wind auf See bei 31 GW. Im Jahr 2050 beträgt die installierte Leistung der PV-Anlagen 400 GW, der Windkraftanlagen an Land 160 GW und der Windkraftanlagen auf See 68 GW. Dieser ambitionierte Ausbaupfad führt zu hohen Anteilen erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung.

Die verbliebenen drei **Kernkraftwerke**, die zum 15. April 2023 stillgelegt wurden, wurden für den Modellierungszeitraum nicht mehr berücksichtigt, da eine Implementierung einer unterjährigen Stilllegung modellseitig nicht vorgesehen ist.

Die installierte Leistung der **Kohlekraftwerke** im MMS ist das Ergebnis der Kombination des Kohleausstiegs nach KVBG und marktgetriebener Stilllegungen. So geht im MMS bereits zum Ende des Jahres 2032 das letzte Kohlekraftwerk vom Netz (vergleiche Abschnitt 4.3).

Die installierte Leistung der **Erdgaskraftwerke** bleibt im Zeitverlauf bis 2050 etwa konstant, da es im MMS kein Instrument gibt, das für einen Ausstieg aus der Erdgasverstromung sorgt und davon ausgegangen wird, dass bei größeren Erdgaskraftwerken entsprechende Reinvestitionen stattfinden, um die installierten Leistungen zu erhalten. Auch die Fernwärmenachfrage wird daher teilweise weiterhin mit Erdgas-KWK-Anlagen gedeckt. Ihre installierte Leistung beträgt im Jahr 2030 insgesamt 34 GW und 2050 noch 28 GW.

Neu hinzu kommen Kraftwerke, die **Wasserstoff** als Brennstoff nutzen. Der Zubau von Wasserstoffkraftwerken wird dem Modell exogen vorgegeben, wobei sich an den Ausschreibungen im EEG orientiert wird. Die installierte Leistung beträgt 8 GW im Jahr 2030 und 21 GW im Jahr 2050.

Der Zubau der Batterien wird ebenfalls exogen vorgegeben. Die installierte Leistung der **Batterien** steigt im MMS bis 2030 auf 18 GW und bis 2050 auf 31 GW (siehe auch Tabelle 56).

Tabelle 32: Installierte Nettonennleistung im MMS, 2019-2050

Technologie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	GW						
Kernenergie	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	18,9	14,6	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	23,6	8,9	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Gas (Erdgas, Grubengas)	28,8	32,0	34,4	32,8	29,0	28,4	28,3
Öl	3,5	2,7	2,5	2,3	2,2	2,1	2,1
Sonstige	4,3	2,7	2,4	2,2	2,2	2,1	2,1
<i>Gichtgas</i>	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Kokereigas</i>	0,3	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
<i>Raffineriegas</i>	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Sonstige Gase</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Abfall</i>	2,0	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Summe Kernbrennstoffe, Kohlen, Gas (Methan, Kuppelgase), Öl, Abfall	88,6	60,9	42,2	37,4	33,3	32,5	32,4
Windenergie an Land	52,8	65,7	106,1	147,1	159,9	160,0	160,0
Windenergie auf See	7,0	10,0	26,6	49,6	62,5	65,0	67,5
Photovoltaik	47,0	97,4	201,8	302,5	393,3	400,1	400,1
Biomasse	8,9	10,7	11,1	7,1	5,1	3,8	2,4
<i>Biogas und Deponie-/Klärgas</i>	7,1	7,5	8,6	5,4	3,6	2,1	0,4

Technologie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<i>Feste Biomasse</i>	1,6	3,0	2,5	1,6	1,5	1,7	1,9
<i>Pflanzenöl</i>	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lauf- und Speicherwasser	5,4	5,7	5,7	5,8	5,8	5,8	5,8
Geothermie	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
Summe Erneuerbare	121,1	189,6	351,3	512,2	626,8	634,9	636,1
Wasserstoff	0,0	0,0	7,9	13,2	17,7	19,6	20,6
Pumpspeicher (Turbinenleistung)	9,4	10,1	10,6	11,1	11,1	11,1	11,1
Batteriespeicher	0,3	6,6	17,9	27,3	30,7	30,8	30,8
Summe gesamt	219,5	267,1	429,9	601,1	719,6	728,9	730,9

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut; Daten für 2019: BNetzA 2022a, BMWK 2022

Tabelle 33 zeigt die projizierte Entwicklung der installierten Leistung im MWMS. Die Entwicklung des Ausbaus der erneuerbaren Energien ist analog zum MMS. Wie Tabelle 31 zeigt, beträgt der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch im MWMS trotz des höheren Bruttostromverbrauchs mit diesem Ausbaupfad 80 % im Jahr 2030, was den im EEG formulierten Zielen entspricht. Somit entspricht die gleiche Parametrisierung der erneuerbaren Energien in MMS und MWMS den im Instrumentenpapier definierten Rahmenbedingungen.

Tabelle 33: Installierte Nettonennleistung im MWMS, 2019-2050

Technologie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	GW						
Kernenergie	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	18,9	14,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	23,6	8,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gas (Erdgas, Grubengas)	28,8	28,4	30,0	25,8	19,8	14,5	10,5
Öl	3,5	2,7	2,5	2,3	2,2	2,1	2,1
Sonstige	4,3	4,4	3,2	2,6	2,4	2,1	2,1
<i>Gichtgas</i>	1,6	1,7	0,9	0,4	0,3	0,0	0,0
<i>Kokereigas</i>	0,3	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
<i>Raffineriegas</i>	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
<i>Sonstige Gase</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Abfall</i>	2,0	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Summe Kernbrennstoffe, Kohlen, Gas (Methan, Kuppelgase), Öl, Abfall	88,6	59,0	35,6	30,7	24,4	18,7	14,6
Windenergie an Land	52,8	65,7	106,1	147,1	159,9	160,0	160,0
Windenergie auf See	7,0	10,0	26,6	49,6	62,5	65,0	67,5

Technologie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Photovoltaik	47,0	97,4	201,8	302,5	393,3	400,1	400,1
Biomasse	8,9	10,8	11,3	7,3	5,2	4,0	2,8
<i>Biogas und Deponie-/Klärgas</i>	7,1	7,5	8,6	5,4	3,6	2,1	0,4
<i>Feste Biomasse</i>	1,6	3,1	2,7	1,8	1,6	1,9	2,4
<i>Pflanzenöl</i>	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lauf- und Speicherwasser	5,4	5,7	5,7	5,8	5,8	5,8	5,8
Geothermie	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
Summe Erneuerbare	121,1	189,7	351,5	512,4	627,0	635,2	636,5
Wasserstoff	0,0	0,0	7,9	13,2	17,7	19,6	20,6
Pumpspeicher (Turbinenleistung)	9,4	10,1	10,6	11,1	11,1	11,1	11,1
Batteriespeicher	0,3	27,9	56,0	84,0	111,9	141,0	141,0
Summe gesamt	219,5	286,7	461,6	651,4	792,0	825,6	823,8

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut; Daten für 2019: BNetzA 2022a, BMWK 2022

Zusätzlich zum MMS werden im MWMS die folgenden Instrumente bzw. Maßnahmen berücksichtigt:

- Der Kohleausstieg findet gemäß eines ambitionierteren Stilllegungspfades bereits vollständig bis Ende 2029 statt. In der Modellierung ergeben sich jedoch nur geringe Unterschiede zum MMS, da die hohen CO₂-Preise bereits im MMS die Kohlestromerzeugung im Jahr 2028 auf rund 25 TWh reduziert haben.
- Bei der Umstellung der Wärmenetze auf mehr erneuerbare Energien wird im MWMS angenommen, dass Erdgaskraftwerke nach einer Lebensdauer von 35 Jahren vom Netz gehen; dies betrifft auch Erdgas-KWK-Anlagen. Somit ist die installierte Leistung der Erdgaskraftwerke rückläufig und beträgt im Jahr 2050 noch rund 10 GW.
- Durch den ambitionierten Ausbau erneuerbarer Energien wird es zunehmend anspruchsvoller, diese in den Strommix zu integrieren. Im MMS wird erneuerbar generierter Strom in erheblichem Ausmaß abgeregelt, da es keine Maßnahmen zu einem ausreichenden Speicherausbau oder anderer entsprechender Flexibilität gibt. Im MWMS wird dagegen angenommen, dass als Teil des Ausbaus der erneuerbaren Energien, wie er in den Zielen des EEG formuliert ist, weitere Maßnahmen ergriffen werden, um das System zu flexibilisieren. Während andere Technologien auch mögliche Kandidaten sind, um diese Flexibilität zu liefern, wird im MWMS von einem höheren Ausbau von Batteriespeichern ausgegangen. Als konkrete Maßnahme sind dafür zum Beispiel Ausweitungen der bereits vorhandenen Innovationsausschreibungen im Rahmen des EEG denkbar, die den Bau von elektrischen Stromspeichern bereits jetzt fördern. Dementsprechend wird der ambitionierte Ausbaupfad für Heimspeicher und Großbatterien des Netzentwicklungsplans (Szenario B) zugrunde gelegt, was zu einer gesamten installierten Leistung von Batteriespeichern von rund 56 GW im Jahr 2030 und 141 GW im Jahr 2050 führt (BNetzA 2022b).

Die **Nettostromerzeugung** im MMS ist in Tabelle 34 bzw. in Abbildung 21 dargestellt. Entsprechend der dargestellten Entwicklung der installierten Leistung nimmt die Nettostromerzeugung

aus Photovoltaik, Wind onshore und Wind offshore stark zu. Insgesamt liegt damit der Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung im Jahr 2030 bei über 80 % und im Jahr 2050 bei über 90 % des Bruttostromverbrauchs (siehe Tabelle 31). Es ist zu beobachten, dass 2030 rund 96 TWh und auch nach 2040 noch jährlich mehr als 40 TWh Strom aus Erdgas generiert wird. Die Kohleverstromung ist allerdings stark rückläufig und wird ab 2028 durch eine Kombination von steigendem CO₂-Preis und moderat sinkenden Erdgaspreisen aus dem Markt gedrängt und trägt ab 2033 gar nicht mehr zur Stromerzeugung bei. Deutschland bleibt Netto-Stromexporteur.

Tabelle 34: Nettostromerzeugung im MMS, 2019-2050

Technologie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	TWh						
Kernenergie	71,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	105,7	84,3	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	51,9	36,4	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas und Grubengas	84,4	107,4	95,7	66,6	40,5	45,9	47,4
Öl	3,5	7,9	1,3	1,1	0,4	0,4	0,3
Sonstige	17,6	16,7	11,4	8,7	7,8	6,3	6,3
<i>Gichtgas</i>	6,5	6,9	3,4	1,6	1,0	0,0	0,0
<i>Kokereigas</i>	2,5	2,7	1,3	0,6	0,4	0,0	0,0
<i>Raffineriegas</i>	0,7	0,7	0,6	0,5	0,3	0,3	0,2
<i>Sonstige Gase</i>	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
<i>Fossiler Anteil des Abfalls</i>	6,2	4,8	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Summe fossile Brennstoffe & Kernenergie	334,2	252,6	110,0	76,4	48,7	52,7	54,0
Windenergie an Land	99,2	123,4	209,5	282,3	309,8	317,3	325,7
Windenergie auf See	24,4	34,6	78,1	117,9	155,5	157,1	162,0
Photovoltaik	43,5	90,5	194,6	291,1	377,7	390,6	394,1
Biomasse	45,4	50,3	45,0	32,1	24,2	21,7	21,4
<i>Biogas und Deponie-/Klärgas</i>	31,5	24,4	22,7	15,0	8,1	4,0	1,6
<i>Feste Biomasse, biogener Anteil des Abfalls</i>	13,6	25,6	22,4	17,1	16,1	17,7	19,9
<i>Pflanzenöl</i>	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lauf- und Speicherwasser	19,6	19,8	20,0	20,3	20,6	20,9	21,2
Geothermie	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8
Summe Erneuerbare Energien	232,2	318,9	547,7	744,3	888,5	908,3	925,3
Wasserstoff	0,0	0,0	1,5	5,4	4,1	4,9	7,6

Technologie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Pumpspeicher	4,2	4,7	16,9	20,3	20,1	20,5	20,3
Batterien	0,0	2,2	8,2	13,0	14,3	14,4	14,4
Nettostromerzeugung inkl. Erzeugung aus Wasserstoff und Speichern	570,6	578,5	684,3	859,4	975,7	1000,9	1021,7
Stromhandelssaldo*	-31,4	-24,0	-41,3	-88,5	-65,0	-47,2	-34,2

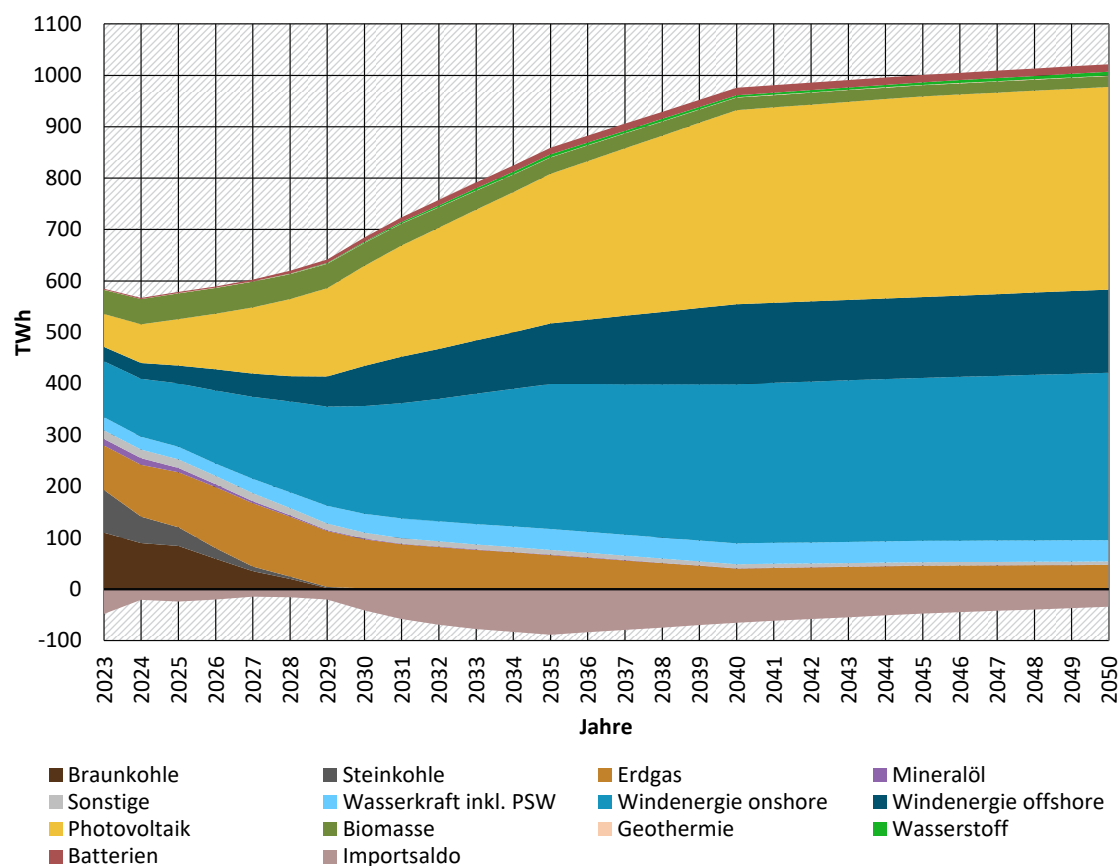
Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut; Daten für 2019: AGEB 2022, BMWK 2022

Anmerkungen:

* Ein positives Vorzeichen zeigt Netto-Importe, ein negatives Vorzeichen Netto-Exporte an.

Werte auf eine Dezimalstelle gerundet.

Abbildung 21: Nettostromerzeugung im MMS, 2023-2050



Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut; Daten für 2019: AGEB 2022, BMWK 2022

Die Struktur der Stromerzeugung im MWMS (s. Tabelle 35 bzw. Abbildung 22) ist vergleichbar zu der des MMS. Wesentliche Unterschiede ergeben sich aus der erhöhten Stromnachfrage im MWMS, der größeren installierten Leistung von Batteriespeichern sowie dem leichten Rückbau von Erdgaskraftwerken. Diese Faktoren führen zu einer verbesserten Integration erneuerbar generierten Stroms, sodass deutlich weniger Abregelung stattfindet als im MMS, was in der höheren Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im MWMS – bei gleicher Leistung wie im MMS – sichtbar wird. Damit geht einher, dass Batteriespeicher bereits im Jahr 2030 knapp 28 TWh Strom produzieren. Dennoch ist der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch aufgrund der höheren Stromnachfrage mit 80 % im Jahr 2030 geringer als im MMS, wo es 85 % sind.

Tabelle 35: Nettostromerzeugung im MWMS, 2019-2050

Technologie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	TWh						
Kernenergie	71,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	105,7	85,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	51,9	37,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas und Grubengas	84,4	103,4	95,4	51,4	31,6	31,7	30,1
Öl	3,5	7,9	1,2	0,5	0,3	0,5	0,5
Sonstige	17,6	16,7	11,4	8,7	7,8	6,3	6,2
<i>Gichtgas</i>	6,5	6,9	3,4	1,6	1,0	0,0	0,0
<i>Kokereigas</i>	2,5	2,7	1,3	0,6	0,4	0,0	0,0
<i>Raffineriegas</i>	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2
<i>Sonstige Gase</i>	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
<i>Fossiler Anteil des Abfalls</i>	6,2	4,8	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Summe fossile Brennstoffe & Kernenergie	334,2	250,2	108,0	60,6	39,7	38,5	36,8
Windenergie an Land	99,2	123,4	211,6	299,7	326,0	337,2	346,4
Windenergie auf See	24,4	34,6	84,5	144,5	176,0	185,8	195,7
Photovoltaik	43,5	90,5	194,9	296,0	387,8	399,4	400,1
Biomasse	45,4	52,3	46,7	33,7	25,5	23,9	24,8
<i>Biogas und Deponie-/Klärgas</i>	31,5	25,3	22,7	15,0	8,1	4,0	1,6
<i>Feste Biomasse, biogener Anteil des Abfalls</i>	13,6	26,6	24,1	18,7	17,5	19,9	23,2
<i>Pflanzenöl</i>	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lauf- und Speicherwasser	19,6	19,8	20,0	20,3	20,6	20,9	21,2
Geothermie	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8
Summe Erneuerbare Energien	232,2	320,9	558,2	794,7	936,6	968,0	989,0
Wasserstoff	0,0	0,0	1,3	3,0	5,3	5,2	14,1
Pumpspeicher	4,2	3,2	12,4	17,5	17,1	16,5	15,4
Batterien	0,0	8,9	27,8	44,2	58,9	71,9	69,9
Nettostromerzeugung inkl. Erzeugung aus Wasserstoff und Speichern	570,6	583,2	707,6	920,1	1057,6	1100,0	1125,2
Stromhandelssaldo*	-31,4	-25,1	-13,3	-57,2	-52,3	-19,4	1,8

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut; Daten für 2019: AGEB 2022, BMWK 2022

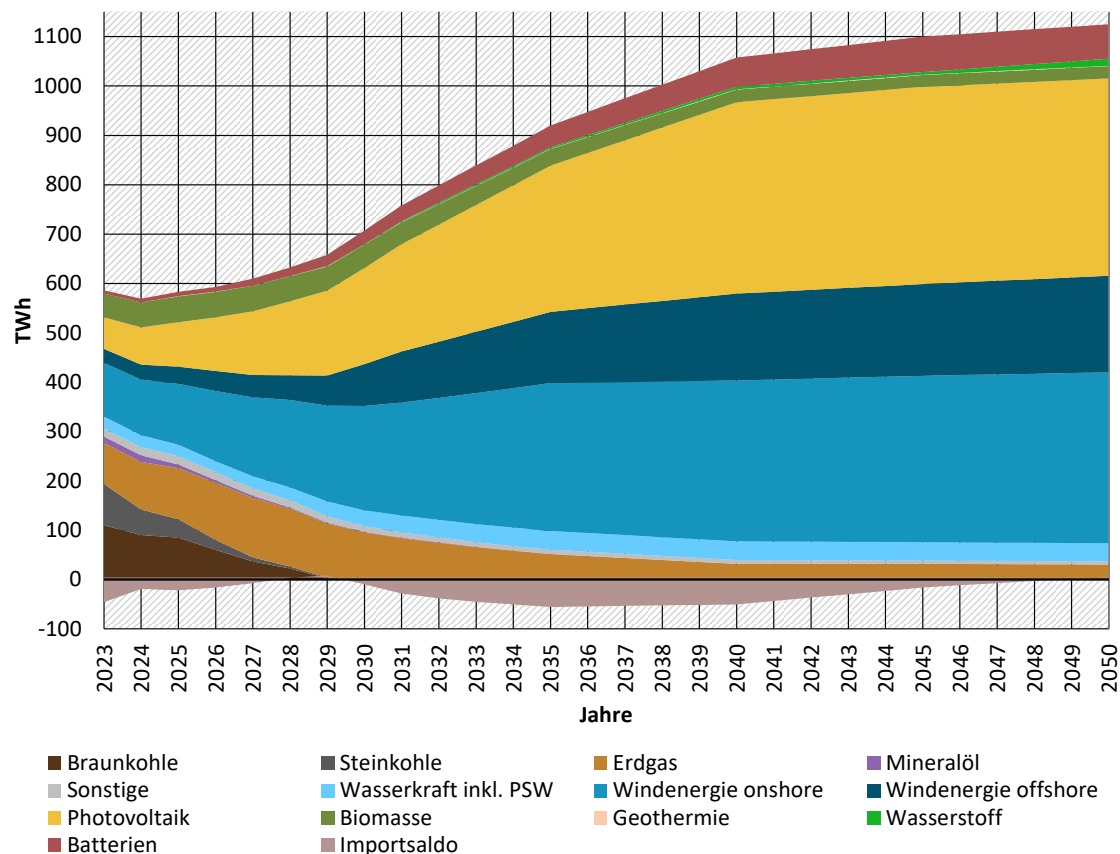
Anmerkungen:

* Ein positives Vorzeichen zeigt Netto-Importe, ein negatives Vorzeichen Netto-Exporte an.

Werte auf eine Dezimalstelle gerundet.

Am Ende des betrachteten Zeitraums im Jahr 2050 werden mit 30 TWh etwa 17 TWh weniger Strom aus Erdgas (inkl. Grubengas) produziert als im MMS. Bezüglich der Import-Export-Bilanz ist zu bemerken, dass sie im MWMS stärkeren Schwankungen unterliegt als im MMS und im Jahr 2050 in etwa ausgeglichen ist. Die erhöhte Nachfrage im MWMS kann zu großen Teilen mit Hilfe erneuerbarer Energien gedeckt werden. Im Jahr 2050 können hauptsächlich durch den vermehrten Einsatz der Batterien über 60 TWh erneuerbaren Stroms mehr in den Strommix integriert werden als im MMS.

Abbildung 22: Nettostromerzeugung im MWMS, 2023-2050



Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut; Daten für 2019: AGE 2022, BMWK 2022

Zudem werden knapp 14 TWh Strom in **Wasserstoffkraftwerken** erzeugt, dies sind 6,5 TWh mehr als im MMS. Um zu verstehen, ob es sich um inländisch produzierten oder importierten Wasserstoff handelt und wie der Betrieb der Elektrolyseure zur Integration Erneuerbarer beiträgt, ist es interessant, die Strom- und Stoffströme des Wasserstoffs genauer zu betrachten: In ist für das MMS die installierte Leistung der Elektrolyseure, die zur Erzeugung von Wasserstoff genutzt werden, aufgeführt zusammen mit der Produktion, dem Import von Wasserstoff und der Stromerzeugung in Wasserstoffkraftwerken. stellt dies für das MWMS dar.

Tabelle 36: Elektrolyseurleistung, Wasserstoffproduktion und -importe sowie Stromproduktion in Wasserstoffkraftwerken im MMS, 2025-2050

MMS	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Elektrolyseurleistung für H ₂ -Produktion [GW]	2,9	4,3	6,8	9,3	11,8	14,3
H ₂ -Produktion [TWh]	1,8	11,7	27,4	36,0	43,1	50,2
<i>H₂-Produktion für Endverbraucher [TWh]</i>	<i>1,8</i>	<i>11,3</i>	<i>19,2</i>	<i>26,8</i>	<i>34,3</i>	<i>41,8</i>
<i>H₂-Produktion für Kraftwerke [TWh]</i>	<i>0,0</i>	<i>0,4</i>	<i>8,3</i>	<i>9,2</i>	<i>8,8</i>	<i>8,4</i>
H ₂ -Import für Kraftwerke [TWh]	0,0	3,1	4,7	0,0	2,1	7,9
Stromproduktion [TWh]	0,0	1,5	5,4	4,1	4,9	7,6

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Leistung der Elektrolyseure hier ohne den Anteil für PtL

Der Großteil des in Elektrolyseuren hergestellten Wasserstoffs wird zur Bedienung der Nachfrage aus den Endverbrauchssektoren verwendet, wobei der größte Anteil der Nachfrage aus der Industrie stammt. Ab 2035 werden jährlich rund 8 bis 9 TWh Wasserstoff zur Rückverstromung erzeugt. Die Produktion von Wasserstoff zur Rückverstromung ist maximal im Jahr 2040, wenn auch der Anteil der Erneuerbaren an der Stromerzeugung maximal ist. In diesem Jahr wird kein Wasserstoff zur Verstromung importiert. Die Importquote liegt deutlich unter der inländischen Produktion, lediglich im Jahr 2050 wird beinahe so viel Wasserstoff für den Einsatz in Kraftwerken importiert wie inländisch hergestellt wird.

Tabelle 37: Elektrolyseurleistung, Wasserstoffproduktion und -importe sowie Stromproduktion in Wasserstoffkraftwerken im MWMS, 2025-2050

MWMS	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Elektrolyseurleistung für H ₂ -Produktion [GW]	2,9	9,3	14,3	19,3	24,3	29,3
H ₂ -Produktion [TWh]	1,9	25,8	48,9	68,8	81,4	94,7
<i>H₂-Produktion für Endverbraucher [TWh]</i>	<i>1,9</i>	<i>25,8</i>	<i>41,7</i>	<i>56,8</i>	<i>71,8</i>	<i>86,9</i>
<i>H₂-Produktion für Kraftwerke [TWh]</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>7,2</i>	<i>12,0</i>	<i>9,5</i>	<i>7,8</i>
H ₂ -Import für Kraftwerke [TWh]	0,0	3,0	0,0	0,0	1,9	23,7
Stromproduktion [TWh]	0,0	1,3	3,0	5,3	5,2	14,1

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

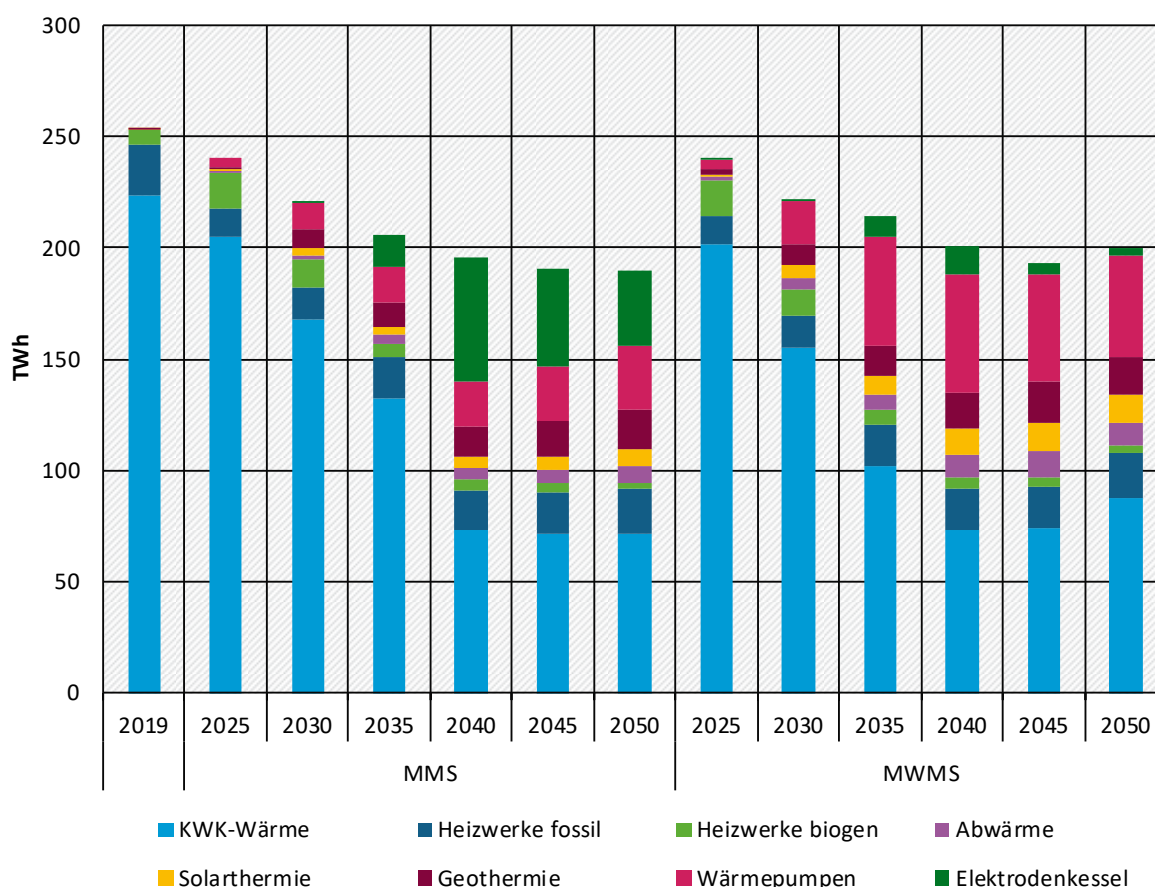
Anmerkung: Leistung der Elektrolyseure hier ohne den Anteil für PtL

Die installierte Leistung der Elektrolyseure im MWMS ist ab 2030 rund doppelt so hoch wie im MMS und auch die inländische Wasserstoffproduktion ist rund doppelt so hoch. Es ist zu beobachten, dass auch im MWMS im Jahr 2040 nur maximal 12 TWh Wasserstoff zur Rückverstromung erzeugt werden. Wie im MMS, wird in den Jahren mit dem höchsten Anteil Erneuerbarer in der Stromerzeugung kein Wasserstoff zur Verstromung importiert, da die inländische Produktion den Bedarf decken kann. Im MWMS wird im Jahr 2050 weit mehr Wasserstoff importiert als im MMS und in den früheren Jahren deutlich weniger. Der erhöhte Einsatz von Wasserstoff liegt

einerseits an der erhöhten Nachfrage nach Strom und Wärme sowie dem Wegfall von Erdgaskapazitäten im MWMS, so ist die Stromerzeugung aus Wasserstoff im MWMS im Jahr 2050 in etwa doppelt so hoch wie im MMS.

Neben der Stromnachfrage ist auch eine **Wärmenachfrage** zu decken, die in Abbildung 23 für das MMS und das MWMS dargestellt ist. Die netzgebundene Wärme²⁸ wurde im Jahr 2019 hauptsächlich in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugt. Daneben gab es noch einen kleinen Anteil ungekoppelter Wärmeerzeugung, vor allem in fossil befeuerten Heizwerken, biogen befeuerten Heizwerken sowie Geothermieranlagen. In beiden Szenarien ist die Nachfrage nach netzgebundener Wärme bis 2045 rückläufig, wobei der Rückgang im MMS dabei stärker ist als im MWMS. Da über die projizierten Jahre die Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen stark rückläufig ist, wird die Wärme durch erneuerbare Wärmequellen (Umweltwärme mittels Wärmepumpen, Solarthermie und Geothermie) sowie durch zunehmen direkt Strom-Wärme-Umwandlung („Power-to-Heat“) in Elektrodenkesseln ersetzt. Im MMS geschieht dies im erheblichen Maß durch Elektrodenkessel, im MWMS hingegen ist der Beitrag von Wärmepumpen und Solarthermie in allen projizierten Jahren deutlich höher als im MMS.

Abbildung 23: Bereitstellung netzgebundener Wärme (einschließlich Industrie-KWK und BHKW) in MMS und MWMS, 2019-2050



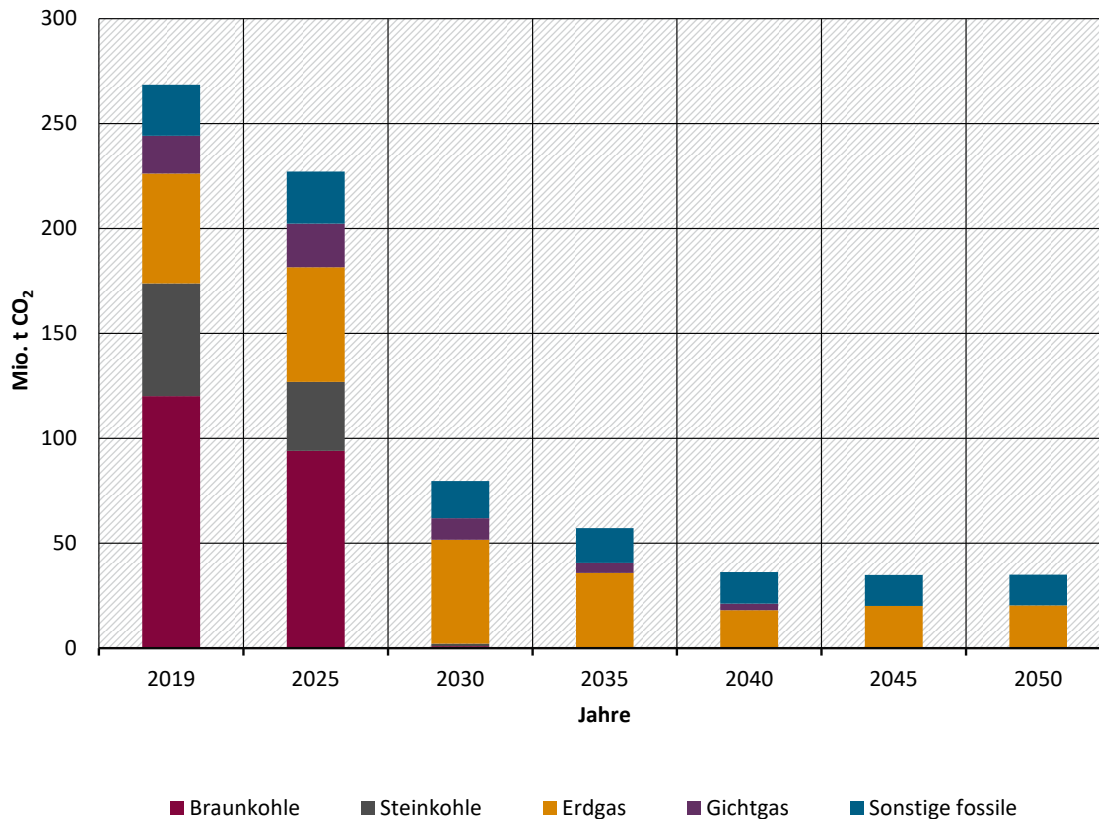
Quelle: Modellierung Öko-Institut

Bereits im MMS sinken die **CO₂-Emissionen** der Kraftwerke (Abbildung 24 und Tabelle 38) bedingt durch den - marktgetriebenen - Kohleausstieg sehr stark, wobei die mit Abstand größte Emissionsminderung zwischen 2025 und 2030 bei den Braun- und Steinkohlekraftwerken der

²⁸ Umfasst hier auch BHKW und Industrie-KWK, deckt also sowohl Fernwärme als auch industrielle Wärmenetze ab.

Energiewirtschaft geschieht. Zwischen 2030 und 2040 halbieren sich die CO₂-Emissionen der Kraftwerke noch einmal. Dieser Emissionsrückgang ist auf zwei wesentliche Gründe zurückzuführen: Nach dem Kohleausstieg verdrängen zusätzliche erneuerbare Energien vor allem Erdgas. Zudem führt die Umstellung der Stahlherstellung in der Industrie von der Hochofenroute zur Direktreduktion dazu, dass deutlich weniger Gichtgas entsteht und in Industriekraftwerken verstromt wird. Zwischen 2040 und 2050 bleiben die CO₂-Emissionen der Kraftwerke relativ konstant und werden jeweils zum größten Teil durch Erdgas und darüber hinaus durch sonstige fossile Brennstoffe (Abfall, Mineralöl, Sondergase) verursacht.

Abbildung 24: CO₂-Emissionen der Kraftwerke nach Energieträgern im MMS, 2019-2050



Quelle: (UBA 2022a), Modellrechnungen Öko-Institut

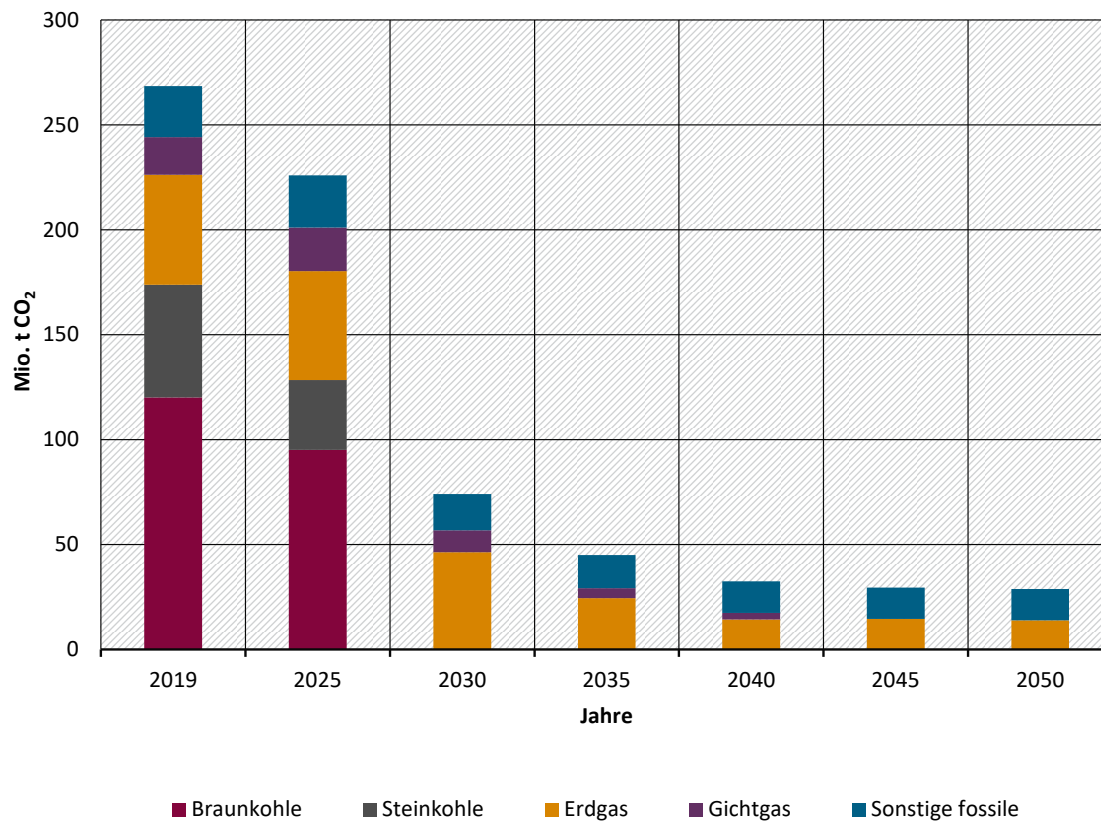
Tabelle 38: Aufteilung der CO₂-Emissionen der Kraftwerke auf Energiewirtschaft und Industrie im MMS in Mio. t CO₂-Äq., 2019 bis 2050

	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Kraftwerke der Energiewirtschaft	213,6	177,2	49,3	36,8	21,8	25,6	28,0
Braunkohle	117,5	92,1	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	49,6	29,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas	30,9	38,4	36,7	26,3	12,7	16,9	19,5
Sonstige fossile	15,6	17,1	11,5	10,5	9,0	8,8	8,5
Industriekraftwerke	54,9	49,9	30,3	20,4	14,5	9,3	7,0

	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Braunkohle	2,6	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	4,2	3,1	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas	21,4	16,3	12,8	9,5	5,3	3,3	0,9
Gichtgas	18,0	20,7	10,3	4,8	3,1	0,0	0,0
Sonstige fossile	8,7	7,8	6,2	6,0	6,1	6,0	6,1
Summe Energiewirtschaft + Industrie	268,5	227,2	79,6	57,1	36,3	34,9	35,0
Braunkohle	120,0	94,1	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	53,8	32,8	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas	52,4	54,7	49,5	35,8	18,1	20,1	20,4
Gichtgas	18,0	20,7	10,3	4,8	3,1	0,0	0,0
Sonstige fossile	24,4	24,9	17,7	16,5	15,1	14,8	14,6
<i>Rauchgasentschwefelung (REA)</i>	<i>0,8</i>	<i>0,6</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>
Kraftwerke der Energiewirtschaft und Industrie inkl. REA	269,3	227,8	79,6	57,1	36,3	34,9	35,0

Quelle: (UBA 2022a), Modellrechnungen Öko-Institut

Die Tabelle 38 zeigt außerdem, wie sich die CO₂-Emissionen der Kraftwerke im MMS auf die beiden Sektoren Energiewirtschaft und Industrie aufteilen. Der Anteil der Industriekraftwerke an den Gesamtemissionen der Kraftwerke betrug im Jahr 2019 20 % und steigt bis 2040 auf etwa 40 % an. Bis 2050 geht der Anteil der CO₂-Emissionen der Industriekraftwerke wieder auf 20 % zurück. Die Emissionen der Kraftwerke der Energiewirtschaft werden in Kapitel 4 (Sektor Energiewirtschaft) berichtet und die Emissionen der Industriekraftwerke in Kapitel 5 (Sektor Industrie). Die Aufteilung der CO₂-Emissionen der Kraftwerke im MWMS ist in Tabelle 39 dargestellt.

Abbildung 25: CO₂-Emissionen der Kraftwerke nach Energieträgern im MWMS, 2019-2050

Quelle: (UBA 2022a), Modellrechnungen Öko-Institut

Tabelle 39: Aufteilung der CO₂-Emissionen der Kraftwerke auf Energiewirtschaft und Industrie im MWMS in Mio. t CO₂-Äq., 2019 bis 2050

Tabellenkopf	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Kraftwerke der Energiewirtschaft	213,6	178,0	47,9	28,5	20,7	22,9	25,2
Braunkohle	117,5	93,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	49,6	30,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas	30,9	36,8	35,7	17,2	9,6	11,6	13,8
Sonstige fossile	15,6	17,5	12,2	11,2	11,1	11,3	11,4
Industriekraftwerke	54,9	47,9	26,2	16,5	11,8	6,5	3,6
Braunkohle	2,6	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	4,2	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas	21,4	15,1	10,7	7,2	4,7	2,9	0,0
Gichtgas	18,0	20,7	10,3	4,8	3,1	0,0	0,0
Sonstige fossile	8,7	7,3	5,2	4,5	4,1	3,7	3,5
Summe Energiewirtschaft + Industrie	268,5	225,9	74,1	45,0	32,5	29,5	28,7

Tabellenkopf	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Braunkohle	120,0	95,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	53,8	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas	52,4	51,9	46,4	24,4	14,3	14,5	13,8
Gichtgas	18,0	20,7	10,3	4,8	3,1	0,0	0,0
Sonstige fossile	24,4	24,8	17,4	15,8	15,1	15,0	14,9
<i>Rauchgasentschwefelung (REA)</i>	<i>0,8</i>	<i>0,6</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>
Kraftwerke der Energiewirtschaft und Industrie inkl. REA	269,3	226,5	74,1	45,0	32,5	29,5	28,7

Quelle: (UBA 2022a), Modellrechnungen Öko-Institut

Die Entwicklung der CO₂-Emissionen der Kraftwerke im MWMS (Abbildung 25 und Tabelle 39) ist strukturell sehr ähnlich zum MMS. Der Vergleich der Szenarien in Tabelle 40 zeigt, dass die Minderung der Treibhausgasemissionen der Kraftwerke in allen Szenarien im MWMS größer ist als im MMS. Die Treibhausgasemissionen liegen im Jahr 2030 im MMS um 82 % niedriger als im Vergleichsjahr 1990, im MWMS ist die Emissionsminderung um gut ein Prozentpunkt höher. Im Jahr 2050 erreichen die Kraftwerke im MMS eine Emissionsminderung von gut 92 % gegenüber 1990, im MWMS wiederum um gut einen Prozentpunkt höher. Der größte Unterschied zwischen beiden Szenarien ist im Jahr 2035 zu verzeichnen, in dem die Emissionen im MWMS um gut 12 Mio. t CO₂-Äq. niedriger liegen als im MMS.

Tabelle 40: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Kraftwerke zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.									
Entwicklung 1990-2019	458,9	386,0	274,0						
MMS				232,0	82,6	59,3	37,6	36,2	36,3
MWMS				230,7	77,0	46,8	33,8	30,6	29,9
Veränderung ab 1990 in %									
Entwicklung 1990-2019		-15,9	-40,3						
MMS				-49,5	-82,0	-87,1	-91,8	-92,1	-92,1
MWMS				-49,7	-83,2	-89,8	-92,6	-93,3	-93,5
Veränderung ab 2005 in %									
Entwicklung 2005-2019			-29,0						
MMS				-39,9	-78,6	-84,6	-90,3	-90,6	-90,6
MWMS				-40,2	-80,0	-87,9	-91,3	-92,1	-92,3

Quelle: (UBA 2022a), 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.

4 Energiewirtschaft

Der Sektor Energiewirtschaft umfasst im Bundes-Klimaschutzgesetz alle Emissionen, die bei der Bereitstellung von Energieträgern zur Nutzung in anderen Sektoren entstehen. Dies umfasst die öffentliche Strom- und Fernwärmeerzeugung (CRF-Quellgruppe 1.A.1.a), Raffinerien (CRF 1.A.1b), Herstellung von festen Brennstoffen wie z.B. Koks und weitere Anlagen (CRF 1.A.1.c) und Verdichterstationen im Erdgastransportnetz (CRF 1.A.3.e). Die Energiewirtschaft umfasst auch flüchtige („diffuse“) Emissionen, die bei der Nutzung von Brennstoffen entstehen (CRF 1.B).

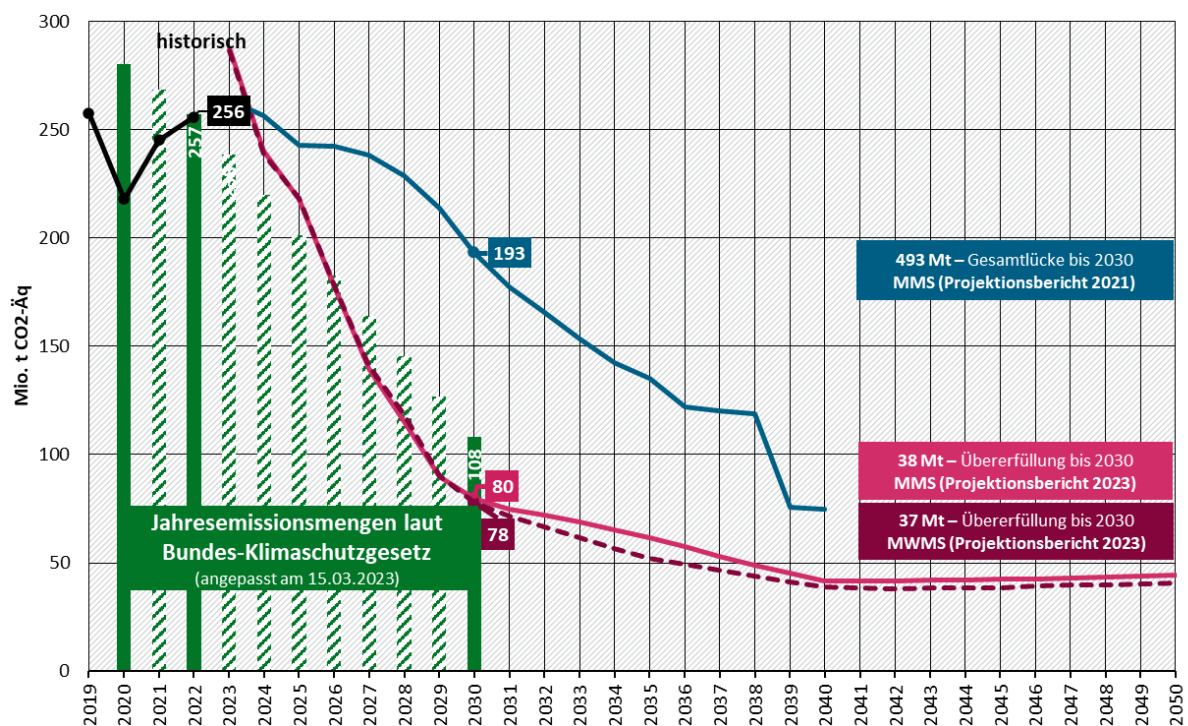
Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

Einzelne Textteile wurden Repenning et al. (2021) entnommen und aktualisiert.

4.1 Zentrale Ergebnisse

Die Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft sinken sowohl im MMS als auch im MWMS sehr stark ab (Abbildung 26), wobei sich die beiden Szenarien in diesem Zeitraum kaum unterscheiden. Im Jahr 2030 verbleiben Emissionen in Höhe von 80 Mio. t CO₂-Äq. im MMS und 76 Mio. t CO₂-Äq. im MWMS. Das im KSG festgelegte Sektorziel für das Jahr 2030 in Höhe von 108,1 Mio. t CO₂-Äq.²⁹ wird somit deutlich übererfüllt.

Abbildung 26: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft



Anmerkungen: Die dargestellten Emissionsdaten basieren auf dem Datenstand 2023, modelliert wurde mit dem Datenstand 2022. Für die Jahre ab 2023 wurden die vom UBA nach § 4 Abs. 3 angepassten JEM dargestellt. Für die Jahre ohne festgelegte JEM (schraffiert) wurden Zwischenziele interpoliert. Aufgrund teilweise unterschiedlicher Rahmendaten und Parametrisierung der Instrumente sind die Projektionsberichte nicht vollständig konsistent.

Quelle: (UBA 2023b), Modellierung: Öko-Institut

²⁹ Angepasst entsprechend dem Mechanismus des § 4 Abs. 3 KSG

Für den Zeitraum 2023 bis 2030 ergibt sich eine Übererfüllung des angestrebten Pfades³⁰ von 38 Mio. t CO₂-Äq. im MMS und 37 Mio. t CO₂-Äq. im MWMS. Zwischen 2030 und 2040 sinken die Emissionen der Energiewirtschaft deutlich langsamer, und nach 2040 steigen diese sogar wieder leicht an, wobei im gesamten Zeitraum 2030 bis 2050 die Emissionen im MWMS niedriger liegen als im MMS.

Die Emissionen der Energiewirtschaft werden von den Kraftwerken und Heizwerken der öffentlichen Strom- und Wärmeversorgung dominiert (Tabelle 41 und Tabelle 42). Diese sinken von allen Emissionsquellen absolut gesehen zwischen 2019 und 2040 am stärksten, sind aber zwischen 2040 und 2050 für einen kleinen Emissionsanstieg verantwortlich, da in diesem Zeitraum der Stromverbrauch stärker als die erneuerbare Stromerzeugung wächst. Eine detailliertere Beschreibung der Strom- und Wärmeerzeugung findet sich in Abschnitt 3.8, für die Methodik bezüglich der übrigen Energiewirtschaft vergleiche Anhang A.4.1.

Die Mineralölraffinerien (einschließlich Raffineriekraftwerken) waren 2019 die zweitgrößte Emissionsquelle innerhalb der Energiewirtschaft. Vor allem aufgrund rückläufiger Nachfragen nach Mineralölprodukten sinken in den Raffinerien die Emissionen bis 2050 um etwa vier Fünftel. Die Umstellung des von Raffinerien benötigten Wasserstoffs von Dampfreformierung auf Elektrolyse trägt im Vergleich dazu nur zu einem kleinen Teil zur Emissionsreduktion bei.

Die Emissionen aus der Herstellung von festen Brennstoffen (wie z.B. Koks) und sonstigen Energieerzeugern in der Energiewirtschaft ist stark rückläufig und 2050 sind in beiden Szenarien nur noch minimale Emissionen zu verzeichnen. Nur einen kleinen Beitrag zu den Emissionen haben Verdichterstationen im Gasnetz. Die diffusen Emissionen aus Brennstoffen sinken im Vergleich zu den übrigen Teilen der Energiewirtschaft deutlich langsamer, so dass ihr relativer Anteil im Szenarienvorlauf stark zunimmt. Dies liegt daran, dass zwar der Erdgasverbrauch deutlich zurückgeht, die Emissionen aber nicht wesentlich vom Erdgasverbrauch, sondern hauptsächlich vom Umfang der vorgehaltenen Erdgasinfrastruktur abhängt (es gibt keine Maßnahme, die einen entsprechenden Rückbau der Erdgasinfrastruktur berücksichtigt, die den Großteil der diffusen Emissionen verursacht).

Tabelle 41: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.							
Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	218,9	180,1	52,6	41,7	26,8	31,1	33,9
Mineralölraffinerien	21,9	20,4	15,4	11,4	7,8	5,6	4,5
Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger	9,8	9,1	4,4	1,9	1,0	0,1	0,0
Erdgasverdichterstationen	1,2	1,0	0,9	0,7	0,5	0,5	0,6
Diffuse Emissionen	7,7	7,1	6,5	6,0	5,5	5,3	5,4
Gesamt	259,5	217,6	79,9	61,6	41,6	42,6	44,4

³⁰ § 4 Abs. 1 des KSG erfordert Folgendes: „Im Sektor Energiewirtschaft sinken die Treibhausgasemissionen zwischen den angegebenen Jahresemissionsmengen möglichst stetig.“ Dies lässt sich als lineare Pfad zwischen 2022 und 2030 interpretieren.

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021			108,1				
Abweichung vom Sektorziel			-28,2				

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Tabelle 42: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.							
Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung	218,9	181,0	52,0	33,9	26,2	28,7	31,6
Mineralölraffinerien	21,9	20,2	14,7	10,1	6,1	4,4	3,6
Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger	9,8	9,0	4,1	1,9	1,0	0,1	0,0
Erdgasverdichterstationen	1,2	1,0	0,8	0,5	0,3	0,3	0,3
Diffuse Emissionen	7,7	7,0	6,4	5,8	5,3	5,1	5,1
Gesamt	259,5	218,2	78,0	52,1	39,0	38,6	40,7
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021			108,1				
Abweichung vom Sektorziel			-30,1				

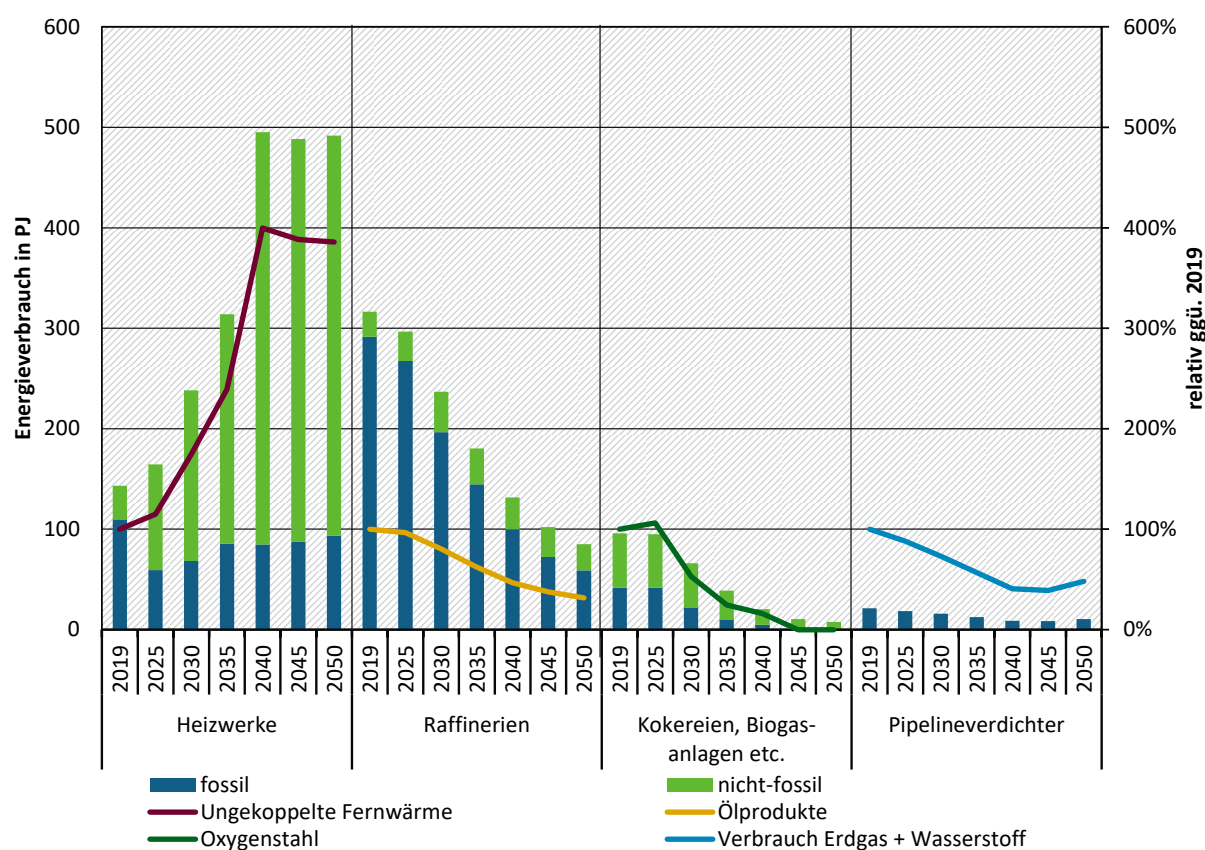
Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Neben den Kraftwerken gibt es in der Energiewirtschaft weitere Anlagen („übrige Energiewirtschaft“). Dies sind insbesondere:

- ▶ Öffentliche Heizwerke erzeugen den Teil der Fernwärme, der nicht in Kraftwerken in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bereitgestellt wird.
- ▶ In Raffinerien wird Rohöl zu Mineralölproduktion wie beispielsweise Heizöl, Benzin und Dieselkraftstoff weiterverarbeitet, wozu neben Raffineriekraftwerken weitere Wärmeerzeuger benötigt werden.
- ▶ Übrige Umwandlungsanlagen der Energiewirtschaft: dies umfasst unter anderem Kokereien zur Herstellung des insbesondere in der Stahlproduktion benötigten Kokes sowie den Anteil des Energieeinsatzes von Biogasanlagen, der zur Fermenterbeheizung gebraucht wird.
- ▶ Verdichterstationen erzeugen den benötigten Druck, um Gas über das Gasnetz zu transportieren.

Abbildung 27 stellt für das MMS die zeitliche Entwicklung der Energieverbräuche dieser Anlagen³¹ zusammen mit jeweils wichtigen Treibergrößen dar.

³¹ Jeweils ohne die bei den Anlagen befindlichen Kraftwerke.

Abbildung 27: Entwicklung des Energieverbrauchs in Anlagen der übrigen Energiewirtschaft im MMS

Quelle: (UBA 2022a), (AGEB 2008-2022a; 2008-2022b) Modellierung: Öko-Institut

Der in Abschnitt 3.8 beschriebene starke Rückgang der Wärmeerzeugung aus KWK-Kraftwerken, geht mit einer Vervielfachung der nicht in KWK erzeugten („ungekoppelten“) Fernwärme bis zum Jahr 2040 einher. Der deutliche Ausbau der erneuerbaren Fernwärme durch Solarthermie, Wärmepumpen und Geothermie sowie die Direktumwandlung von Strom in Fernwärme („Power-to-Heat“) führt dazu, dass der fossile und somit emissionsintensive Energieverbrauch der konventionellen Heizwerke in allen Szenarijahren niedriger liegt als im Basisjahr 2019.

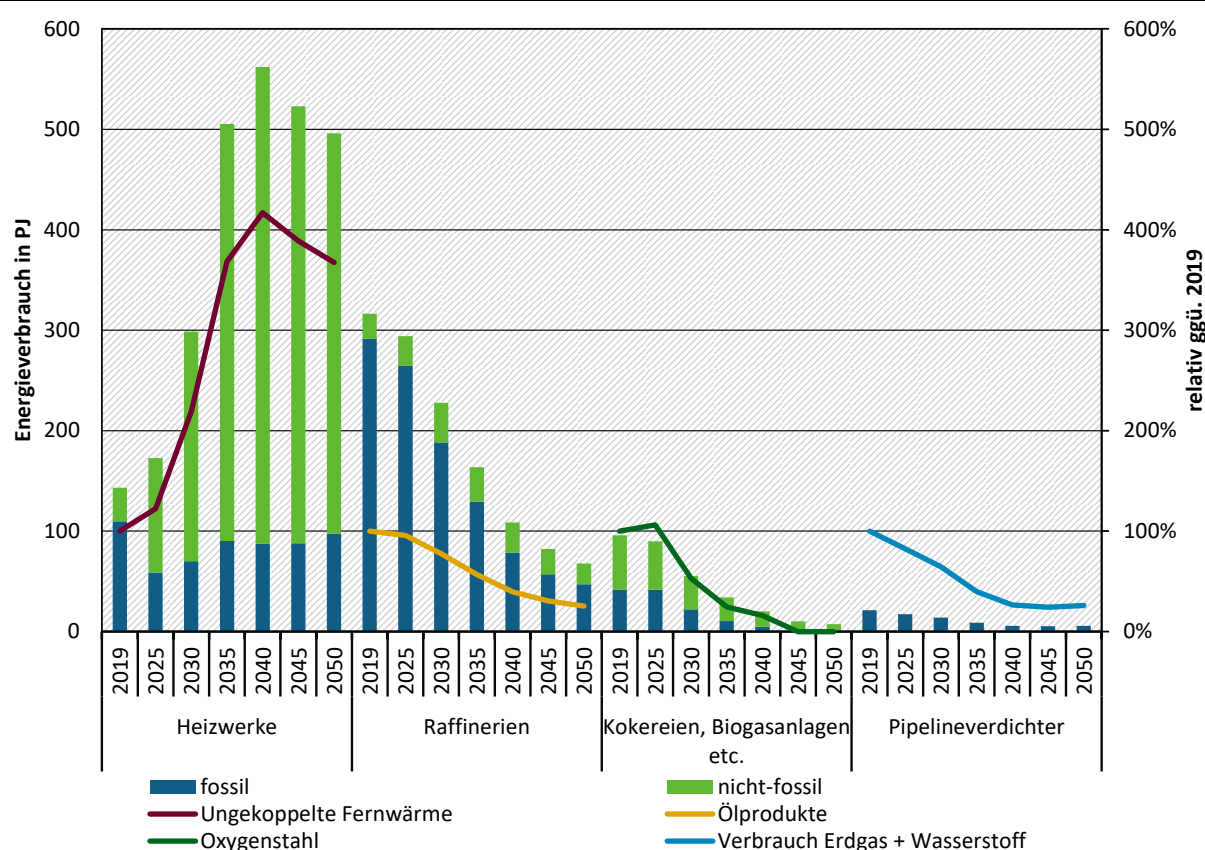
Die Raffinerien hatten von allen Anlagen im Basisjahr 2019 den größten Energieverbrauch von allen Anlagen der übrigen Energiewirtschaft. Der Energieverbrauch der Raffinerien sinkt im Zeitverlauf deutlich, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass die Maßnahmen in den Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie die Verbräuche von Mineralölprodukten reduzieren. Bis 2030 sinkt die Nachfrage nach Ölprodukten um 20 % und bis 2050 um 65 %, jeweils gegenüber dem Basisjahr 2019. Bisher wird in Raffinerien der dort benötigte Wasserstoff vor allem per Dampfreformierung aus fossilen Energieträgern gewonnen. Im MMS wird die Wasserstoffherstellung teilweise auf Elektrolyse umgestellt. Dadurch sinkt der Anteil fossiler Energieträger am Energieverbrauch der Raffinerien.

Die Umstellung der Stahlherstellung von der Hochofenroute auf alternative Herstellungsprozesse in der Industrie führt dazu, dass die Koksproduktion stark zurückgeht und ab 2045 überhaupt nicht mehr stattfindet. Ebenso führt das langsame Auslaufen von Biogasanlagen dazu, dass auch der entsprechende bei den übrigen Umwandlungsanlagen bilanzierte Anteil stark rückläufig ist.

Der Erdgasverbrauch ist im MMS bis 2040 rückläufig, was dazu führt, dass der Energieverbrauch der Verdichterstationen entsprechend ebenfalls zurückgeht. Nach 2040 steigt der Verbrauch von Gasen (Summe Erdgas und Wasserstoff) wieder an, was dazu führt, dass der Einsatz der Verdichterstationen wieder ansteigt.

Im MWMS zeigt sich insgesamt ein ähnliches Bild (Abbildung 28), im Detail ergeben sich aber wichtige Unterschiede.

Abbildung 28: Entwicklung des Energieverbrauchs in Anlagen der übrigen Energiewirtschaft im MWMS



Quelle: (UBA 2022a), (AGEB 2008-2022a; 2008-2022b) Modellierung: Öko-Institut

Wie in Abschnitt 3.8 detailliert erläutert, steigt der Bedarf nach ungekoppelter Fernwärme und damit die Aktivität der öffentlichen Heizwerke schneller an als im MMS: Die Nachfrage 2035 ist im MWMS bereits ähnlich hoch wie im Jahr 2040 des MMS und das Maximum im Jahr 2040 liegt im MWMS höher als im MMS. Der größere Bedarf nach ungekoppelter Fernwärme wird größtenteils durch erneuerbare Energieträger und Strom gedeckt, aber auch der Einsatz von fossilen Energieträgern in öffentlichen Heizwerken ist etwas höher als im MMS.

Die Nachfrage nach Ölprodukten sinkt insgesamt gegenüber dem Basisjahr bis 2030 um 22 % und bis 2050 um 68 % und somit stärker als im MMS, wobei die zusätzliche Reduktion vor allem durch die stärkere Elektrifizierung im Straßenverkehr auftritt. Dies führt dazu, dass die Raffinerien weniger Energie verbrauchen. Im MWMS liegt auch der Verbrauch von Erdgas und Wasserstoff in Summe niedriger als im MMS, dem entsprechend sinkt auch der Verbrauch der Verdichterstationen. Die größte zusätzliche Reduktion des Erdgasverbrauchs geschieht dabei im Gebäudesektor.

Die beschriebenen Effekte wirken sich entsprechend auf die Emissionen der Anlagen der übrigen Energiewirtschaft aus. Von 1990 bis 2019 sanken diese Emissionen um lediglich 12,9 % und damit deutlich geringer als die deutschen Emissionen insgesamt. In beiden Szenarien ist ein deutlich schnellerer Emissionsrückgang als in der Vergangenheit zu beobachten. Bis 2030 sinken die Emissionen in beiden Szenarien um ein Drittel, wobei der Emissionsunterschied zwischen beiden Szenarien nur gering ist. Zwischen 2030 und 2050 zeigt sich eine weitere Halbierung der Emissionen, wobei der Emissionsrückgang im MWMS schneller ist als im MMS. Als insgesamt wichtigster Treiber für den Emissionsrückgang der Anlagen der übrigen Energiewirtschaft sind die rückläufigen Nachfragen nach fossilen Brenn- und Kraftstoffen durch die anderen Sektoren zu nennen.

Tabelle 43: Entwicklung der Emissionen von Anlagen der übrigen Energiewirtschaft zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.								
Entwicklung 1990 – 2019	38,2	35,4	33,3						
MMS				29,0	21,6	17,2	13,4	10,6	10,1
MWMS				28,8	21,2	16,4	12,1	9,7	9,6
	Veränderung ab 1990 in %								
Entwicklung 1990 – 2019		-7,5	-12,9						
MMS				-24,0	-43,6	-55,1	-65,1	-72,2	-73,6
MWMS				-24,6	-44,7	-57,0	-68,5	-74,7	-75,0
	Veränderung ab 2005 in %								
Entwicklung 2005 – 2019			-5,9						
MMS				-17,9	-39,0	-51,5	-62,2	-70,0	-71,4
MWMS				-18,6	-40,2	-53,6	-65,9	-72,7	-72,9

Quelle: (UBA 2022a), Modellrechnungen Öko-Institut

Neben den Emissionen aus Kraftwerken und den übrigen Anlagen der Energiewirtschaft entstehen in der Energiewirtschaft sogenannte „flüchtige“ bzw. „diffuse“ Emissionen aus Brennstoffen. Diese haben vor allem historisch einen nicht unerheblichen Anteil an den Emissionen. Von 1990 bis 2019 sanken die diffusen Emissionen bereits um über 82 %. Es gibt keine direkt auf die diffusen Emissionen abzielenden Maßnahmen, daher sind zukünftige Änderungen vor allem auf Verbrauchsänderungen bei fossilen Brenn- und Kraftstoffen zurückzuführen.

Der stärkste historische Emissionsrückgang ist beim Kohlebergbau zu verzeichnen. Einerseits war der Steinkohlenbergbau in der Vergangenheit stark rückläufig, andererseits wurden die Erfassung und energetische Verwertung des anfallenden Grubengases verbessert. Daher verbleiben in der Projektion hier lediglich noch marginale Restemissionen.

Auch bei der Koksproduktion erfolgte die größte Emissionsreduktion in der Vergangenheit. Aber bedingt durch den bereits beschriebenen Rückgang von Koksverbrauch und -produktion sinken entsprechend in der Projektion die diffusen Emissionen der Koksproduktion weiter und entstehen ab 2045 überhaupt nicht mehr („not occurring“, NO). In ähnlicher Weise sinken auch die

Emissionen aus Ölförderung, -verarbeitung und -transport mit sinkenden Verbräuchen von Mineralölprodukten.

Die mit dem Erdgasverbrauch zusammenhängenden Emissionen sinken nur langsam, da es weder im MMS noch im MWMS Maßnahmen gibt, das Erdgasnetz mit den rückläufigen Erdgasverbräuchen zurückzubauen. Marginal waren und bleiben die Emissionen aus Abfackelung und Entlüftung.

Insgesamt sinken im MMS die diffusen Emissionen zwischen 2019 und 2050 um ein knappes Drittel und liegen dann um gut 87 % niedriger als 1990.

Tabelle 44: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MMS, 1990-2050

	1990	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.							
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	28,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Koksproduktion (1.B.1.b)	1,9	0,7	0,6	0,3	0,1	0,1	NO	NO
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,7	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1
Gasförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	9,9	6,1	5,7	5,6	5,3	5,0	5,0	5,0
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
Diffuse Emissionen gesamt	41,7	7,7	7,1	6,5	6,0	5,5	5,3	5,4
<i>ggü. 2005</i>	137,6%	-56,1%	-59,7%	-62,8%	-66,1%	-68,7%	-69,7%	-69,5%
<i>ggü. 1990</i>	0,0%	-81,5%	-83,0%	-84,3%	-85,7%	-86,8%	-87,2%	-87,2%

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. Überhaupt nicht auftretende Emissionen sind als NO („not occurring“) markiert.

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Da es auch im MWMS keine direkt auf die diffusen Emissionen wirkenden Maßnahmen gibt, unterscheiden sich die projizierten Emissionen nur geringfügig. Der einzig nennenswerte Unterschied zwischen MWMS und MMS sind die etwas geringeren Emissionen aus dem Erdgastransport.

Tabelle 45: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen im MWMS, 1990-2050

	1990	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.							
Kohlenbergbau (1.B.1.a)	28,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Koksproduktion (1.B.1.b)	1,9	0,7	0,6	0,3	0,1	0,1	NO	NO

	1990	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ölförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.a)	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
Gasförderung, -verarbeitung & -transport (1.B.2.b)	9,9	6,1	5,6	5,5	5,1	4,9	4,8	4,9
Abfackelung & Entlüftung (1.B.2.c)	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
Diffuse Emissionen gesamt	41,7	7,7	7,0	6,4	5,8	5,3	5,1	5,1
<i>ggü. 2005</i>	137,6%	-56,1%	-60,0%	-63,3%	-67,1%	-69,6%	-70,7%	-70,8%
<i>ggü. 1990</i>	0,0%	-81,5%	-83,2%	-84,6%	-86,2%	-87,2%	-87,7%	-87,7%

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. Überhaupt nicht auftretende Emissionen sind als NO („not occurring“) markiert.

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Tabelle 46: Entwicklung der diffusen Emissionen aus Brennstoffen zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.									
Entwicklung 1990 – 2019	41,7	17,6	7,7						
MMS				7,1	6,5	6,0	5,5	5,3	5,4
MWMS				7,0	6,4	5,8	5,3	5,1	5,1
Veränderung ab 1990 in %									
Entwicklung 1990 – 2019		-57,9	-81,5						
MMS				-83,0	-84,3	-85,7	-86,8	-87,2	-87,2
MWMS				-83,2	-84,6	-86,2	-87,2	-87,7	-87,7
Veränderung ab 2005 in %									
Entwicklung 2005 – 2019			-56,1						
MMS				-59,7	-62,8	-66,1	-68,7	-69,7	-69,5
MWMS				-60,0	-63,3	-67,1	-69,6	-70,7	-70,8

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

4.2 Instrumentenbewertung

Die Instrumentenbewertung basiert auf dem Instrumentenpapier (Anhang A.3).

Die Bewertung der einzelnen Instrumente wurde mit dem Strommarktmodell PowerFlex durchgeführt.

Für das MMS werden die einzelnen Maßnahmen jeweils gegenüber einem Modelllauf ohne diese Maßnahme bewertet. Hierzu wird jede Maßnahme 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 2023 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.

Lediglich die Maßnahme zu den Elektrolyseuren in Raffinerien als Teil der Wasserstoffstrategie wurde wie in Tabelle 47 beschrieben außerhalb von PowerFlex bewertet.

Die Instrumente, die in der Instrumentenbewertung des MMS untersucht werden, sowie die konkrete Parametrisierung im Modell für das MMS sind in Tabelle 47 aufgeführt.

Tabelle 47: Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im MMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
Ausbau der erneuerbaren Energien und Wasserstoffkraftwerke entsprechend den Ausbaumengen im EEG & Förderung der Produktion grünen Wasserstoffs	Das MMS wird verglichen mit einer kontrafaktischen Entwicklung, in dem ein weniger ambitionierter Ausbau der erneuerbaren Energien unterstellt wird. Grundlage bietet dafür das EEG 2021 und der darin festgeschriebene Ausbaupfad der Erneuerbaren. Es wurde das EEG in seiner Form vor der letzten Novellierung herangezogen, da es sich schwerlich rekonstruieren lässt, wie sich das Stromsystem ohne die Einführung des EEG im Jahr 2000 entwickelt hätte. Der Ausbaupfad ist in Tabelle 48 dargestellt. Der EE-Anteil beträgt dann 63 % im Jahr 2030 und 69 % im Jahr 2040, die entsprechende Stromerzeugung ist in Tabelle 49 aufgeführt. Außerdem wird der Ausbau der Batteriespeicher, die in der Modellierung an den Ausbau der Erneuerbaren gekoppelt sind, dementsprechend reduziert. Des Weiteren wird bei diesem Instrument die Minderungswirkung durch den Zubau von Wasserstoffkraftwerken und Elektrolyseuren berücksichtigt. Dafür wird in der kontrafaktischen Entwicklung angenommen, dass kein Bau von Wasserstoffkraftwerken oder Elektrolyseuren stattfindet.
Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umstellen - Förder volumen nach BEW	Die Quantifizierung der Wirkung der Förderung von erneuerbarer Wärme und Abwärme in Wärmenetzen im Rahmen des BEW ist schwierig abzugrenzen von der Wirkung der KWK-Förderung im Rahmen des KWKG. Daher findet hier nur eine Quantifizierung statt, die die alternative (ungekoppelte) Wärmeerzeugung betrifft. Für die Parametrisierung der kontrafaktischen Entwicklung wird angenommen, dass die installierte Leistung zur Erzeugung erneuerbarer Fernwärme auf dem Niveau gehalten wird, wie es im Referenzjahr 2019 war.
Kohleausstieg 2038 mit beschleunigtem Braunkohleausstieg im Rheinischen Revier	Zur Quantifizierung des Kohleausstiegs wird das MMS verglichen mit einem kontrafaktischen Szenario, in dem keine Stilllegung der Kohlekraftwerke stattfindet und die Kraftwerke lediglich nach einer Betriebsdauer von 65 Jahren vom Netz gehen. ³² Zudem wird berücksichtigt, dass daher auch kein Ersatz der stillgelegten Kohle-KWK-Kraftwerke durch Erdgas-KWK-Kraftwerke nötig ist, wie er in Tabelle 53 aufgeführt wird.

³² Die insgesamt installierte Leistung von Kohlekraftwerken beträgt im kontrafaktischen Szenario: Braunkohle: 2025: 18,7 GW; 2030: 18,6 GW; 2035: 17,4 GW; 2040: 14,5 GW; 2045: 12,1 GW; 2050: 10,3 GW. Steinkohle: 2025: 24,4 GW; 2030: 23,9 GW; 2035: 22,2 GW; 2040: 21,7 GW; 2045: 19,3 GW; 2050: 17,0 GW.

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
EU-Emissionshandelssystem	Vergleich des MMS mit einer kontrafaktischen Entwicklung, bei der der CO ₂ -Preis in Deutschland und Europa bei 0 EUR/t CO ₂ liegt.
Elektrolyseure in Raffinerien als Teil der sektorübergreifenden Nationalen Wasserstoffstrategie	Bottom-up-Berechnung des durch Elektrolysewasserstoff verdrängten Wasserstoffs aus der Dampfreformierung in Raffinerien (ansteigender Ersatz von grauem Wasserstoff durch grünen Wasserstoff. Im Jahr 2030 wird z.B. ein Niveau von 5,6 TWh grüner Wasserstoff erreicht). Aus der Reduktion der Dampfproduktion werden die reduzierten Einsätze von Erdgas und Mineralöl und deren Emissionen berechnet.

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Tabelle 48: Installierte Leistung erneuerbarer Energien in GW in der kontrafaktischen Entwicklung

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
GW						
PV	78,1	100,4	116,4	122,2	139,4	142,6
Windenergie an Land	65,4	71,3	91,7	108,5	124,1	139,5
Windenergie auf See	10,0	20,4	32,1	40,3	51,7	55,0
Geothermie	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
Laufwasser	5,4	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5
Speicherwasser	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
feste/flüssige Biomasse	3,3	2,5	1,6	1,5	1,7	1,9
Biogas	7,1	8,1	5,0	3,2	1,7	0,0

Quelle: Eigene Annahmen Öko-Institut basierend auf EEG 2021 (2021)

Tabelle 49: Stromerzeugung erneuerbarer Energien in TWh in der kontrafaktischen Entwicklung

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
TWh						
PV	70,9	93,7	112,3	121,3	139,2	142,6
Windenergie an Land	122,6	138,2	180,5	215,8	248,2	279,0
Windenergie auf See	39,9	81,4	128,1	161,1	206,7	219,2
Geothermie	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8
Laufwasser	18,2	18,3	18,4	18,4	18,5	18,6
Speicherwasser	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
feste/flüssige Biomasse	21,0	17,7	12,4	11,4	13,0	15,2
Biogas	22,8	21,0	13,4	6,5	2,5	0,0

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

In Tabelle 50 sind die Emissionsminderungen der einzeln bewerteten Instrumente pro Jahr aufgeführt. Die größte Minderungswirkung wird durch das EEG zusammen mit der Wasserstoffförderung erreicht. Ihre Emissionsminderung nimmt bis 2040 stetig zu, in diesem Jahr liegt sie bei 32 Mio. t CO₂. Danach ist ein Rückgang der Minderungswirkung zu verzeichnen. In den Jahren 2045 und 2050 bleiben die gesamten Emissionen im MMS weitestgehend konstant auf niedrigem Niveau, wohingegen sie in den kontrafaktischen Entwicklungen zwischen 2045 und 2050 sinken, wodurch die Differenz zum MMS im Jahr 2050 kleiner wird. Dies ist unter anderem damit zu begründen, dass der alternative Ausbaupfad der Erneuerbaren im kontrafaktischen Szenario zwar zu einem langsameren Zubau führt, aber auch über 2040 hinaus ein Zubau stattfindet, wohingegen im MMS der Zubau der Erneuerbaren bereits 2040 abgeschlossen ist.

Die Förderung erneuerbarer Energien in Wärmenetzen führt zunächst zu moderaten Einsparungen von Emissionen und erreicht bis 2040 rund 16 Mio. t CO₂, bevor in den folgenden zehn Jahren die Wirkung rückläufig ist. Die Emissionsminderungen entstehen hauptsächlich dadurch, dass der Einsatz von Erdgas zur Wärmeerzeugung vermieden werden kann. Da die Wärmenachfrage sinkt, sinkt auch der Erdgaseinsatz in KWK-Anlagen, wodurch die Minderungen geringer werden.

Der Kohleausstieg führt insbesondere bis 2025 zu Emissionsminderungen. Ab 2025 führen die Rahmendaten der Brennstoff- und CO₂-Preise dazu, dass sich die Merit-Order deutlich verändert und die Auslastung der Kohlekraftwerke stark sinkt. Daher geht die Emissionsminderungswirkung im Zeitverlauf stark zurück.

Der Europäische Emissionshandel führt in der Summe über alle betrachteten Jahre des Modellierungszeitraums zu den höchsten Einsparungen von Emissionen. Im Zeitverlauf ändern sich die erreichten Emissionsminderungen jedoch. Die geringste Minderung ist im Jahr 2040 zu verzeichnen, wenn auch ohne einen CO₂-Preis erneuerbare Energien den größten Anteil an Strom produzieren.

Tabelle 50: Direkte Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente im MMS

Direkte Emissionsminderung	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.					
EEG & H ₂ -Förderung	2,9	11,9	20,6	32,0	23,8	19,5
Wärmenetze umstellen (BEW)	0,1	1,6	6,7	16,3	11,8	10,2
Kohleausstieg bis 2038	43,5	8,1	6,9	2,3	2,0	1,6
EU-ETS	14,2	35,6	14,3	0,5	3,5	12,1
H ₂ in Raffinerien	0,5	1,9	1,9	1,9	2,2	2,0

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

Die Quantifizierung der zusätzlichen Instrumente, die im MWMS wirken, erfolgt ausgehend vom MWMS: Es wird jeweils das betrachtete Instrument ausgeschaltet und dessen relevanten Parameter auf das Niveau des MMS gesetzt. In Tabelle 51 werden die drei zu quantifizierenden Instrumente mit der jeweiligen Umsetzung aufgeführt.

Tabelle 51: Umsetzung und Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung im MWMS

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
Ausbau und Integration erneuerbarer Energien	Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist im MMS und MWMS identisch. Die beiden Szenarien unterscheiden sich in diesem Aspekt im Ausbau der Batteriespeicher, die zu einer verbesserten Integration Erneuerbarer Energien im MWMS beitragen. Daher wird zur Quantifizierung dieser Maßnahme ein Lauf mit dem ambitionierten Batteriezubau im MWMS verglichen mit einem Lauf mit dem Batteriezubau wie im MMS. Die genaue Parametrisierung der Batteriespeicher ist in Tabelle 56 aufgeführt.
Wärmenetze zunehmend auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme umstellen – 50 % klimaneutral bis 2030	Der ambitioniertere Ausbau der erneuerbaren Fernwärme wurde im MWMS so parametrisiert, dass das Niveau der installierten Leistungen der erneuerbaren Fernwärmeerzeuger höher ist als im MMS (siehe Tabelle 58 und Tabelle 60), und auch keine laufzeitverlängernden Reinvestitionen der Erdgaskraftwerke angenommen werden, so dass weniger Erdgas-KWK-Kapazitäten am Netz verbleiben (die installierte Leistung der (Erdgas-)kraftwerke im MWMS ist detailliert in Tabelle 33 dargestellt). Außerdem werden die letzten verbleibenden Kohle-KWK-Anlagen bis 2030 stillgelegt und durch andere Wärmeerzeugungstechnologien ersetzt (vergleiche Abbildung 23). Zur Quantifizierung dieser ambitionierteren klimaneutralen Wärmenetze wurde gegenüber einer Parametrisierung der Wärmenetze wie im MMS verglichen.
Kohleausstieg 2030	Das MWMS mit einem vollständigen Kohleausstieg bis 2030 wird verglichen mit einem Szenario, in dem der Kohleausstieg so parametrisiert ist, wie im MMS. Der Kohleausstiegspfad des MMS ist im Detail in Abschnitt 4.3 beschrieben und in Abbildung 29 dargestellt.

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Das Ergebnis der Berechnung der Netto-Minderungen der Treibhausgasemissionen pro Jahr der drei Instrumente im MWMS ist in Tabelle 52 zu sehen.

Die Maßnahme zur verbesserten **Integration erneuerbarer Energien**, die sich durch mehr Batteriespeicher auszeichnet, hat im Jahr 2025 einen negativen Effekt auf die Emissionen. Da es erst ab 2027 vermehrt zu Abregelungen Erneuerbarer kommt, führen mehr Batterien im Jahr 2025 dazu, dass mehr Strom aus Kohle und Erdgas erzeugt wird und somit die Emissionen steigen. In späteren Jahren sorgen Batteriespeicher dafür, dass fluktuierende Erneuerbare besser integriert werden können und sich die Abregelung reduziert. Dies führt daher zu einer moderaten Minderung der Emissionen.

Die ambitioniertere **Förderung erneuerbarer Wärme** in Fernwärme-/Wärmenetzen hat den größten Emissionsminderungsbeitrag, da sie den größten Unterschied zum MMS darstellt. Sie führt zu Emissionsminderungen von bis zu 13,5 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2035.

Da bereits im MMS Kohlekraftwerke marktgetrieben stillgelegt werden, ergibt sich eine Wirkung des ordnungsrechtlichen **Kohleausstiegs 2030** nur im Stützjahr 2030 und ist mit 1,2 Mio. t CO₂-Äq. vergleichsweise klein.

Tabelle 52: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen pro Jahr für ausgewählte Instrumente im MWMS

Direkte Emissionsminderung	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.					
EE-Ausbau & -Integration	-1,3	0,8	1,9	2,0	0,9	0,0
Wärmenetze	0,7	5,2	13,5	5,0	7,6	10,1
Kohleausstieg 2030	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0

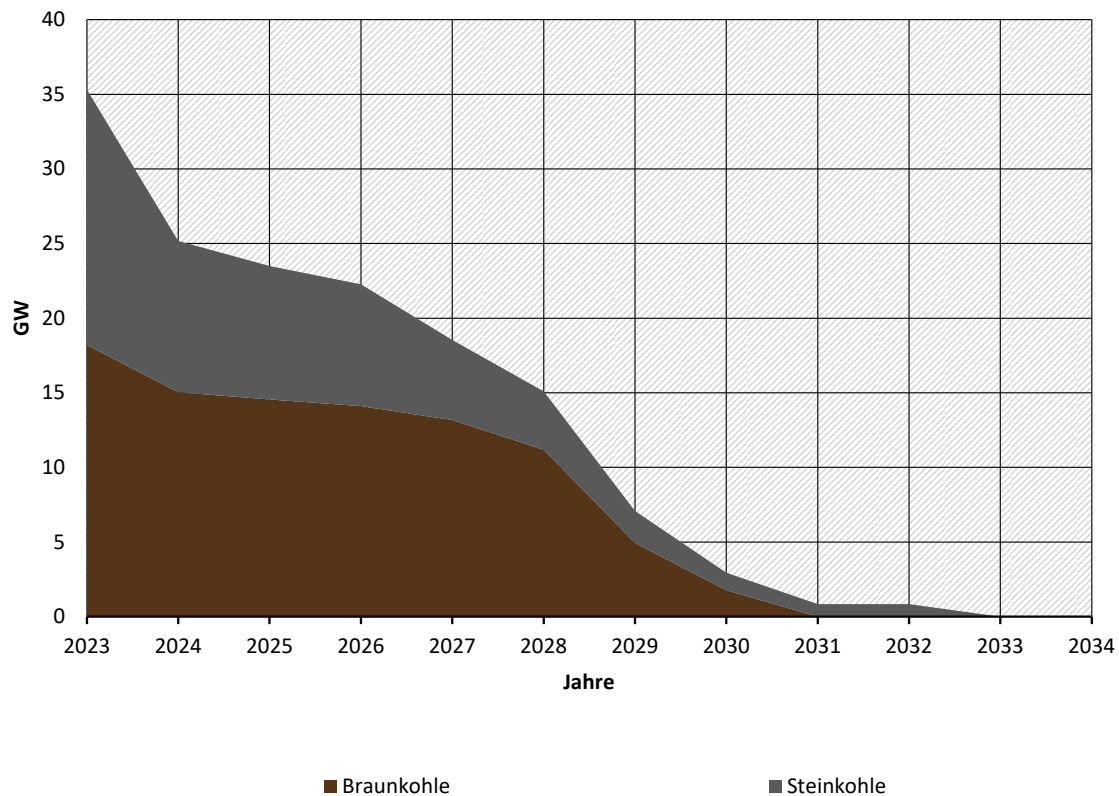
Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut

4.3 Sektorspezifische Parameter & Annahmen

Dem Rahmendaten- sowie dem Instrumentenpapier (Anhänge A.2 und A.3) sind die Annahmen zu den Entwicklungen vieler zentraler Parameter zu entnehmen. Im Folgenden sind Annahmen aufgeführt, die darüber hinaus gehen und Einfluss auf die Entwicklung des Stromsystems haben.

Die Auslastung der **Kohlekraftwerke** geht im MMS bereits ab 2026 stark zurück, was auch den Ergebnissen der Stromerzeugung (Tabelle 34) zu entnehmen ist. Daher sinken auch die Deckungsbeiträge der Kohlekraftwerke. In einem iterativen Modellierungsverfahren wurden marktgetriebene Stilllegungen abgebildet: Mit einem einer ersten Marktmodellierung nachgeschalteten Stilllegungskalkül wurde die Wirtschaftlichkeit der Kohlekraftwerke überprüft. Kraftwerke deren Deckungsbeitrag in zwei aufeinanderfolgenden Jahren nicht mindestens 30 % der Fixkosten³³ decken konnten, wurden stillgelegt, und eine zweite Marktmodellierung mit verändertem Kraftwerkspark vorgenommen, um die finalen Ergebnisse zu berechnen. Die so ermittelte installierte Leistung der Kohlekraftwerke ist in Abbildung 29 zu sehen. Im Ergebnis geht im MMS bereits zum Ende des Jahres 2032 das letzte Kohlekraftwerk vom Netz.

³³ Fixkosten des Kraftwerks und bei Braunkohlekraftwerken zusätzlich die Fixkosten der Braunkohletagebaue.

Abbildung 29: Installierte Leistung der Kohlekraftwerke im MMS

Quelle: Modellrechnungen Öko-Institut: Ergebnisse des Stilllegungskalküls

Der **Neubau von Erdgas-Kraftwerken** ist im MMS und im MWMS exogen vorgegeben. Zum einen sind dies Kraftwerke, die bereits heute fertiggestellt sind, sich im Bau oder in einem fortgeschrittenen Planungsstadium befinden.

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 KVVG als auch im Rahmen der Maßnahme der Förderung von KWK-Anlagen.

Für den Ersatz von Kohle-KWK-Anlagen durch Erdgas-KWK-Anlagen im MMS 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 53). Nach 2029 findet grundsätzlich kein Ersatz von Kohle-KWK-Anlagen durch Erdgas-KWK-Anlagen mehr statt, wodurch sämtliche Erdgaskraftwerke nach Ablauf der angenommen Betriebsdauer von 35 Jahren vom Netz gehen.

Tabelle 53: Bruttozubau von Erdgas-KWK-Kraftwerken im MMS in MW_{el}

Zubau	Größenklasse	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Bruttozubau von Erdgas-KWK auf Grund von Kohleausstieg									
anlagenscharf	1-10 MW	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 – 50 MW	78	0	50	0	0	0	0	0
	50 MW und mehr	681	52	260	0	0	0	0	0
generisch	1-10 MW	0	0	43	48	0	0	0	0
	10 – 50 MW	0	72	85	271	0	0	0	0
	50 MW und mehr	0	0	334	1146	0	0	0	0
Bruttozubau Erdgas-KWK im Rahmen der KWK-Anlagen Förderung									
generisch	unter 1 MW	150	150	150	150	0	0	0	0
	1-10 MW	200	200	200	200	200	100	0	0
Summe über beide Maßnahmen									
	Gesamt	1109	474	1121	1816	200	100	0	0

Quelle: eigene Annahmen Öko-Institut; (Deutscher Bundestag 2022); Bundestag 2020

Die installierte Leistung der **Wasserstoffkraftwerke** wird ebenfalls exogen vorgegeben. Vor allem werden die Ausschreibungen im Rahmen des EEG 2023 berücksichtigt, die mit einer Realisierungsdauer von 5 Jahren umgesetzt werden. Zusätzliche Kapazitäten ergeben sich aus der Anforderung der Wasserstoff-readiness, wodurch ab 2028 schrittweise Biomethan-Kraftwerke zu Wasserstoffkraftwerken umgerüstet werden. Dies betrifft auch Erdgas-KWK-Kraftwerke, die als Kohleersatz gebaut wurden, diese werden ab 2040 auf Wasserstoff umgerüstet.

Tabelle 54: Installierte elektrische Leistung der Wasserstoffkraftwerke in GW

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	GW					
EEG-Ausschreibungen (Kond)	0,0	6,9	8,8	8,8	8,8	8,8

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
EEG-Ausschreibungen (KWK)	0,0	0,0	2,5	5,0	6,9	7,9
Wasserstoff-ready Biomethan (KWK)	0,0	1,0	1,9	1,9	1,9	1,9
Wasserstoff-ready Erdgas (KWK)	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0	2,0

Quelle: Eigene Annahmen Öko-Institut; EEG 2023

Die elektrische Leistung inländischer **Elektrolyseure** wird exogen vorgegeben und basiert für das MMS auf der nationalen Wasserstoff-Strategie³⁴ bzw. einer entsprechenden Fortschreibung bis 2050. Vor dem Hintergrund einer höheren Nachfrage nach inländisch produziertem Wasserstoff auch aus anderen Sektoren, wird im MWMS eine ab 2030 doppelt so hohe Leistung der Elektrolyseure angenommen, wie es auch im Koalitionsvertrag³⁵ als Ziel formuliert ist und entsprechend fortgeschrieben (siehe Tabelle 55). Es ist zu berücksichtigen, dass diese Elektrolyseure im Strommarktmodell sowohl den Bedarf an synthetischen flüssigen Kraftstoffen (PtL) und Wasserstoff anderer Sektoren als auch den Bedarf an Wasserstoff zur direkten Nutzung in Wasserstoffkraftwerken decken müssen.

Tabelle 55: Installierte Elektrolyseurleistung für H₂- und PtL-Produktion in GW im MMS und MWMS

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
GW						
MMS	2,9	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
MWMS	2,9	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0

Quelle: eigene Annahme Öko-Institut

Die Entwicklung der installierten Leistung der erneuerbaren Energien erfolgt gemäß den Ausschreibungen im EEG 2023, die bis einschließlich 2029 konkretisiert sind, sowie einer Fortschreibung über diesen Zeithorizont hinaus, um dem Ausbaupfad zu folgen, der bis 2040 definiert ist. Es wird ein zeitlicher Versatz zwischen Ausschreibungen und Inbetriebnahme je nach Technologie basierend auf historischen Daten angenommen. Nachdem die Zielleistung der Ausbaupfade erreicht wurden, wird die Leistung nach 2040 konstant gehalten, wie auch im EEG 2023 beschrieben. Dies gilt nicht für Biomasse, sowie für Biogas und Biomethananlagen im Besonderen. Letztere sind zum Teil sogenannte Wasserstoff-ready-Anlagen und werden daher ab 2031 schrittweise zu Wasserstoffkraftwerken. Die installierten Leistungen der Erneuerbaren sind für ausgewählte Jahre in Tabelle 32 aufgeführt.

Im MMS wird der Ausbau der **Batteriespeicher** an den Ausbau erneuerbarer Energien gekoppelt. Es wird unterschieden zwischen mit PV-Anlagen gekoppelten Heimspeichern und Großbat-

³⁴ BMWi 2020a

³⁵ Bundesregierung 2021

terien. Für das Verhältnis von Speichergröße zu Leistung (EP-ratio) wird 1,5 h für PV-Heimspeicher und 2 h für Großbatterien angenommen. Im Rahmen des Ausbaus und der Integration erneuerbarer Energien, wird im MWMS ein ambitionierterer Ausbaupfad angenommen unter der Annahme, dass in Zukunft politisch nachgesteuert wird, um mit zusätzlichen Flexibilitäten erhebliche Abregelungen erneuerbarer Stromerzeugung zu vermeiden. Der Ausbaupfad der Batteriespeicher im MWMS orientiert sich an Szenario B des Netzentwicklungsplans³⁶.

Tabelle 56: Installierte Leistung der Batteriespeicher in GW im MMS und MWMS

		2025	2030	2035	2040	2045	2050
GW							
MMS	PV-Heimspeicher	5,7	16,4	25,0	27,9	27,9	27,9
	Großbatterien	0,8	1,5	2,3	2,8	2,9	2,9
MWMS	PV-Heimspeicher	21,5	42,3	63,2	80,9	97,7	97,7
	Großbatterien	6,4	13,6	20,8	31,1	43,3	43,3

Quelle: eigene Annahmen Öko-Institut (MMS); BNetzA 2022b (MWMS)

Die Stromerzeugung aus **Abfall** wird durch die Abfallmenge bestimmt, die im Projektionszeitraum zur Entsorgung in Müllverbrennungsanlagen und Heizkraftwerken anfällt. Die Annahmen sind für MMS und MWMS identisch.

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 12 % gegenüber 2019. 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 Wert von 2019 angenommen.

Mit den gegebenen Annahmen zum elektrischen Nutzungsgrad der Müllverbrennungsanlagen ergibt sich die in Tabelle 57 zusammengefasste Nettostromerzeugung aus Abfall für ausgewählte Jahre.

Tabelle 57: Nettostromerzeugung aus Abfall

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
TWh						
Industrieabfall	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<i>davon biogen</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

³⁶ BNetzA 2022b

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Siedlungsabfälle	8,9	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4
davon biogen	4,4	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
Klärschlamm	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

Die Umstellung der Wärmenetze auf zunehmende Anteile erneuerbarer Energien und unvermeidbare Abwärme im Rahmen der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) wurde für das MMS parametrisiert wie in Tabelle 58 dargestellt (Ortner et al. 2021). Dargestellt sind die installierten Leistungen für Solarthermie, Geothermie, Wärmepumpen und Elektrodenkessel, die zur Fernwärmeerzeugung beitragen.

Tabelle 58: Installierte Leistung neuer Fernwärmeerzeugung in GW im MMS

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
GW						
Solarthermie	0,9	3,3	4,3	5,3	6,3	7,6
Geothermie	0,1	1,4	1,8	2,2	2,6	3,0
(Groß-)Wärmepumpen	1,3	3,8	5,3	6,7	8,2	9,6
Elektrodenkessel	0,2	0,5	3,2	28,5	30,0	30,0

Quelle: (Ortner et al. 2021)

Für Solarthermie, Geothermie, Wärmepumpen und Elektrodenkessel ist in Tabelle 59 die entsprechende Wärmeerzeugung aufgeführt, die sich als Modellierungsergebnis ergibt. Für die Abwärme wird die Wärmeerzeugung (und keine Leistung) als exogene Annahme vorgegeben.

Tabelle 59: Neue Fernwärmeerzeugung in TWh in MMS

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
TWh						
Solarthermie	0,9	3,3	4,3	5,3	6,3	7,6
Geothermie	0,8	8,4	10,7	13,1	15,4	17,7
(Groß-)Wärmepumpen	3,9	11,5	15,8	20,2	24,5	28,8
Elektrodenkessel	0,0	1,6	14,7	56,0	44,0	33,8

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Abwärme	0,9	2,3	3,6	4,9	6,1	7,4

Quelle: (Ortner et al. 2021); eigene Berechnungen Öko-Institut

Für das MWMS, in dem bereits bis 2030 50 % der Fernwärme aus erneuerbarer oder unvermeidbarer Abwärme generiert werden soll, wird ein ambitionierterer Ausbaupfad der erneuerbaren Erzeugung angenommen. Die installierten Leistungen sind in Tabelle 60 aufgeführt (Dambeck et al. 2021).

Tabelle 60: Installierte Leistung neuer Fernwärmeerzeugung in GW im MWMS

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
GW						
Solarthermie	0,9	5,6	9,0	12,0	13,0	13,0
Geothermie	0,5	1,6	2,2	2,7	3,0	2,8
(Groß-)Wärmepumpen	1,0	4,6	9,7	13,7	15,0	16,7
Elektrodenkessel	0,2	0,5	3,2	28,5	30,0	30,0

Quelle: Dambeck et al. (2021)

Die entsprechende Wärmeerzeugung, die Ergebnis der Modellierung ist, ist in Tabelle 61 gezeigt. Analog zum MMS ist auch hier für die Abwärme die Wärmeerzeugung als exogene Annahme vorgegeben.

Tabelle 61: Neue Fernwärmeerzeugung in TWh im MWMS

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
TWh						
Solarthermie	0,9	5,6	9,0	12,0	13,0	13,0
Geothermie	2,7	9,9	13,0	16,0	18,0	17,0
(Groß-)Wärmepumpen	3,0	13,8	29,0	41,0	45,0	50,0
Elektrodenkessel	0,0	1,0	9,1	13,2	5,2	3,8
Abwärme	1,1	5,0	7,0	10,0	12,0	10,0

Quelle: Dambeck et al. (2021); eigene Berechnungen Öko-Institut

Für das **europäische Ausland** beruht die Entwicklung der Stromnachfrage sowie der Erzeugungskapazitäten von thermischen Kraftwerken, erneuerbare Energien und Speichern der Übertragungskapazitäten zwischen den Ländern auf dem Szenario National Trends des TYNDP 2022

(ENTSOE; ENTSO-E 2022). 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. Etwaige fehlende Daten wurden durch Interpolation oder Fortschreibungen der Trends ergänzt.

Für die **Raffinerien** gibt es eine wesentliche Annahme, die in beiden Szenarien gleich ist: Gemäß der Wasserstoffstrategie sind 2 GW an Elektrolyseuren bis zum Jahr für die Raffinerien vorgesehen. Diese Annahme steht mit weiteren, in Tabelle 62 dargestellten, Parametern in Verbindung. Mittels der Elektrolyseure wird konventionell per Dampfreformierung hergestellten Wasserstoff durch Elektrolysewasserstoff entsprechend folgender Tabelle ersetzt:

Tabelle 62: Wasserstoff in Raffinerien in TWh, 2019 bis 2050

Szenario	Größe	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
		TWh						
MMS	Wasserstoffbedarf	15,9	15,4	12,8	9,9	7,4	6,0	5,0
	Konventioneller Wasserstoff	15,9	14,0	7,2	4,3	1,8	0,4	0,0
	Elektrolysewasserstoff	0,0	1,4	5,6	5,6	5,6	5,6	5,0
MWMS	Wasserstoffbedarf	15,9	15,2	12,3	9,0	6,3	4,9	4,0
	Konventioneller Wasserstoff	15,9	13,8	6,7	3,4	0,7	0,0	0,0
	Elektrolysewasserstoff	0,0	1,4	5,6	5,6	5,6	4,9	4,0

Quellen: Modellierung Öko-Institut

5 Industrie

Der Sektor Industrie umfasst im Bundes-Klimaschutzgesetz die energetischen Emissionen "industrieller Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen"³⁷, von Industriekraftwerken und der Bauwirtschaft (CRF-Quellgruppe 1.A.2). Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen umfassen dabei einen sehr heterogenen Anlagenbestand über die Branchen hinweg. Darunter fallen z.B. verschiedenste Öfen in den Branchen Glas, Zement, Metalle, Chemie sowie die Erzeugung von Prozessdampf vorwiegend in den Branchen Papier, Nahrungsmittel und Chemie. Industriekraftwerke sind häufig KWK-Anlagen, die zum Teil in der Energiewirtschaft bilanziert sind³⁸.

Dazu kommen die prozessbedingten Emissionen (CRF 2). Diese Emissionen umfassen einerseits Emissionen von Industrieprozessen wie der Stahl- und Zementherstellung, und andererseits Emissionen aus der Produktverwendung (z.B. von fluorierten Treibhausgasen).

Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

5.1 Zentrale Ergebnisse

Im Sektor Industrie reduzieren sich die Treibhausgasemissionen von rund 183 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2019 auf projizierte rund 127 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 im MMS bzw. 120 Mio. t CO₂-Äq. im MWMS (Abbildung 30). Das Sektorziel des Klimaschutzgesetzes für das Jahr 2030 beträgt für die Industrie 119,4 Mio. t CO₂-Äq. und wird entsprechend im MMS deutlich und im MWMS sehr knapp verfehlt bzw. bei Berücksichtigung der Unsicherheiten im MWMS potenziell erreicht. Trotz einer Zielverfehlung von etwa 8 Mio. t CO₂-Äq. im MMS zeigt sich eine deutliche Reduktion der Emissionen gegenüber dem Jahr 2019 um etwa 55 Mio. t CO₂-Äq. Diese hohen Einsparungen sind auf einen umfassenden Instrumentenmix zurückzuführen, welcher mit dem ETS und dem BEHG sämtliche Emissionen des Industriesektors mit einem Preissignal versehen hat, über Instrumente wie das Dekarbonisierungsprogramm oder die Klimaschutzverträge hohe Budgetsummen für Investitionen in (nahezu) klimaneutrale Produktionsverfahren bereitstellt und mit einem breiten Instrumentenmix spezifische Hemmnisse überwindet und dadurch den Effizienzfortschritt weiter beschleunigt. Der Instrumentenmix scheint daher grundsätzlich geeignet, die 2030-Ziele zu erreichen. Allerdings können quantitative Anpassungen notwendig werden. Nach etwa 2035 lässt die Wirkung der bestehenden Instrumente nach und darüber hinaus gehende Klimaziele werden verfehlt.

Gegenüber dem Projektionsbericht 2021 zeigt sich eine deutlich stärkere Minderung bis 2030, was direkt auf eine Stärkung des Instrumentenmixes zurückzuführen ist. So wird beim aktuellen MMS von einem deutlich höheren CO₂-Preis im Emissionshandel ausgegangen: Dieser liegt nun bei 109 € je t CO₂ im Jahr 2030 (Projektionsbericht 2021: 30 €/t) und 162 €/t im Jahr 2050 (Projektionsbericht 2021: 54 €/t). Hinzu kommt deutlich mehr Budget für die Technologieförderung für CO₂-neutrale Produktion: Im Zeitraum bis 2040 stehen im MMS etwa 67 Mrd. € zur Verfügung, während es im Projektionsbericht 2021 etwa 24 Mrd. € im gleichen Zeitraum waren. Hervorzuheben sind hier die Klimaschutzverträge, die mit sehr hoher Wirkung und hohem Budget neu in das MMS gekommen sind.

Gleichzeitig muss einschränkend bedacht werden, dass Modellierung im MMS von einer funktionierenden Umsetzung und von effektiven Instrumenten ausgeht. Da es sich bei einigen wichtigen

³⁷ Prozessfeuerungen sind zum Beispiel Wärme- oder Wärmebehandlungsöfen, Schmelzöfen, Emaillier-, Röhren-, Erwärmungs-, Labor- und Veraschungsöfen (siehe Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2011))

³⁸ Die Methodik der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen verortet den Brennstoffeinsatz von Industriekraftwerken zur Erzeugung von Strom im Umwandlungssektor, den zur Wärmeerzeugung im Industriesektor.

Instrumenten wie den Klimaschutzverträgen noch um neue Instrumente handelt, für die es bisher keine empirischen Daten gibt, und in vielen Branchen Investitionen in neue, bisher nicht im industriellen Maßstab betriebene, Anlagen nötig sind, sind beide Szenarien, MMS sowie MWMS, mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Wirken wichtige Instrumente nicht so effektiv wie angenommen, kann auch im MWMS das Sektorziel für das Jahr 2030 noch deutlich verfehlt werden. Weiterhin haben die Annahmen zur zukünftigen Industrieproduktion große Auswirkungen auf die Zielerreichung und können z.B. durch Abwanderung bestehender oder Ansiedelung neuer energieintensiver Branchen anders verlaufen - die Modellierung unterstellt einen wirksamen Carbon-Leakage-Schutz. Zu den methodisch bedingten Unsicherheiten ist darüber hinaus der deutliche zeitliche Versatz von Modellierung und Veröffentlichung zu nennen. Dieser führt dazu, dass aktuelle (Kalenderjahr 2023) – und für die kurze Frist relevante – gesamtwirtschaftliche Entwicklungen strukturell nicht berücksichtigt werden können. Dies betrifft vor allem die angenommenen Produktionsmengen energieintensiver Grundstoffe (Stahl, Zement, Olefine, Papier, Glas und weitere), deren Gesamtniveau die Treibhausgasemissionen des verarbeitenden Gewerbes maßgeblich mitbestimmen. Die Bedeutung dieser Unsicherheit (und ihrer Wirkung auf das Gesamtbudget) wird im Vergleich zur grundsätzlich vorhandenen Unsicherheit als gering eingeschätzt (die Unsicherheit der angenommenen Produktionsmengen und weiterer Modellierungsparameter bis 2030/2045 ist deutlich höher). Dennoch wird empfohlen, diese Erkenntnislücke im Rahmen kurzfristiger Aktualisierungen (z.B. bei Verfügbarkeit von Produktionsstatistiken) zu schließen.

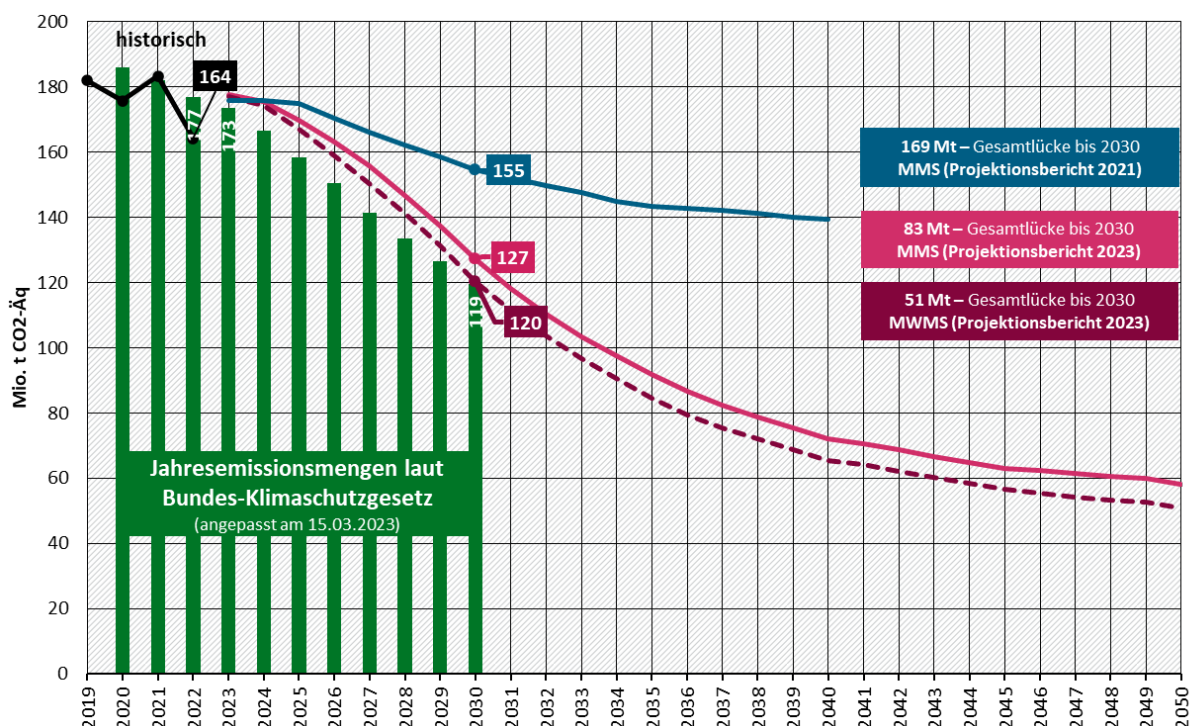
Während das 2030-Ziel durch eine gezielte Stärkung des Instrumentenmixes erreichbar scheint - wie das MWMS zeigt - so zeigt sich im Zeitraum nach 2030 ein anderes Bild. Die Reduktion der Emissionen flacht ab, sodass im Jahr 2045 noch 63 bzw. 57 Mio. t CO₂-Äq. in MMS und MWMS verbleiben. Auch bis 2050 wird in beiden Szenarien nur wenig zusätzlich Minderung erwartet. Entsprechend genügt der Instrumentenmix nicht, um die Industrie langfristig auf treibhausgasneutrale Produktion umzustellen. Folgende Gründe können für diese langfristige Zielverfehlung genannt werden:

- ▶ Bei den hinterlegten Preisen für Erdgas, Strom und Wasserstoff ist der angenommene CO₂-Preispfad mit etwa 109 €/2019/t CO₂ im Jahr 2030 und 161 €/2019/t CO₂ im Jahr 2050 nicht hoch genug und viele klimaneutrale Alternativen sind vor allem gegenüber Erdgas ohne zusätzliche Förderung nicht oder erst zu spät wirtschaftlich. Das angenommene Auslaufen von Förderbudgets im Zeitraum zwischen 2030 und 2040 führt entsprechend dazu, dass die Geschwindigkeit der Umstellung auf klimafreundliche Verfahren in diesem Zeitraum abnimmt und ist ein wichtiger Grund für die Lücke, die sich im Jahr 2045 auftut. Dies trifft vor allem auf die vollständige Elektrifizierung (in Abgrenzung von einer Teilelektrifizierung) von Prozesswärmeanwendungen zu. Hier verbleibt in MMS und MWMS mit der Erdgasnutzung in der allgemeinen Prozesswärmebereitstellung eine zu wenig adressierte Quelle von Treibhausgasemissionen. (Eine vertiefende Modellierung und Diskussion der Rolle des CO₂-Preises für die Industrietransformation ist in Fleiter und Rehfeldt (2022) verfügbar).
- ▶ Verbunden damit ist die Gefahr von Re-Investitionen in fossile Anlagen. Besonders im Zeitraum bis 2030 sind diese häufig ohne zusätzliche Förderung noch wirtschaftlich und können bei langer Lebensdauer noch im Zieljahr 2045 in Betrieb sein. Eine konsequent transformative Nutzung von Reinvestitionsfenstern der nächsten 10 Jahre ist daher besonders wichtig. Gelingt dies nicht, gewinnt im Zulauf auf das Zieljahr 2045 der Austausch alter Bestandsanlagen an Bedeutung. Aufgrund hoher Lebensdauern industrieller Anlagen (teilweise bis zu 40 Jahre) muss dieser dann ggfs. vorgezogen stattfinden.

- ▶ Die Abscheidung und Speicherung (CCS) sowie teilweise Nutzung (CCU) von prozessbedingten und sonst nicht/schwer vermeidbaren Treibhausgasemissionen wird durch die modellierten Instrumente in relevantem Umfang in den Sektoren Zement und Kalk angestoßen. Es ist bereits angenommen, dass der regulatorische Rahmen zukünftig CO₂-Transport ermöglichen und bei der Abscheidung auf die genannten Sektoren fokussieren wird. Darüber hinaus verbleiben mehrere kleine Quellen prozessbedingter Emissionen, die sich auf etwa 16 Mio. t CO₂-Äq./a summieren. Aufgrund höherer spezifischer Vermeidungskosten und größerer Unsicherheiten beim Anschluss an Transportinfrastruktur verbleiben diese Emissionen in MMS sowie MWMS auch langfristig.
- ▶ Besonders in der chemischen Industrie sind die Vermeidungskosten hoch bei Umstellung der rohstofflich genutzten fossilen Energieträger wie Erdgas und Naphtha. Für die Herstellung von Ethylen und anderen Olefinen werden sehr große Energiemengen rohstofflich genutzt – eine Umstellung auf grünen Wasserstoff erhöht deren Kosten enorm und der CO₂-Preis des Emissionshandels wirkt nur auf die während der Herstellung anfallenden Emissionen, nicht aber auf diese, die im Produkt gebunden sind. Im MMS wird nur ein kleiner Teil der Produktionskapazität auf CO₂-neutrale Verfahren umgestellt, da dies nur dort wirtschaftlich ist, wo Förderinstrumente genutzt werden können.
- ▶ Neben Verbesserungen der Energieeffizienz und der Umstellung auf neue Technologien sind der umfassende Wandel zu einer Circular Economy inkl. Suffizienzstrategien in allen Sektoren wenig berücksichtigt. Diese könnten stark auf den Bedarf an Grundstoffen (Stahl, Beton, Kunststoff) wirken und dadurch insbesondere langfristig die Zielerreichung vereinfachen.

In beiden Szenarien überschreiten die projizierten jährlichen Emissionen die im KSG festgelegten Jahresemissionsmengen (JEM) für alle Jahre von 2023 bis 2030. Die kumulierte Überschreitung der JEM (Gesamtlücke) beträgt rund 83 Mio. t CO₂-Äq. im MMS und 51 Mio. t CO₂-Äq. im MWMS. In Abbildung 30 ist zum Vergleich auch die Entwicklung der Emissionen gemäß Projektionsbericht 2021 dargestellt. In diesem betrug die Gesamtlücke rund 169 Mio. t CO₂-Äq.

Abbildung 30: Entwicklung der projizierten Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie



Anmerkungen: Die dargestellten Emissionsdaten basieren auf dem Datenstand 2023, modelliert wurde mit dem Datenstand 2022. Für die Jahre ab 2023 wurden die vom UBA nach § 4 Abs. 3 angepassten JEM dargestellt. Aufgrund teilweise unterschiedlicher Parametrisierung der Instrumente sind die Projektionsberichte nicht vollständig konsistent.

Quelle: (UBA 2023b), Modellierung: Fraunhofer ISI & Öko-Institut

Tabelle 63 zeigt die projizierte Entwicklung der Treibhausgasemissionen im MMS in den einzelnen Quellgruppen des Industriesektors. Die größte Emissionsquelle, die Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen, weist zwar eine deutliche projizierte Reduktion auf, jedoch verbleiben auch noch im Jahr 2050 erhebliche Restemissionen im MMS. Eine wichtiger Grund findet sich auf der vorigen Seite. Die projizierten Emissionen der Industriekraftwerke nehmen hingegen über den gesamten Zeitraum kontinuierlich ab; wesentliche Faktoren sind hier unter anderem ein rückläufiger Bedarf an KWK-Wärme und die Umstellung auf CO₂-neutrale Brennstoffe sowie die voranschreitende Elektrifizierung der Prozesswärme.

Bei den projizierten Prozessemissionen können insbesondere jene Emissionen in der Metallindustrie bereits bis 2030 stark reduziert werden, da durch den umfassenden Ausbau der Eisenerz-Direktreduktion (DRI-Verfahren) mit Kohle bzw. Koks befeuerte Hochöfen ersetzt werden. Dieser schnelle Umbau wird vor allem durch die Förderprogramme ermöglicht und ist Voraussetzung zur Erreichung des 2030-Ziels. In der mineralischen Industrie werden bedeutende Reduktionen der prozessbedingten Emissionen erst nach 2030 projiziert, wenn die Marktdiffusion von CCS beschleunigt (~1 bis 2 Mio. t abgeschiedenes CO₂ im Jahr 2030 und ~10 Mio. t im Jahr 2040).

Die Emissionen fluorierter Treibhausgase (F-Gase) sind größtenteils in den Quellgruppen „Anwendung als ODS (Ozone Depleting Substance)-Ersatzstoff“ und „Sonstige Produktherstellung und -verwendung“ enthalten. Diese nehmen bis 2030 stark ab, da die F-Gas-Verordnung der EU das Inverkehrbringen vieler fluorierter Gase mit hohem Treibhauspotenzial begrenzt. Die restlichen Quellgruppen im Industriesektor zeigen nur geringe Emissionsreduktionen bis 2050, absolut gesehen sind diese Emissionen jedoch weniger bedeutend als jene der zuerst genannten Quellgruppen.

Tabelle 63: Entwicklung der projizierten Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.							
Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen	64,5	63,7	53,8	39,7	32,1	29,0	26,5
Industriekraftwerke	55,5	50,5	30,7	20,8	14,9	9,6	7,3
Bauwirtschaftlicher Verkehr	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9
Prozesse: Mineralische Industrie	19,4	19,3	16,5	11,6	7,3	8,0	8,0
Prozesse: Chemische Industrie	6,5	6,5	5,4	3,9	3,7	3,7	3,8
Prozesse: Metallproduktion	18,2	15,3	10,4	7,1	5,8	4,7	4,7
Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln	1,9	2,0	2,0	1,9	1,8	1,8	1,8
Prozesse: Elektronik-Industrie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
F-Gase: Anwendung als ODS-Ersatzstoff	8,7	6,0	3,5	2,5	1,9	1,7	1,7
F-Gase: Sonstige Produktherstellung und -verwendung	4,2	2,9	1,2	0,9	1,0	1,1	1,2
Prozesse: Andere Bereiche	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Gesamt	182,7	169,8	127,1	91,8	72,0	63,0	58,2
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		158,4	119,4				
Abweichung vom Sektorziel		11,3	7,7				

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Die projizierte Entwicklung der Treibhausgasemissionen im MWMS ist in Tabelle 64 dargestellt. Im Vergleich zum MMS kommt es insbesondere bei den Industriekraftwerken zu einer stärkeren projizierten Reduktion der Emissionen, bedingt durch einen stärker sinkenden Bedarf an KWK-Wärme sowie einen größeren Einsatz von Biomasse. Bei den Wärmeerzeugern und Prozessfeuerungen kommt es ebenfalls zu weiteren projizierten Reduktionen im MWMS. Zusätzliche Instrumente im MWMS, die zur dieser Emissionsreduktion beitragen, sind die Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren³⁹, die Leitmärkte für klimafreundliche Produkte sowie digitale Ökosysteme für eine klimafreundliche Industrie.

Über das MMS hinausgehende Emissionsreduktionen werden auch bei der Anwendung von fluorierten Treibhausgasen als ODS-Ersatzstoff und bei der sonstigen Produktherstellung und -Verwendung erreicht. Dies ist dadurch bedingt, dass im MWMS die anstehende Revision der EU-F-Gase-Verordnung berücksichtigt wird, die zu weiteren Beschränkungen beim Inverkehrbringen fluorierter Gase führen wird. Informationen zur Wirkung einzelner Instrumente sind in Abschnitt 5.2 zu finden.

Tabelle 64: Entwicklung der projizierten Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.							
Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen	64,5	63,1	52,1	37,6	29,5	26,6	24,1
Industriekraftwerke	55,5	48,4	26,6	16,9	12,2	6,9	3,9
Bauwirtschaftlicher Verkehr	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9
Prozesse: Mineralische Industrie	19,4	19,3	16,5	11,6	7,4	8,1	8,1
Prozesse: Chemische Industrie	6,5	6,5	5,4	3,9	3,7	3,7	3,8
Prozesse: Metallproduktion	18,2	15,2	10,3	6,9	5,7	4,5	4,5

³⁹ Aufstockung des EU-ETS-Innovationsfonds-Budgets, Leitmärkte für klimafreundliche Produkte.

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln	1,9	2,0	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7
Prozesse: Elektronik-Industrie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
F-Gase: Anwendung als ODS-Ersatzstoff	8,7	5,9	2,9	1,5	0,9	0,7	0,6
F-Gase: Sonstige Produktherstellung und -verwendung	4,2	2,9	1,1	0,8	0,9	0,9	0,9
Prozesse: Andere Bereiche	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Gesamt	182,7	166,9	120,5	84,6	65,4	56,5	50,9
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		158,4	119,4				
Abweichung vom Sektorziel		8,4	1,0				

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Ein direkter Vergleich von MMS und MWMS ist in Tabelle 65 dargestellt. Im Jahr 2030 sind die projizierten Treibhausgasemissionen im MWMS um rund 7 Mio. t CO₂-Äq. geringer als im MMS. Die projizierten Emissionen des Industriesektors liegen 2030 im MMS um rund 55 % unter dem Wert von 1990; im MWMS sind sie um rund 57 % geringer als 1990. Im Jahr 2050 beträgt die projizierte Reduktion gegenüber 1990 rund 79 % im MMS und 82 % im MWMS.

Tabelle 65: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien

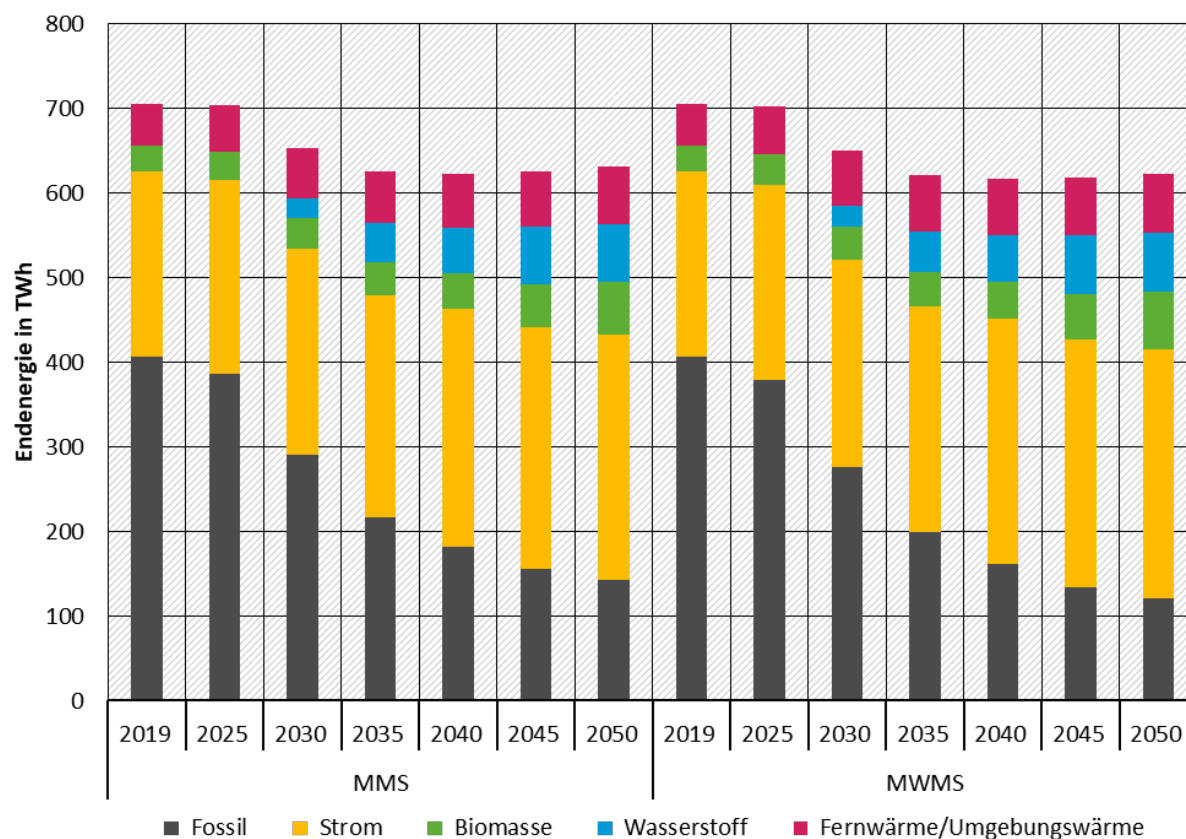
	1990	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.									
Entwicklung 1990 – 2019	279,9	189,6	182,7						
MMS				169,8	127,1	91,8	72,0	63,0	58,2
MWMS				166,9	120,4	84,6	65,4	56,5	50,9
Veränderung ab 1990 in %									
Entwicklung 1990 – 2019		-32,3	-34,7						
MMS				-39,3	-54,6	-67,2	-74,3	-77,5	-79,2
MWMS				-40,4	-57,0	-69,8	-76,6	-79,8	-81,8
Veränderung ab 2005 in %									
Entwicklung 2005 – 2019			-3,6						
MMS				-10,5	-33,0	-51,6	-62,0	-66,8	-69,3
MWMS				-12,0	-36,5	-55,4	-65,5	-70,2	-73,2

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Anmerkung: Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

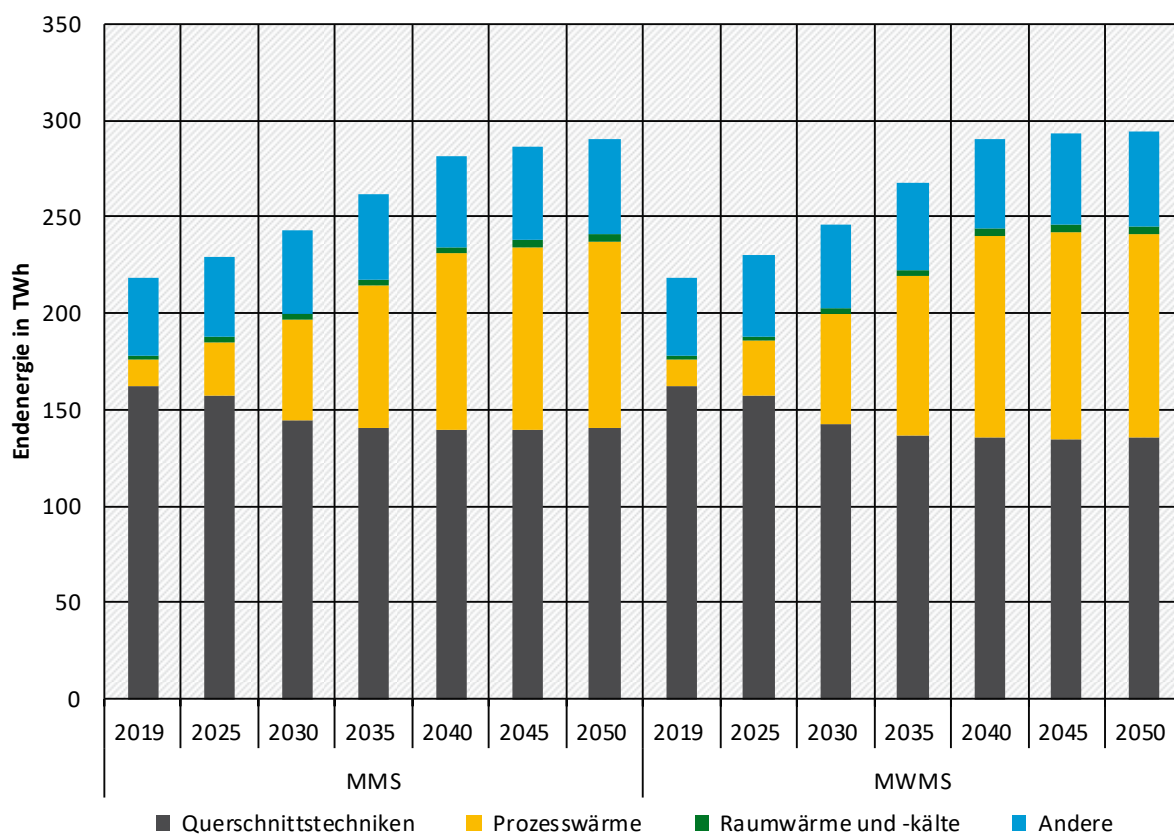
Für die Endenergiebedarfe der verarbeitenden Industrie nach AGEB-Abgrenzung bewirken die modellierten Instrumente eine verstärkte Elektrifizierung (2019: 219 TWh, 2030: 243 TWh, 2045: 286 TWh), eine Reduktion der fossilen Energieträgernutzung (2019: 406 TWh, 2030: 291 TWh, 2045: 155 TWh), und einen Einstieg in die Nutzung von grünem Wasserstoff (2030: 23 TWh, 2045: 68 TWh) (Abbildung 31). Im MWMS wird leicht stärker elektrifiziert (2019: 219 TWh, 2030: 246 TWh, 2045: 294 TWh). Die Reduktion der fossilen Energieträgernutzung (2019: 406 TWh, 2030: 276 TWh, 2045: 133 TWh) ist stärker, die Nutzung von grünem Wasserstoff nur geringfügig höher (2030: 24 TWh, 2045: 69 TWh) (Abbildung 31).

Abbildung 31: Endenergiebedarf Industriesektor (AGEB-Definition)



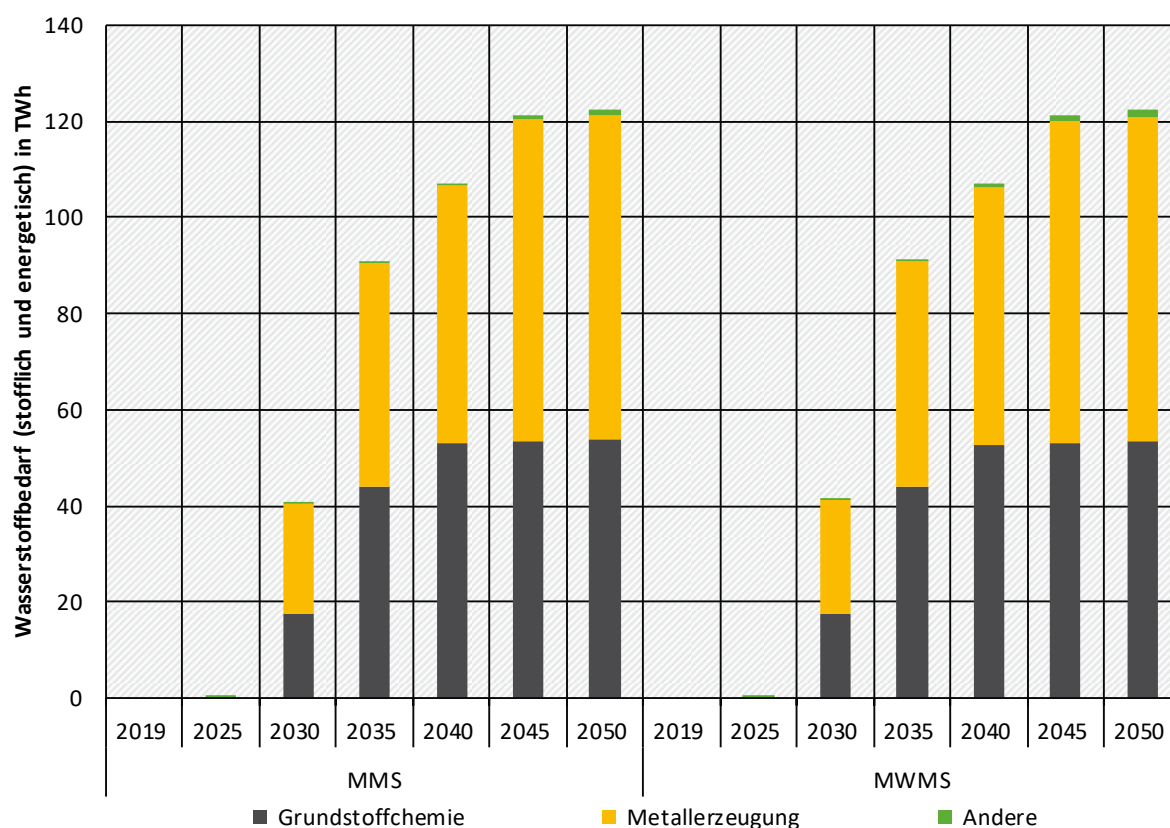
Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Der Zuwachs des Strombedarfs (in Endanwendungen) ist vor allem auf die Elektrifizierung der Prozesswärme zurückzuführen (2019: 14 TWh, 2030: 52 TWh, 2045: 95 TWh), während klassische Stromanwendungen der Querschnittstechnologien effizienzbedingt weniger Strom verbrauchen (2019: 162 TWh, 2030: 145 TWh, 2045: 139 TWh) (Abbildung 32). Im MWMS sind beide Entwicklungen leicht verstärkt (Abbildung 32).

Abbildung 32: Strombedarf nach Anwendungsbereichen (AGEB-Definition)

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Wasserstoff wird energetisch in der Metallerzeugung genutzt (Direktreduktion von Eisen), erste Projekte nehmen ab 2026 den Betrieb auf (Abbildung 33). Ob diese dann direkt mit Wasserstoff betrieben werden können, ist sehr unsicher und standortbezogen. Die Modellierung geht von einer schnellstmöglichen Umstellung auf die Nutzung grünen Wasserstoffs aus, um die volle Minderungswirkung zu erreichen (2030: 23 TWh, 2045: 67 TWh). Ein längerer Betrieb mit Erdgas hätte deutlich reduzierte Minderungswirkung zur Folge –auch scheint eine Verwendung des dadurch "f" Wasserstoffs an anderer Stelle nicht geeignet, diese zu kompensierenfreiwerdenden. Im MMS wird Wasserstoff auch rohstofflich genutzt (2030: 18 TWh, 2045: 53 TWh), zunächst für Ammoniak- später auch für Olefinproduktion. Bis 2045 wird damit aber nur ein kleiner Teil des stofflichen Bedarfs abgedeckt (2019: 257 TWh, 2030: 304 TWh, 2045: 335 TWh). In anderen Anwendungen (z.B.: Dampferzeugung) wird Wasserstoff nur vereinzelt genutzt (2045: ~1 TWh). Im MWMS sind die Änderungen gegenüber MMS geringfügig.

Abbildung 33: Wasserstoffnutzung (stofflich und energetisch)

Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

5.2 Instrumentenbewertung

Die Instrumentenbewertung basiert auf dem Instrumentenpapier (Anhang A.3).

Für die Instrumentenbewertung wird auf zwei unterschiedliche Bilanzräume zurückgegriffen. Für die Modellierung wird ein Sektormodell (FORECAST, siehe Anhang A.4.2) eingesetzt, mit dem detailliert die Instrumentenwirkung berechnet wird. Dessen Ergebnisse fließen in eine Gesamtbewertung ein. Dabei werden Ergebnisse vom Bilanzraum der Energiebilanz (AGEB) auf die den für die Einordnung und Berichterstattung der Treibhausgasemissionen maßgeblichen der ZSE (Zentrales System Emissionen) umgerechnet – hauptsächlich im Zusammenhang mit Industriekraftwerken, geringfügig auch prozessbedingten Emissionen. Im Zuge der Umrechnung entstehen Differenzen. Die Instrumentenbewertung wird auf der höheren Detailebene durchgeführt und auf ZSE skaliert. Dadurch werden die Instrumentenwirkungen der Treibhausgasemissionen gegenüber denen der Energiebedarfe verzerrt und sind nicht mehr direkt vergleichbar. Die Beziehung der Instrumente untereinander und die jeweiligen Gesamtwirkungen bleiben dadurch erhalten.

Dieses Vorgehen ermöglicht es, sowohl für Endenergie als auch Treibhausgasemissionen mit den jeweiligen Systemen kompatible Ergebnisse zu erzeugen – und darüber hinaus detailliertere Angaben zur Entwicklung des Endenergiebedarfs zu machen (z.B. Abbildung 38)

5.2.1 Beschreibung und Modellierung der Instrumente

In diesem Abschnitt werden die im Industriesektor untersuchten Instrumente und Instrumentenbündel kurz beschrieben sowie ihre Modellierung dargestellt, sofern sie für die Bewertung von besonderer Bedeutung ist.

Tabelle 66 gibt an, für welche Instrumente die Einzelbewertung bzw. die Modellbewertung mit dem Modell FORECAST durchgeführt wurde. Weiterhin wird für Instrumente mit Einzelbewertung angegeben, welche Abzüge für Überschneidungen mit anderen Instrumenten und Mitnahmeeffekte und ähnliche Effekte wie Übertragungseffekte berücksichtigt wurden. Für Instrumente, 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 einzeln bewerteten Instrumenten 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 stehen⁴⁰. Überschneidungen berücksichtigen die vielen (häufig gewollten) Überschneidungen und Wechselwirkungen zwischen den Instrumenten. 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 Instrumentenwirkung korrigiert werden (die Einsparwirkung der Effizienzinvestition wird jedem Instrument anteilig zugerechnet). Die angegebenen Prozentwerte für Überschneidungen und Mitnahmeeffekte reduzieren entsprechend die Brutto-Wirkung⁴¹ der Instrumente. Die Herleitung der Annahmen zu Mitnahmeeffekten und Überschneidungen wird in den Abschnitten zu den einzelnen Instrumenten 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 Instrumenten immer stärker wird. Ein einfaches Aufsummieren der Einzelwirkung der Instrumente würde das Gesamtpotenzial deutlich überschätzen.

Tabelle 66: Übersicht der Instrumente in den Sektoren Industrie (IND) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD): Methodik und Annahmen zu Überschneidungs- und Mitnahme- bzw. Übertragungseffekten

Sze-nario	Instrument	Sek-tor	Methode	Überschnei-dung	Mitnahme/Übertra-gungseffekte
MMS	EU-Emissionshandel	IND	FORE-CAST	n.v.* (nicht vorhanden)	n.v.*
MMS	Energie- und Stromsteuer	IND, GHD	FORE-CAST	n.v.*	n.v.*
MMS	CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme	IND	FORE-CAST	n.v.*	n.v.*
MMS	EEG-Umlagesenkung	IND, GHD	FORE-CAST	n.v.*	n.v.*
MMS	Spitzenausgleich im Rahmen des Energies-teuergesetzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG)	IND	Einzelbe-wertung	20 %	10 %

⁴⁰ Zur genauen Definition und möglichen Ermittlung dieser Effekte siehe Schlomann et al. (2020) (Abschnitt 9.3).

⁴¹ Also die Wirkung, die bei einer Bewertung ohne diese Effekte scheinbar entstehen würde.

Sze- nario	Instrument	Sek- tor	Methode	Überschnei- dung	Mitnahme/ Übertra- gungseffekte
MMS	Besondere Ausgleichsregelung (BesAR) des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)	IND	Einzelbe- wertung	20 %	10 %
MMS	Energieberatung im Mittelstand	IND, GHD	Einzelbe- wertung	40 %	37 %
MMS	Mittelstandinitiative Energiewende und Kli- maschutz	IND, GHD	Einzelbe- wertung	n.v.**	n.v.**
MMS	Mindesteffizienzstandards – EU-Ökodesign- Richtlinie	IND, GHD	FORE- CAST	n.v.*	n.v.*
MMS	Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft - Gesamtprogramm	IND, GHD	Einzelbe- wertung	5 %	30 %
MMS	Nationale Klimaschutzinitiative (NKI): Kälte- Klima-Richtlinie	GHD	Einzelbe- wertung	5 %	5 %
MMS	Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutz- netzwerke	IND, GHD	Einzelbe- wertung	n.v.**	n.v.**
MMS	Pilotprogramm Einsparzähler	IND, GHD	Einzelbe- wertung	n.v.**	n.v.**
MMS	Energieauditpflicht für Nicht-KMU (Umset- zung Art. 8 EED)	IND, GHD	Einzelbe- wertung	30 %	10 %
MMS	KfW-Energieeffizienzprogramm	IND, GHD	Einzelbe- wertung	30 %	30 %
MMS	Nationale Klimaschutzinitiative (NKI): Kom- munalrichtlinie investive Maßnahmen	GHD	Einzelbe- wertung	n.v.**	n.v.**
MMS	Förderprogramme Dekarbonisierung in der Industrie* und Klimaschutzverträge	IND	FORE- CAST	n.v.	n.v.
MMS	EU-ETS-Innovationsfonds	IND	FORE- CAST	n.v.	n.v.
MMS	IPCEI Wasserstoff	IND	FORE- CAST	n.v.	n.v.

* Im Rahmen der integrierten Modellierung erfasst.

** Implizit bei Bottom-up-Bewertung berücksichtigt.

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

5.2.1.1 MMS

Instrumente zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren (Förderprogramme)

Die in diesem Bündel zusammengefassten Instrumente (Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie und Klimaschutzverträge, EU-ETS-Innovationsfonds sowie IPCEI Wasserstoff in der Industrieproduktion) unterstützen die Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren (z.B. wasserstoffbasierte Stahlerzeugung und Grundstoffchemie, Elektrifizierung der Prozesswärmeerzeugung). Die dafür bereitgestellten Budgets schließen vorrangig Kostendifferenzen

zen zwischen emissionsarmer und konventioneller Produktion. Dies geschieht durch Investitions- und Betriebsförderung. Bis 2030 ist dabei eine Gesamtsumme von gut 32 Mrd. € angenommen, bis 2040 gut 67 Mrd. € (Instrumentenpapier Anhang A.3). Mit etwa 86 % der Gesamtsumme stellen dabei die Förderprogramme Dekarbonisierung in der Industrie und Klimaschutzverträge (einschließlich des Förderprogramm CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien) den deutlich größten Anteil.

In der Modellierung der Instrumentenwirkung wird das Gesamtbudget – unterschieden nach CAPEX- und OPEX-Bedarf – auf spezifische Technologien bzw. Herstellverfahren aufgeteilt. Maßgebliche Kriterien für die angenommene Verwendung sind bereits bestehende Förderzusagen und die – entsprechend der Instrumentenbeschreibung (siehe Instrumentenpapier im Anhang A.3) – erwartete Fördereffizienz (welche Vermeidung wird pro eingesetztem Euro erreicht). Nach diesem Kriterium werden vorrangig Anwendungen mit geringeren Differenzkosten gefördert. Beispiel sind die wasserstoffbasierte Direktreduktion, die Direktelektrofizierung von Dampferzeugung und Industrieöfen, elektrische Glasschmelze und CCU/S prozessbedingter Treibhausgasemissionen. Darüber hinaus wird berücksichtigt, welche Technologiebereiche aufgrund starker Pfadabhängigkeiten von frühen Transformationsimpulsen besonders profitieren können – und ohne diese möglicherweise scheitern könnten. Dies betrifft auch die von Infrastrukturaufbau abhängige CCU/S-Anwendungen, maßgeblich aber wasserstoffbasierte Chemie⁴². Der OPEX-Bedarf ergibt sich aus der installierten Leistung (z.B. die physische Menge wasserstoffbasierter Stahlerzeugung in Tonnen) und den in jedem Jahr unterschiedlichen Differenzkosten zur konventionellen Produktion. Investitionen in den Aufbau (CAPEX) von Produktionskapazität und Kosten für den Differenzkostenausgleich (OPEX) werden in der Modellierung getrennt berechnet, aber für die Wirkung der Programme zusammengefasst. Die Differenzkosten wiederum hängen von technischen Parametern der Verfahren und den im Szenario angenommenen Energieträger- und CO₂-Preisentwicklungen (siehe Mendelevitch et al. (2022)) ab. In Summe wird in der Modellierung 95 % des Gesamtbudgets verwendet, dabei kommt es in einigen Jahren zur Überschreitung der jährlich hinterlegten Menge, in anderen zur Unterschreitung. Insgesamt (2020-2040) werden 44 % der eingesetzten Mittel für OPEX, 56 % für CAPEX verwendet (Tabelle 67).

Tabelle 67: Budgetverteilung der Förderprogramme im MMS

Budget in Mio. €	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030	Summe 2020-2030	Jährlich bis 2040	Summe 2020-2040
EU-Innovationsfonds	0	80	290	290	290	290	290	2.690	290	5.590
Förderprogramme Dekarbonisierung in der Industrie* und Klimaschutzverträge	80	310	1.322	2.448	2.811	2.870	3.500	26.000	3.200	58.000
IPCEI Wasserstoff	-	-	50	456	389	749	0	3.581	0	3.581
Summe	80	390	1.660	3.195	3.490	3.910	3.790	32.262	3.490	67.132

* Inkl. Haushaltsmittel für das ehemalige Programm "Förderprogramm CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien"

⁴² Diese weist hohe Vermeidungskosten und zum Teil lange Verzögerungen zwischen Maßnahme und Wirkung auf (zusätzlich entsteht die Wirkung vorrangig außerhalb des Industriesektors). Um eine Transformation in diesem Bereich anzustoßen, werden dort dennoch relevante Summen zugeteilt. In einer Sensitivität wird überschlägig dargestellt, welche Auswirkung eine Vernachlässigung dieses Aspekts hätte.

Die Wirkung der Instrumente wird über ihre Anteile am Gesamtbudget zugewiesen. Somit entfällt auf den EU-Innovationsfonds 8 %, auf IPCEI Wasserstoff 5 % und auf die Förderprogramme Dekarbonisierung 86 % der in Tabelle 68 angegebenen Gesamtwirkung. Daraus ergeben sich die Treibhausgasemissionsminderungen der Instrumente (Tabelle 68, Tabelle 69). Die Instrumentenwirkung wird als Differenz zu einem kontrafaktischem Szenario – in dem keine Markteinführung emissionsarmer Produktionsverfahren stattfindet – berechnet. Es wurden also insbesondere keine Annahmen zu autonom (ohne Unterstützung) stattfindender Diffusion dieser Herstellungsverfahren getroffen. Dies lässt sich – neben der eindeutigeren Zuordnung – auch durch die für die meisten relevanten Verfahren unter den gegebenen Rahmendaten positiven Vermeidungskosten bis 2040 und darüber hinaus begründen. Die Wirkung des konkreten Instruments wird durch diese Setzung tendenziell überschätzt, die entstehende Minderungswirkung durch die Einführung CO₂-armer Herstellungsverfahren aber nicht.

Tabelle 68: Minderungswirkungen der Einzelinstrumente im Bündel „Instrumente zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren Förderprogramme“

Treibhausgas-minderung [Mio t CO ₂ -Äq.]	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Instrumente zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren	1,1	24,4	46,6	59,4	65,2	63,6
EU-Innovationsfonds	0,1	2,0	3,9	4,9	5,4	5,3
Förderprogramme Dekarbonisierung in der Industrie* und Klimaschutzverträge	1,0	21,1	40,3	51,3	56,3	54,9
IPCEI Wasserstoff	0,1	1,3	2,5	3,2	3,5	3,4

* Inkl. Haushaltsmittel für das ehemalige Programm „Förderprogramm CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien“

Sensitivität Fördermittelzuteilung

Für die vorliegende Instrumentenbewertung wurden Verteilungen der Förderprogrammbudgets auf Vermeidungstechnologien angenommen. Entsprechend der Instrumentendefinition (siehe Instrumentenpapier) wurde ein Großteil (~65 %) auf Vermeidungsoptionen mit geringeren Vermeidungskosten verteilt. Dazu gehören die Direktreduktion, teilelektrifizierte Prozesswärmeerzeugung sowie CCS. Ergänzend wurden aber auch etwa 35 % des Budgets auf Technologien mit hohen Vermeidungskosten und strategischer Bedeutung verteilt – insbesondere wasserstoffbasierte Chemie.

Diese Mittelverwendung ist langfristig als Investition in relevante Schlüsseltechnik einzustufen: Wasserstoffbasierte Olefinproduktion bildet eine mögliche Basis für einer treibhausgasarmen Kunststoffproduktion. Durch den zum Teil langen Lebenszyklus von Kunststoffprodukten (und die Verwertung am Ende der Nutzungsphase) sowie die benötigte Infrastruktur (Wasserstoff und Kohlenstoff als Rohstoffe) scheint ein möglichst früher Einstieg – jedenfalls aber ein früher Kompetenzaufbau z.B. in Form von Demonstrationsanlagen – sinnvoll. Allerdings weist sie eine sehr geringe Fördermitteleffizienz auf (hohe Differenzkosten, Verlagerung der Wirkung in andere Sektoren).

Eine alternative Verteilung mit Fokus auf direkte Vermeidung könnte einen noch stärkeren Fokus auf die direkte Elektrifizierung der Prozesswärmeerzeugung (und deren Übergang vom Teillast- zum Volllastbetrieb) sowie den weiteren Ausbau der wasserstoffbasierten Direktreduktion **nach 2030** legen (bis 2030 werden durch den Verzicht auf die Transformation der Grundstoffchemie keine Mittel frei). Dadurch ließen sich rechnerisch etwa 5-7 Mt weitere Rohstahlkapazität darstellen – was einem um etwa 7 Jahre vorgezogenen Ausstieg aus der kohlebasierten Hochofenroute

entspricht. Der Einstieg in die vollständige Elektrifizierung von Prozesswärmeerzeugung ist mit hohen Unsicherheiten und nicht modellierten Barrieren behaftet, die über den Industriesektor hinausgehen (Anschlussleistungen, Netzausbau, Erzeugung). Es lässt sich aber grob abschätzen, dass eine gegenüber dem MMS bis 2040 um etwa 50 TWh stärkere Elektrifizierung abbildbar (Abdeckung direkter Differenzkosten) wäre (also im Jahr 2040 nur noch knapp 100 TWh fossile Prozesswärme statt knapp 150 TWh, siehe Abbildung 38)

In Summe würde diese abweichende Allokation etwa 25 Mio.t CO₂-Äq. im Jahr 2040 einsparen (5 Mio. t CO₂-Äq. durch Direktreduktion, 20 Mio. t CO₂-Äq. durch vermiedene Erdgasnutzung in der Prozesswärme). Diese Abschätzung ist nicht in die Gesamtmodellierung integriert und berücksichtigt daher keine extrasektoralen Effekte, insbesondere in der Stromerzeugung. Darüber hinaus würde diese deutliche Beschleunigung der Elektrifizierung starken Stress für die Umsetzungskapazitäten (Herstellung und Installation) von Prozesswärmeanlagen bedeuten. Hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf.

EU-Emissionshandel

Der EU-Emissionshandel gibt Treibhausgasemissionen einen Preis und verteuert so die Nutzung fossiler Energieträger. Dieses Instrument wirkt auf die überwiegende Mehrheit der Treibhausgasemissionen in der Industrie – davon nicht erfasste Mengen werden durch das Instrument "CO₂-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme" erfasst. Der für die Modellierung angenommene Preispfad ist in den Rahmendaten zum Projektionsbericht 2023 (Mendelevitch et al. (2022)) dargestellt. Die freie Zuteilung von Emissionszertifikaten und deren zeitlicher Verlauf wird in dieser Modellierung nicht berücksichtigt. Insofern wird der angelegte Preis auch als Repräsentation von Opportunitätskosten⁴³ gesehen. Die letzte Revision der EU-Emissionshandelsrichtlinie (vom Juni 2023) konnte in diesen Projektionsbericht nicht mehr einfließen, Modellierungsbasis sind die Regelungen der vierten Handelsperiode vom 8.4. 2018⁴⁴. Für die Industrie relevant sind insbesondere die Elemente CBAM, der Cap-Anpassung bis 2030 und veränderte Regelungen der kostenlosen Zuteilung. Die Auswirkungen auf die vorliegende Projektion – die Zielerreichung wird tendenziell wahrscheinlicher, wobei der Umfang der Wirkung zunächst unklar bleibt – sollten in ergänzenden Analysen quantifiziert werden.

Die Modellierung reagiert auf die durch den EU-Emissionshandel gesendeten Preissignale, in dem die derart verteuerten Energieträger gegenüber weniger emissionsintensiven Alternativen weniger attraktiv werden und seltener Verwendung finden. Dies wirkt sich z.B. bei der Auswahl der Technologie im Zuge einer Ersatzinvestition aus. Zusätzlich zu dieser Wirkung reduziert der EU-Emissionshandel die für die Bewertung der "Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren (Förderprogramme)" angelegten Differenzkosten. Dieser Zusammenhang wird in der Instrumentenbewertung des EU-Emissionshandels nicht berücksichtigt, da daraus sonst Doppelzählungen entstünden. Ohne EU-Emissionshandel müsste aber für die gleiche Minderungswirkung der Förderprogramme relevant höheres Budget bereitgestellt werden – etwa 250 % der in MMS angelegten Summe. Diese Abschätzung entsteht aus den deutlich steigenden Differenzkosten der berücksichtigten Technologien, wenn der EU-ETS keinen Teil der Lücke zwischen fossilen und CO₂-armen Verfahren schliesse. Im Jahr 2030 stiegen die Differenzkosten in diesem Fall beispielsweise für die wasserstoffbasierte Direktreduktion von Eisen (siehe Abbildung 42) von 62 €/t auf 171 €/t.

Die Instrumentenwirkung wird in Tabelle 69 als Differenz zu einem Zustand ohne Emissionshandel (Zertifikatpreis =0) berechnet.

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

Die CO₂-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme gibt Treibhausgasemissionen einen Preis und verteuert so die Nutzung fossiler Energieträger. Dieses Instrument wirkt auf einen kleinen Teil der der Treibhausgasemissionen in der Industrie – lediglich jene Menge, die durch das Instrument "CO₂-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme" erfasst sind. Der für die Modellierung angenommene Preispfad ist in den Rahmendaten zum Projektionsbericht 2023 (Mendelevitch et al. (2022)) dargestellt.

Die Instrumentenwirkung wird in Tabelle 69 als Differenz zu einem virtuellen Szenario ohne CO₂-Bepreisung (Zertifikatpreis =0) berechnet.

⁴³ Also dem Gedanken, dass nicht genutzte freie Zuteilungen den gleichen Wert haben wie zuzukaufende Zertifikate.

⁴⁴ Zu beachten ist jedoch, dass die Reaktion des Preises für Emissionsberechtigungen auf die zum Abschneidezeitpunkt bereits angekündigten und in den Verhandlungen weit vorgeschrittenen Reformen implizit bereits abgebildet ist. Wie in Mendelevitch et al. (2022) beschrieben, beruhen die Preisprojektionen für den EU-ETS bis zum Jahr 2030 auf Expertenschätzungen nach Carbon Pulse (2022). Es ist davon auszugehen, dass die Experten der Handelshäuser in ihren Schätzungen den absehbaren Preiseffekt der Reformen bereits berücksichtigt.

Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)

Das Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB) adressiert die Substitution emissionsintensiver Ressourcen und Rohstoffe und die Kreislaufführung von Materialien. Auf Basis der Wirkungsabschätzungen für das KSSP der Bundesregierung wird eine Wirkung von etwa 2 Mio. t/a im Jahr 2030 und im weiteren Verlauf als etwa konstant angenommen.

EU-Richtlinie 2006/40/EG (MAC-Richtlinie)

Die MAC-Richtlinie von 2006 begrenzt das Treibhausgaspotenzial (GWP) von Kältemitteln für Klimaanlage in Kraftfahrzeugen und führte zu einem starken Rückgang im Einsatz und damit der Emissionen insbesondere des fluorierten Kältemittels R-134a, einem teilhalogeniertem Fluorkohlenwasserstoff (HFKW) mit einem GWP von 1300 gemäß dem fünften IPCC-Sachstandsbericht (AR5). Die Modellierung berücksichtigt die Interaktion der MAC-Richtlinie mit dem HFKW-Phase-Down gemäß EU-F-Gase-Verordnung 517/2014 in Bezug auf die auf den Markt gebrachten und emittierten HFKW-Mengen. Die Treibhausgasmindierungswirkung der MAC-Richtlinie wird basierend auf Gschrey und Schwarz (2011) zwischen mit etwa 4-6 Mt CO₂-Äq. pro Jahr abgeschätzt und ist zusätzlich zur Wirkung des erst einige Jahre später in Kraft gesetzten HFKW-Phase-Downs zu verstehen.

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

Unternehmen des Produzierenden Gewerbes (UPG) erhalten bislang im Energie- und im Stromsteuerrecht den sog. Spitzenausgleich (§ 10 StromStG, § 55 EnergieStG). Diese Steuerentlastungen ermöglichen es den UPG, für alle Energie- und Stromverbräuche eines Jahres unter rechnerischer Zugrundelegung der Rentenversicherungsbeiträge bis zu 90 % der nach Abzug der allgemeinen Steuerentlastung dann noch verbleibenden Energie- bzw.- Stromsteuer auf Heizstoffe und Strom zurückerstattet zu bekommen. Diese Steuerbegünstigung ist – nach der Verlängerung um ein Jahr im letzten Jahr – bis Ende 2023 gesetzlich verbindlich geregelt.

Für die Gewährung des Spitzenausgleichs müssen demnach derzeit 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).
- ▶ Das Unternehmen muss die Bereitschaft erklären, alle in dem Energiemanagementsystem oder im Umweltmanagementsystem als wirtschaftlich vorteilhaft identifizierten Endenergieeinsparmaßnahmen umzusetzen.

Energieberatung Mittelstand

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 im Mittelstand“ wurde mit der „Energieberatung für Nichtwohngebäude von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen“ 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 %.

Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz (MIE)

Die Mittelstandsinitiative ist ein Gemeinschaftsprojekt von BMWK, 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 Energieeffizienzfonds (Hirzel et al. 2019) 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.

Mindesteffizienzstandards – EU-Ökodesign-Richtlinie

Die Mindeststandards unter der EU-Ökodesign-Richtlinie und den jeweiligen EU-Durchführungsverordnungen werden im jeweiligen Sektor 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.

Im Rahmen der laufenden Revision der Ökodesign-Richtlinie wird eine deutliche Erweiterung des Geltungsbereiches geplant, die auch Zwischenprodukte umfasst. Diese Revision kann zukünftig zu einer Entwicklung von Märkten für treibhausgasarme Produkte führen, die analog zur Entwicklung grüner Leitmärkte zu bewerten wäre.

Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft (Zuschuss und Kredit / Förderwettbewerb)

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.

► Modul Förderwettbewerb

Im Rahmen des Moduls "Förderwettbewerb" 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.

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 des laufenden Programmes und den vorgesehenen Fördermitteln. Für die einzelnen Module sind jeweils die aktuell vorliegenden Budgets hinterlegt. Es wird angenommen, dass die Haushaltsmittel für das Programm in den Folgejahren entsprechend dem Haushaltsplan deutlich steigen⁴⁵.

Kälte-Klima-Richtlinie

Die im Rahmen der Nationale Klimaschutzinitiative (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.

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 Nationalen Aktionsplans Energieeffizienz (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 (BMWK und BMUV) und mittlerweile 22 Wirtschaftsverbänden und -organisationen unterzeichnet. Insgesamt sollen dadurch 75 PJ Primärenergie eingespart und 5

⁴⁵ Evaluation der „Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft“ (www.bmwk.de)

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, 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 Klimaschutz (BMWK) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) haben am 14. September 2020 gemeinsam mit 21 Verbänden und Organisationen der Wirtschaft die Fortsetzung und Weiterentwicklung der Initiative Energieeffizienz-Netzwerke vereinbart (IEEKN 2020). Die zu einer Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke weiterentwickelte Initiative startete im Januar 2021.

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 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) (Mai et al. 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.

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.

Nationale Klimaschutzinitiative (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.

HFKW-Phase-Down gemäß EU F-Gas-Verordnung 517/2014

Mit der Novelle der EU-F-Gase-Verordnung von 2014 wurde eine schrittweise EU-weite Beschränkung der Mengen von HFKW eingeführt, die EU-weit in Verkehr gebracht werden dürfen, unterfüttert mit spezifischen Verboten von Kältemitteln oberhalb spezifischer GWP-Schwellen in Neuanlagen bestimmter Anwendungen. Der HFKW-Phase-Down führt jenseits der Verbote zu einer Verknappung der für Neuanlagen und Nachfüllungen verfügbaren HFKW-Mengen, zu höheren HFKW-Preisen und steigender Attraktivität von Alternativstoffen ohne oder mit niedrigerem GWP und im Endeffekt mit Zeitverzögerung zu geringeren HFKW-Emissionen aus dem Betrieb und der Entsorgung von HFKW-haltigen Geräten und Produkten. Die Europäische Kommission hat im April 2022 einen Revisionsvorschlag (Europäische Kommission 2022) zur F-Gase-Verordnung 517/2014 vorgelegt, der u.a. eine Verlängerung und Verschärfung des HFKW-Phase-Down sowie weitere Verbot vorsieht. Eine mögliche Verschärfung des Phase-Down als Ergebnis des aktuell (Sommer 2023) noch andauernden Verhandlungsprozesses zwischen Europäischem Rat, Parlament und Kommission wird nicht im MMS, sondern im MWMS berücksichtigt.

Für die Modellierung im MMS werden aus Modellierungsarbeiten im Kontext der Revision der EU-F-Gase-Verordnung (Gschrey et al. 2022) die EU-weiten Emissionstrends im *Baseline-Szenario* der Folgenabschätzung zur Revision der F-Gas-Verordnung (EC 2022c) auf Deutschland übertragen. Während der Phase-Down-Fahrplan in der aktuell gültigen EU-Verordnung

517/2014 nur bis 2030 definiert ist, wurde für die Modellierung dabei in Konsistenz zum *Baseline-Szenario* der EU-Kommission ein konstantes Weitergelten der für 2030 vorgesehenen Höchstmengen angenommen.

SF₆-Verbote gemäß EU F-Gas-Verordnung 517/2014 und 842/2006

Mit der EU-F-Gase-Verordnung von 2006 wurden EU-weit eine Reihe von Anwendungsverböten für Schwefelhexafluorid (SF₆) eingeführt, welches mit einem GWP (AR5) von 23500 zu den stärksten bekannten Treibhausgasen zählt. Die wichtigsten Verböte betreffen den Einsatz von SF₆ in neuen Schallschutzgläsern sowie als Schutzgas beim Metallguss. Diese Verböte gelten weiter unter der revidierten F-Gase-Verordnung von 2014. Der Revisionsvorschlag von 2022 der Europäische Kommission zur F-Gase-Verordnung 517/2014 enthält auch Verböte zur Verwendung von SF₆ in neuen elektrischen Schaltanlagen. Eine mögliche Annahme dieser Verbötsvorschläge wird wie die vorgeschlagene Verschärfung des HFKW-Phase-Downs nicht im MMS, sondern im MWMS berücksichtigt.

Die Treibhausgasminderungswirkung der SF₆-Verböte tritt aufgrund der langen Lebensdauer der meisten SF₆-haltigen Geräten und Produkten überwiegend erst mit jahrzehntelanger Verzögerung auf und wird basierend auf Gschrey und Schwarz (2011) im Zeitverlauf mit etwa 0,5 – 4 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr abgeschätzt.

SF₆-Selbstverpflichtung der deutschen Wirtschaft

In der Selbstverpflichtung der SF₆-Produzenten und der Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln >1 kV (VDN; VIK; ZVEI; Solvay 2005) sind eine Reihe von Emissionsbegrenzungsmaßnahmen für SF₆ festgelegt. Für die Modellierung im MMS wurden die seit 2005 erreichten Fortschritte bei der Reduktion der spezifischen Emissionen bei der Befüllung, Wartung und Entsorgung von SF₆-haltigen Schaltanlagen berücksichtigt.

Flankierende Instrumente

Folgende flankierende Instrumente sind Teil des Instrumentenmixes zur Dekarbonisierung von Industrie und GHD, wirken aber oft indirekter oder mittelbarer auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen oder sind in ihrer direkten Minderungswirkung eher gering und werden daher nicht separat quantifiziert.

- ▶ Systematisches Klimamanagement in Unternehmen auf Grundlage von EMAS
- ▶ Öffentliche Beschaffung energieeffizienter Produkte
- ▶ KfW-Umweltprogramm, BMU-Umweltinnovationsprogramm zur Förderung von Demonstrationsvorhaben
- ▶ Stärkung der Forschung für energieeffiziente und ressourcenschonende Industrieprozesse
- ▶ Neue Konstruktionstechniken und Werkstoffe für eine emissionsarme Industrie
- ▶ Verabschiedung Verpackungsgesetz und Novellierung Gewerbeabfallverordnung
- ▶ Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie
- ▶ Aufbau und Betrieb von kommunalen Energieeffizienznetzwerken
- ▶ Förderung von „Energieeffizienzmanagern“ zur Hebung von Potenzialen z. B. in Gewerbegebieten
- ▶ Initiativen zur Förderung der Ressourceneffizienz

- ▶ Flankierende Maßnahmen aus der EffSTRA
- ▶ Weiterentwicklung der Energieeffizienz-Netzwerke
- ▶ Effizienzanalyse-Tools für Energieaudits
- ▶ Förderung der Prozesswärmeeffizienz und der Nutzung von Abwärmepotenzialen
- ▶ FONA - Forschung Für Nachhaltigkeit - Strategie des BMBF
- ▶ Förderprogramm Industrielle Bioökonomie
- ▶ "Superabschreibungen" für Klimaschutz

5.2.1.2 MWMS

Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren – Budgetaufstockung EU-Innovationfonds

Im Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS) wird das Budget des EU-ETS-Innovationsfonds (im Instrumentenbündel "Programme zur Förderung der Markteinführung CO₂-armer Herstellungsverfahren") in Summe um 1,375 Mrd. € (von 5,59 Mrd. € auf 6,965 Mrd. €) aufgestockt – die Änderung wird zwischen 2030 und 2040 durch eine Erhöhung von jährlich 0,29 Mrd. € auf 0,415 Mrd. € umgesetzt. Dabei wird im MWMS angenommen, dass entsprechend des Vorschlags der EU-Kommission eine Erhöhung der in den Innovationsfonds fließenden Zertifikate umgesetzt wird. Vorgesehen sind 50 Mio. zusätzliche Zertifikate aus freier Zuteilung und CBAM sowie 150 Mio. Zertifikate durch Versteigerungen aus dem ETS II. Die Aufstockung erhöht die Wirkung des Instruments proportional. Aufgrund der vergleichsweise geringen Erhöhung (2 % der Gesamtsumme der Förderprogramme) wurde in der Modellierung darauf verzichtet, die Wirkung auf den Zeitraum der tatsächlichen Aufstockung zu beschränken.

Leitmärkte für klimafreundliche Produkte

Die Etablierung von Leitmärkten für klimafreundliche Produkte kann ein Instrument sein, das Herstellern erlaubt, bereits kurz- bis mittelfristig klimafreundliche Produkte zu höheren Preisen abzusetzen und so Investitionen in klimafreundliche Technologien beschleunigen. Die Maßnahme fasst verschiedene einzelne Instrumente zusammen, welche unterschiedliche Hebel adressieren, um Märkte für klimafreundliche Produkte zu schaffen. Dazu zählen u.a.:

- ▶ Eine Kennzeichnung für klimafreundliche Grundstoffe
- ▶ Öffentliche Beschaffung
- ▶ Mindeststandards im Rahmen der EU-Ökodesign-Richtlinie

In der Modellierung werden Leitmärkte umgesetzt, indem ein Teil der im MMS noch über Förderbudget in den Markt gebrachten Mengen an wasserstoffbasierter Direktreduktion im MWMS keine Förderung benötigen – sie erlösen die Differenzkosten in den Leitmärkten. Das freiwerdende Budget wird auf andere Verfahren – maßgeblich Elektrifizierung von Prozesswärme – verteilt. Die entstehende Minderungsmenge entspricht 2030 etwa 2,3 Mt wasserstoffbasierter

Stahlerzeugung⁴⁶ oder der Elektrifizierung von 18 TWh Erdgasbedarf zur Prozesswärmerzeugung⁴⁷. Bis 2040 variiert die Wirkung durch Interaktion mit bereits im MMS stattfindender Transformation (Energieeffizienz, Wechsel der Produktionsverfahren und Elektrifizierung).

Diese Modellierung geht davon aus, dass über Förderinstrumente begünstigte Produkte die Leitmärkte nicht bedienen. Wäre dies in nennenswertem Umfang der Fall, müsste die Wirkung dieses Instruments anteilig reduziert sein (bis hin zu keiner zusätzlichen Wirkung bei vollständiger Übereinstimmung).

Digitale Ökosysteme für eine klimafreundliche Industrie

Die branchenübergreifende Digitalisierung von Lieferketten und der Aufbau von digitalen Ökosystemen ermöglicht neuartige Industrie 4.0 Anwendungen und Geschäftsmodelle. Durch diese multilateralen und vertrauenswürdigen Datenökosystemen sollen skalierbare, automatisierte und flächendeckende Anwendung von datenbasierten Lösungen zur Hebung von Energie- und Ressourceneinsparpotentialen auch über Unternehmensgrenzen hinweg ermöglicht werden. Das Programm soll so den Unternehmen unter anderem ermöglichen, über entsprechende datenbasierte Lösungen den CO₂-Fußabdruck entlang ganzer Lieferketten transparent abzubilden und zu steuern.

Es wird die Bewertung für die Erstellung des KSSP der Bundesregierung zugrunde gelegt, die für das Programm eine Wirkung von 1,59 Mio. t CO₂/a im Jahr 2030 bei verfügbaren Mitteln von 550 Mio. Euro ermittelt. Die weitere Entwicklung wird anteilig fortgeschrieben, insbesondere wird gegenüber 2030 keine grundsätzliche Ausweitung durch dieses Instrument angenommen.

Verschärfung des HFKW-Phase-Down gemäß Vorschlag der EU-Kommission (2022) zur Revision der EU F-Gas Verordnung 517/2014

Für das MWMS wird die Verschärfung des HFKW-Phase-down berücksichtigt, wie ihn die Europäische Kommission in ihrem Revisionsvorschlag vom April 2022 (Europäische Kommission 2022) zur F-Gase-Verordnung 517/2014 vorgeschlagen hat. Die Details einer Einigung zwischen Europäischem Rat, Parlament und Kommission für eine Revision der Verordnung stehen aktuell (Sommer 2023) wegen des noch andauernden Verhandlungsprozesses noch nicht fest.

Für die Modellierung im MWMS werden aus den Modellierungsarbeiten im Kontext der Revision der EU-F-Gase-Verordnung (Gschrey et al. 2022) die EU-weiten Emissionstrends im *Proportionate Action Scenario (Option 2)* der Folgenabschätzung zur Revision der F-Gas-Verordnung (EC 2022c) auf Deutschland übertragen.

Inverkehrbringungsverbote für SF₆ in elektrischen Schaltanlagen

Für das MWMS wird aus dem aktuell (Sommer 2023) noch in Verhandlung befindlichen Revisionsvorschlag der Europäischen Kommission vom April 2022 (Europäische Kommission 2022) zur F-Gase-Verordnung 517/2014 außerdem noch die dort vorgeschlagenen schrittweise EU-weite Einführung von Inverkehrbringungsverböten für mit SF₆ befüllten Schaltanlagen berücksichtigt.

Für die Modellierung im MWMS werden die relevanten Parameter wie Wachstumsraten des Marktes für Schaltanlagen, Lebensdauern der Anlagen, Emissionsraten zum Ende der Lebenszeit sowie Anteile von SF₆ an Neuanlagen aus den Modellierungsarbeiten im Kontext der Revision der EU-F-Gase-Verordnung (Gschrey et al. 2022) übernommen.

⁴⁶ Minderung etwa 1,6 t CO₂-Äq./t_{Stahl}

⁴⁷ Minderung etwa 0,2 Mio. t CO₂-Äq./TWh

5.2.2 Instrumentenwirkung

Aufbauend auf den Beschreibungen der einzelnen Instrumente und deren Bündelung für die Modellierung und Bewertung, erfolgt hier die Beschreibung ihrer Wirkungen (Tabelle 69 bis Tabelle 72). Darin wird – ausgehend von der Gesamtwirkung wie dargestellt in Abbildung 30 und Tabelle 63 die anteilige Wirkung der Instrumente bewertet.

Dabei werden einige Instrumente mit ähnlichen Wirkmechanismen zusammengefasst. Die Methodik der Modellierung, Bewertung und Zusammenfassung ist in den jeweiligen Instrumentenbeschreibungen hinterlegt.

Treibhausgasemissionen

Die Minderungswirkung der Instrumente auf die Treibhausgasemissionen der Industrie sowie die verbleibenden Mengen in MMS und MWMS sind in Tabelle 69 dargestellt. Sie ist folgendermaßen zu lesen (Ablesebeispiel):

2030 belaufen sich die Treibhausgasemissionen im MMS auf 127,1 Mio. t CO₂-Äq. (Zeile "MMS"). Zu dieser Gesamtsumme trägt der EU-Emissionshandel eine Minderungswirkung gegenüber einem kontrafaktischen Szenario ohne die jeweilige Maßnahme von 12,7 Mio. t CO₂-Äq. bei, die CO₂-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme 0,9 Mio. t CO₂-Äq., die MAC-Richtlinie (Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen) 5,5 Mio. t CO₂-Äq., der HFKW-Phasedown gemäß EU-F-Gase-Verordnung 517/2014 5,5 Mio. t CO₂-Äq., SF₆-Verbote gemäß EU-F-Gase-Verordnung 517/2014 3,9 Mio. t CO₂-Äq., SF₆-Selbstverpflichtung der Deutschen Wirtschaft 1,1 Mio. t CO₂-Äq., die Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren 24,4 Mio. t CO₂-Äq., das Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB) 2,0 Mio. t CO₂-Äq. und eine Vielzahl von Energieeffizienzinstrumenten 20,4 Mio. t CO₂-Äq.

Die Treibhausgasemissionen des MWMS belaufen sich im Jahr 2030 auf 120,5 Mio. t CO₂-Äq. Zur Differenz zum MMS trägt die Budgetaufstockung EU-Innovationfonds 0,8 Mio. t CO₂-Äq. bei, die Leitmärkte für klimafreundliche Produkte 3,6 Mio. t CO₂-Äq., die Digitale Ökosysteme für eine klimafreundliche Industrie 1,6 Mio. t CO₂-Äq. und weitere F-Gas-bezogene Maßnahmen 0,7 Mio. t CO₂-Äq.

Tabelle 69: Minderungswirkung der Instrumente auf die Treibhausgasemissionen im Industriesektor für MMS und MWMS (ggü. kontrafaktischer Entwicklung)

Treibhausgasemissionen und -Minderungen* [Mio. t CO ₂ -Äq.]	2025	2030	2035	2040	2045	2050
EU-Emissionshandel	4,4	12,7	17,0	21,5	24,3	28,3
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)	0,3	0,9	1,7	2,9	5,2	7,6
MAC-Richtlinie (Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen)	4,1	5,5	5,9	5,8	5,7	5,5
HFKW-Phase-Down gemäß EU-F-Gase-Verordnung 517/2014	4,6	5,5	6,4	7,5	8,1	8,6
SF ₆ -Verbote gemäß EU-F-Gase-Verordnung 517/2014	2,3	3,9	4,2	4,1	4,1	4,1
SF ₆ -Selbstverpflichtung der Deutschen Wirtschaft	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6
EU-Innovationsfonds	0,1	2,0	3,9	4,9	5,4	5,3
Förderprogramme Dekarbonisierung in der Industrie* und Klimaschutzverträge	1,0	21,1	40,3	51,3	56,3	54,9

Treibhausgasemissionen und -Minderungen* [Mio. t CO₂-Äq.]	2025	2030	2035	2040	2045	2050
IPCEI Wasserstoff	0,1	1,3	2,5	3,2	3,5	3,4
Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)	0,6	2,0	2,1	2,2	2,2	2,1
EEG-Umlagesenkung						
Spitzenausgleich im Rahmen des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG)						
Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (Zuschuss und Kredit / Förderwettbewerb)						
Kälte-Klima-Richtlinie						
Nationale Klimaschutzinitiative (NKI): Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen						
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie	13,0	20,4	22,1	23,2	22,9	22,5
Energieberatung Mittelstand						
Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz						
Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke						
Pilotprogramm Einsparzähler						
Energieauditpflicht für Nicht-KMU						
KfW-Effizienzprogramm – Produktionsanlagen/prozesse						
Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft						
Treibhausgasemissionen des Sektors im MMS	169,8	127,1	91,8	72,0	63,0	58,2
Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren – Budgetaufstockung EU-Innovationfonds	0,0	0,8	1,3	1,1	1,1	1,3
Leitmärkte für klimafreundliche Produkte	2,3	3,6	2,9	2,2	1,9	2,4
Digitale Ökosysteme für eine klimafreundliche Industrie (Reduktion inkl. Strommaßnahmen)	0,5	1,6	1,9	2,1	2,2	2,3
Verschärfter HFKW-Phase-Down gemäß Vorschlag der EU-Kommission (2022) zur Revision der EU-F-Gase-Verordnung 517/2014	0,1	0,6	1,0	1,0	1,0	1,1
Inverkehrbringungsverbote für SF ₆ in elektrischen Schaltanlagen	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3
Treibhausgasemissionen des Sektors im MWMS	166,9	120,5	84,6	65,4	56,5	50,9

*Positive Werte: Treibhausgasemissionen sinken durch das Instrument (es wird also die Minderungswirkung angegeben)

Quelle: eigene Modellierung Fraunhofer ISI

Strombedarf

Die Wirkung der Instrumente auf den Strombedarf der Industrie in MMS und MWMS sind in Tabelle 70 dargestellt. Die Instrumente, die vorwiegend auf eine Beschleunigung des Effizienzfortschrittes abzielen zeigen sämtliche Stromeinsparungen. Andere Instrumente, wie der ETS, das BEHG oder die Technologieförderprogramme resultieren in deutlicher Steigerung des Stromverbrauchs durch angestoßene Investitionen in die Elektrifizierung der Prozesswärme. Diese Elektrifizierung überkompensiert die Effizienzeinsparungen, weshalb der gesamte Stromverbrauch der Industrie bis 2050 kontinuierlich ansteigt.

Tabelle 70: Wirkung der Instrumente auf den Strombedarf im Industriesektor für MMS und MWMS (ggü. kontrafaktischer Entwicklung)

Strombedarf und -Einsparungen* [TWh]	2025	2030	2035	2040	2045	2050
EU-Emissionshandel	-4,3	-13,3	-18,8	-24,2	-28,1	-31,4
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)	-0,1	-0,6	-1,5	-2,1	-3,8	-5,4
EU-Innovationsfonds	-0,2	-1,3	-2,7	-3,6	-3,5	-3,3
Förderprogramme Dekarbonisierung in der Industrie* und Klimaschutzverträge	-2,1	-13,8	-28,1	-37,5	-35,8	-34,2
IPCEI Wasserstoff	-0,1	-0,8	-1,7	-2,3	-2,2	-2,1
EEG-Umlagesenkung						
Spitzenausgleich im Rahmen des Energiesteuerge- setzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG)						
Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffi- zienz in der Wirtschaft (Zuschuss und Kredit / För- derwettbewerb)						
Kälte-Klima-Richtlinie						
Nationale Klimaschutzinitiative (NKI): Kommunal- richtlinie investive Maßnahmen						
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtli- nie	22,2	31,6	34,8	35,5	36,1	34,8
Energieberatung Mittelstand						
Mittelstandsinitiative Energiewende und Klima- schutz						
Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke						
Pilotprogramm Einsparzähler						
Energieauditpflicht für Nicht-KMU						
KfW-Effizienzprogramm – Produktionsanlagen/pro- zesse						

Strombedarf und -Einsparungen* [TWh]	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft						
MMS	229,6	242,9	261,9	281,2	286,4	290,5
Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren – Budgetaufstockung EU-Innovationfonds	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-0,9	-0,8
Leitmärkte für klimafreundliche Produkte	-0,8	-2,5	-4,7	-8,4	-6,5	-3,4
MWMS	230,4	245,7	267,3	290,5	293,8	294,7

*Positive Werte: Strombedarf sinkt durch das Instrument (es wird also die Minderungswirkung angegeben)

Quelle: eigene Modellierung Fraunhofer ISI

Brennstoffbedarf

Die Wirkung der Instrumente auf den Brennstoffbedarf der Industrie in MMS und MWMS sind in Tabelle 71 dargestellt. Brennstoffe sind hier als gesamter Endenergieverbrauch abzüglich Strom definiert. Insgesamt sinkt der Brennstoffbedarf bis 2050 deutlich. Dies ist sowohl auf Effizienzsteigerungen sowie auf die Elektrifizierung der Prozesswärme zurückzuführen, welche Erdgas, Kohle und Heizöl ersetzt.

Tabelle 71: Wirkung der Instrumente auf den Brennstoffbedarf im Industriesektor für MMS und MWMS (ggü. kontrafaktischer Entwicklung)

Brennstoffbedarf und -Einsparungen* [TWh]	2025	2030	2035	2040	2045	2050
EU-Emissionshandel	4,8	17,0	25,2	33,2	38,0	42,6
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)	0,3	1,4	3,2	5,6	10,2	14,3
EU-Innovationsfonds	0,3	2,1	3,8	4,6	4,5	4,1
Förderprogramme Dekarbonisierung in der Industrie* und Klimaschutzverträge	3,4	21,7	39,3	47,9	46,5	42,7
IPCEI Wasserstoff	0,2	1,3	2,4	3,0	2,9	2,6
Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)	2,8	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9
EEG-Umlagesenkung						
Spitzenausgleich im Rahmen des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG)						
Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (Zuschuss und Kredit / Förderwettbewerb)	58,8	110,2	126,4	132,2	133,5	128,7
Kälte-Klima-Richtlinie						
Nationale Klimaschutzinitiative (NKI): Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen						

Brennstoffbedarf und -Einsparungen* [TWh]	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie						
Energieberatung Mittelstand						
Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz						
Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke						
Pilotprogramm Einsparzähler						
Energieauditpflicht für Nicht-KMU						
KfW-Effizienzprogramm – Produktionsanlagen/prozesse						
Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft						
MMS	419,6	350,4	302,5	278,3	273,5	273,2
Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren – Budgetaufstockung EU-Innovationfonds	0,1	0,5	0,9	1,1	1,1	1,0
Leitmärkte für klimafreundliche Produkte	3,0	6,9	9,9	12,9	11,1	8,3
Digitale Ökosysteme für eine klimafreundliche Industrie	1,1	3,9	4,7	5,3	5,5	5,6
MWMS	415,3	339,0	287,0	259,0	255,8	258,2

* Positive Werte: Brennstoffbedarf sinkt durch das Instrument (es wird also die Minderungswirkung angegeben)

Quelle: eigene Modellierung Fraunhofer ISI

Endenergiebedarf

Die Wirkung der Instrumente auf den Endenergiebedarf der Industrie in MMS und MWMS sind in Tabelle 72 dargestellt.

Tabelle 72: Wirkung der Instrumente auf den Endenergiebedarf im Industriesektor für MMS und MWMS (ggü. kontrafaktischer Entwicklung)

Endenergiebedarf und -Einsparungen* [TWh]	2025	2030	2035	2040	2045	2050
EU-Emissionshandel	0,3	3,2	5,7	7,5	8,1	8,4
CO ₂ -Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)	0,0	0,1	0,2	0,5	1,0	1,2
Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren	0,1	3,0	5,0	4,9	6,4	5,2
EU-Innovationsfonds	0,0	0,2	0,4	0,4	0,5	0,4
Förderprogramme Dekarbonisierung in der Industrie* und Klimaschutzverträge	0,1	2,6	4,4	4,2	5,5	4,5
IPCEI Wasserstoff	0,0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)	2,8	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9
EEG-Umlagesenkung	85,6	130,4	135,3	134,7	134,7	134,7

Endenergiebedarf und -Einsparungen* [TWh]	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Spitzenausgleich im Rahmen des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) und des Stromsteuergesetzes (StromStG)						
Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (Zuschuss und Kredit / Förderwettbewerb)						
Kälte-Klima-Richtlinie						
Nationale Klimaschutzinitiative (NKI): Kommunalrichtlinie investive Maßnahmen						
Mindesteffizienzstandards – EU Ökodesign-Richtlinie						
Energieberatung Mittelstand						
Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz						
Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke						
Pilotprogramm Einsparzähler						
Energieauditpflicht für Nicht-KMU						
KfW-Effizienzprogramm – Produktionsanlagen/prozesse						
Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft						
MMS	703,5	653,7	626,4	623,1	626,0	632,1
Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren – Budgetaufstockung EU-Innovationfonds	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Leitmärkte für klimafreundliche Produkte	1,0	2,0	2,6	2,6	3,3	4,1
Digitale Ökosysteme für eine klimafreundliche Industrie	0,5	1,7	2,4	3,1	4,0	4,7
MWMS	702,1	649,9	621,3	617,3	618,6	623,1

*Positive Werte: Endenergiebedarf sinkt durch das Instrument (es wird also die Minderungswirkung angegeben)

Quelle: eigene Modellierung

5.3 Sektorspezifische Parameter & Annahmen

Dieser Abschnitt enthält weitere Informationen über die Vorgehensweise der Instrumentenbewertung. Dazu gehören für die Modellierung wichtige Annahmen und Zwischenergebnisse, die die Berechnung der Instrumentenwirkung plausibilisieren und nachvollziehbarer machen.

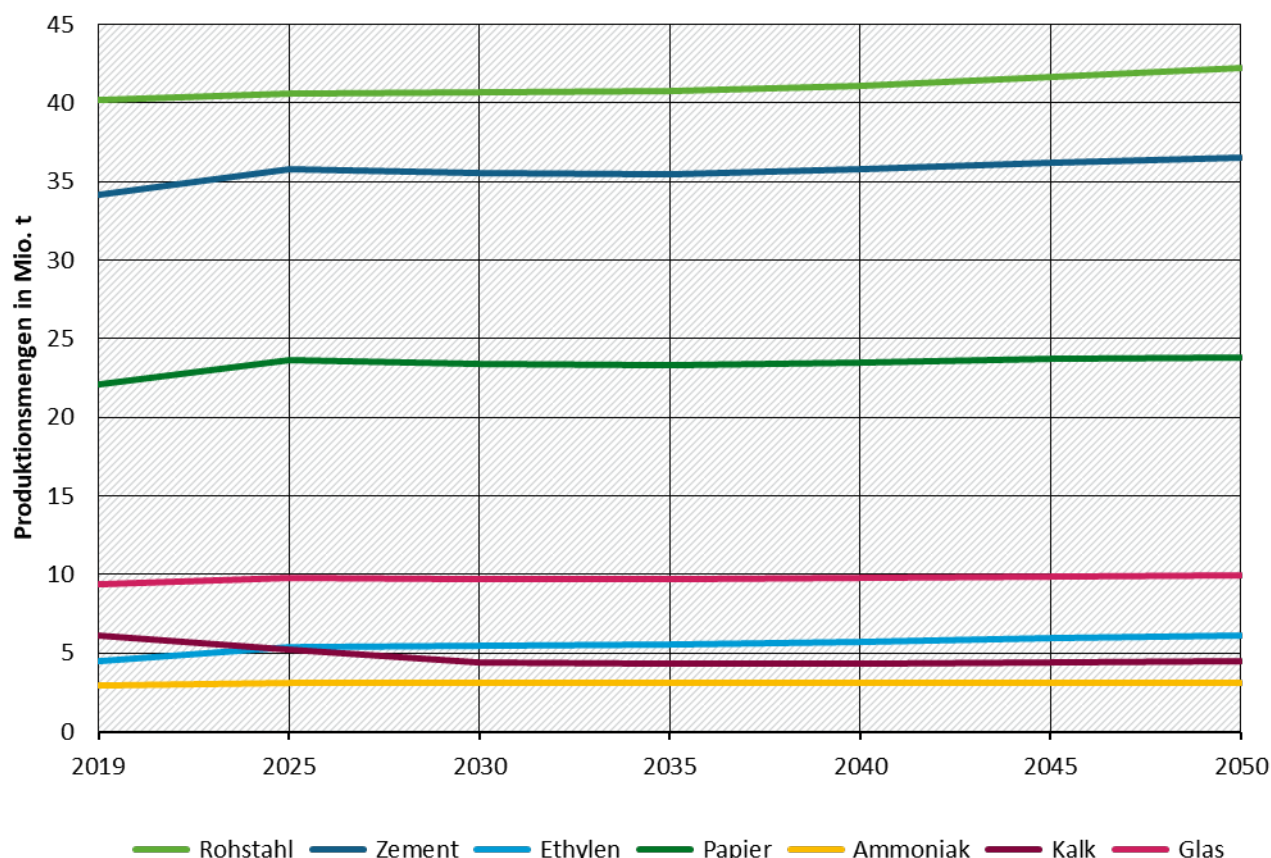
5.3.1 Annahmen zu Preiserwartungen/Preisvoraussicht

Für die Modellierung der auf Preissignalen basierenden Reaktionen von Marktteilnehmern kann der unterstellte Planungshorizont von Bedeutung sein. Dies betrifft vor allem Preisbestandteile, die sich im Modellierungszeitraum stark verändern – hier trifft dies insbesondere auf die Höhe der CO₂-Bepreisung im EU ETS zu. Vollständig rational handelnde Marktteilnehmende würden nicht nur auf den aktuell vorliegenden Preis blicken, sondern eine Erwartung über die gesamte Lebensdauer der Entscheidung (z.B. Investition in Produktionsanlagen) formulieren. Die Erwartung eines steigenden CO₂-Preises könnte so Investitionen in CO₂-arme Technologien attraktiver

machen. Am Beispiel des BEHG wurde dies kürzlich für mehrere Sektoren untersucht (Öko-Institut et al. 2022). Für die vorliegende Modellierung wurde keine verstärkte Preisvoraussicht angenommen – die Investierenden agieren daher auf Basis der ihnen jeweils zum Investitionszeitpunkt vorliegenden Informationen. Dies ist zum einen aufgrund eines fehlenden konkreten Instruments angenommen. Zum anderen wirken die zentralen Instrumente der Klimaschutzverträge auf die tatsächlichen Differenzkosten – nicht die erwarteten. Eine Verschneidung dieser Perspektiven ist möglich, aber in dieser Modellierung nicht enthalten. Insofern sind potenzielle Minderungen durch eine erhöhte Planungssicherheit und Transparenz bezüglich zukünftiger Preisentwicklungen (insbesondere der CO₂-Bepreisung) unterbewertet.

5.3.2 Annahmen zur Entwicklung der Produktionsmengen

Entsprechend der Methodik der Modellierung mit FORECAST (Anhang A.4.2) bilden die Annahmen zur Entwicklung der physischen Produktionsmengen (also z.B. Mt Rohstahl, Zement und Ethylen) wichtige Grundlagen für die entstehenden Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen. Sie bilden die Basis, auf der die modellierten Instrumente ihre Wirkung entfalten (Abbildung 34). Grundlegende Annahme für diese Entwicklung ist, dass bis 2025 der 2020 beobachtbare Rückgang der Produktion (vorrangig Stahl, Glas und Papier) ausgeglichen und die Mengen auf dem Niveau von 2018/2019 stagnieren oder leicht zunehmen. Das Gerüst der Produktionsmengen setzt sich aus einer Vielzahl an Quellen – oft einzeln je Produkt – zusammen. Sie werden hier nicht im vollen Umfang angegeben. Quellen wichtiger Produkte sind World Steel Association für Stahl, USGS für Nicht-Eisen-Metalle, FAO für Papier, VCI für Chemie und Odyssee sowie VDZ für Zement. Das in den Rahmendaten (Mendelevitch et al. 2022) dargestellte Wachstum findet überwiegend in weiterverarbeitenden Subsektoren (Maschinenbau, Fahrzeugbau, Metallbearbeitung und sonstige) statt. Die Kalkproduktion sinkt aufgrund des Ausstiegs aus der Kohleverstromung. Die Umstellung der Stahlproduktion hat darauf ebenso einen Einfluss, dieser ist aber aufgrund mangelnder Betriebserfahrung noch unsicher.

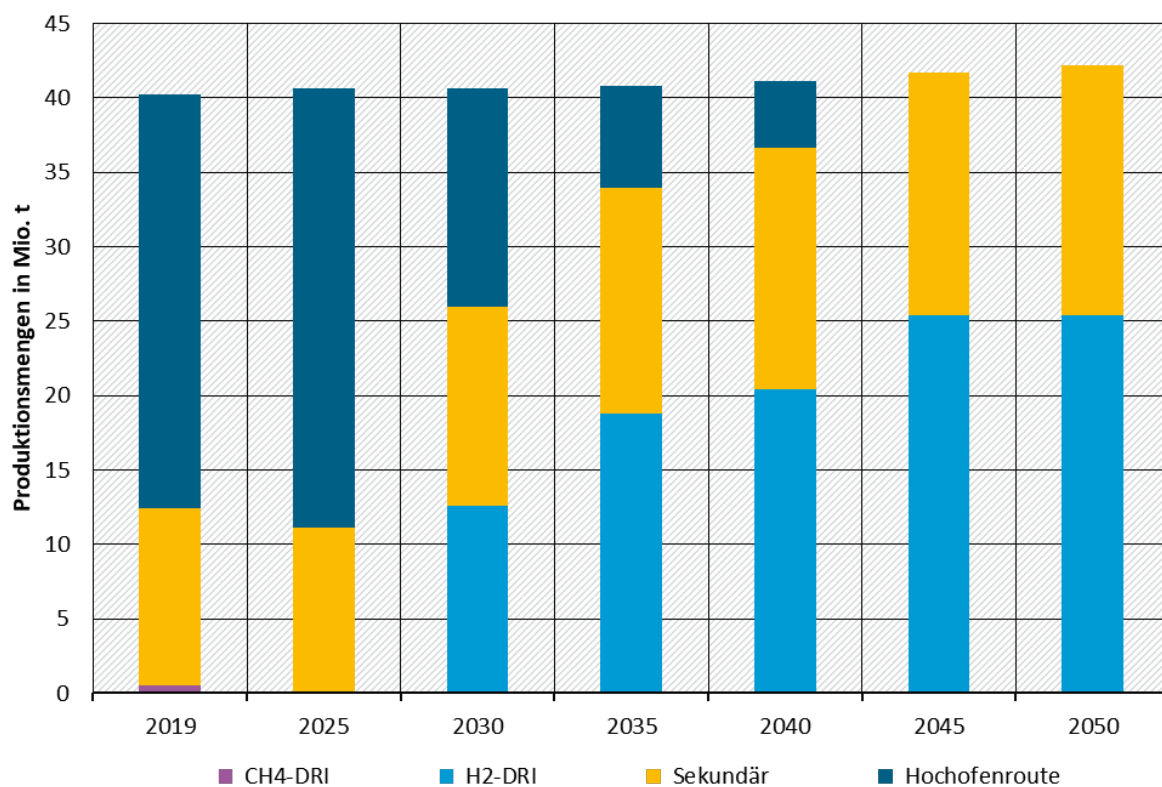
Abbildung 34: Annahmen zu Produktionsmengen ausgewählter Produkte

Quelle: Fraunhofer ISI

5.3.3 Neue Produktionsverfahren: Diffusion und Differenzkosten

Für die Bewertung der Förderprogramme Dekarbonisierung in der Industrie und Klimaschutzverträge entsteht in der Modellierung eine wichtige abgeleitete Größe: die Diffusion CO₂-armer Produktionsverfahren in energieintensiver Grundstoffproduktion. Diese wird als physische Produktionsmenge angegeben und ist eine Folge der zur Schließung der Differenzkosten eingesetzten Budgets. Wichtige Herausforderungen der Umsetzung sind neben großräumigen Fragestellungen wie Stromnetzausbau, Aufbau von Wasserstoff- und CO₂-Infrastruktur, Fachkräfteverfügbarkeit auch kleinteilige und in dieser Modellierung nicht erfasste Bedingungen an den individuellen Standorten (Netzanschluss, verfügbarer Bauplatz, Logistik des Umbaus, bis hin zur Verfügbarkeit von Spezialmaschinen). Sinngemäß treffen diese potenziellen Limitierungen auf alle Technologien zu und sie sollten ein Fokus der begleitenden Forschung der nächsten Jahre sein.

Im Subsektor „Metallerzeugung“ (Eisen- und Stahlherstellung) sind im MMS zwei Strategien zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen zentral (Abbildung 35): Die Ausweitung der Sekundärroute und damit der Kreislaufwirtschaft und die Substitution der weiterhin benötigten primären Erzeugung durch neue, wasserstoffbasierte Direktreduktionsverfahren. Diese ersetzen die im bisherigen Verfahren der Hochofenroute notwendigen Koks-kohle. Im MMS sinkt bis 2030 die konventionelle Primärproduktion gegenüber 2018 um 50 % auf 15 Mt. Bis 2045 ist sie vollständig ersetzt. Diese Entwicklung beschreibt eine ambitionierte Umsetzung sowohl der bereits angekündigten als auch weiterer, durch die Bereitstellung der Fördermittel angereizte vorgezogene Umstellung von Hochofenkapazitäten. Sie ist damit sehr zentral vom Erfolg der begonnenen Projekte abhängig – und nicht grundsätzlich vom verfügbaren Förderbudget, sondern von der Umsetzung (s.o.) limitiert.

Abbildung 35: Verfahren der Rohstahlerzeugung bis 2050 im MMS und MWMS

Quelle: Fraunhofer ISI

Im Subsektor "Verarbeitung von Steinen und Erden", der maßgeblich durch die Zement- und Kalkherstellung bestimmt wird, wird der Treibhausgasausstoß (neben der Reduktion der Produktionsmenge von Kalk) durch den Einsatz von CO₂-Abscheidung und Einspeicherung verringert (Abbildung 36)⁴⁸. Bis 2030 betrifft dies relativ geringe Mengen (1,3 Mio. t CO₂-Äq.), bis 2040 nimmt die Abscheidung stark zu und erreicht 10,1 Mio. t CO₂-Äq. Dabei werden vorrangig prozessbedingte Treibhausgasemissionen adressiert (2030: knapp 10 % der prozessbedingten Treibhausgasemissionen des Subsektors), energiebedingte Treibhausgasemissionen werden aber miterfasst (auch 2030 sind noch etwa ein Drittel der Treibhausgasemissionen des Subsektors energiebedingt).

⁴⁸ Der entstehende Strombedarf für die Abscheidung wird im Umwandlungssektor als Bedarf berücksichtigt und die entstehenden Treibhausgasemissionen dort als Aggregat mit denen aus der sonstigen Stromnachfrage berechnet.

Abbildung 36: CO₂-Abscheidung in MMS und MWMS

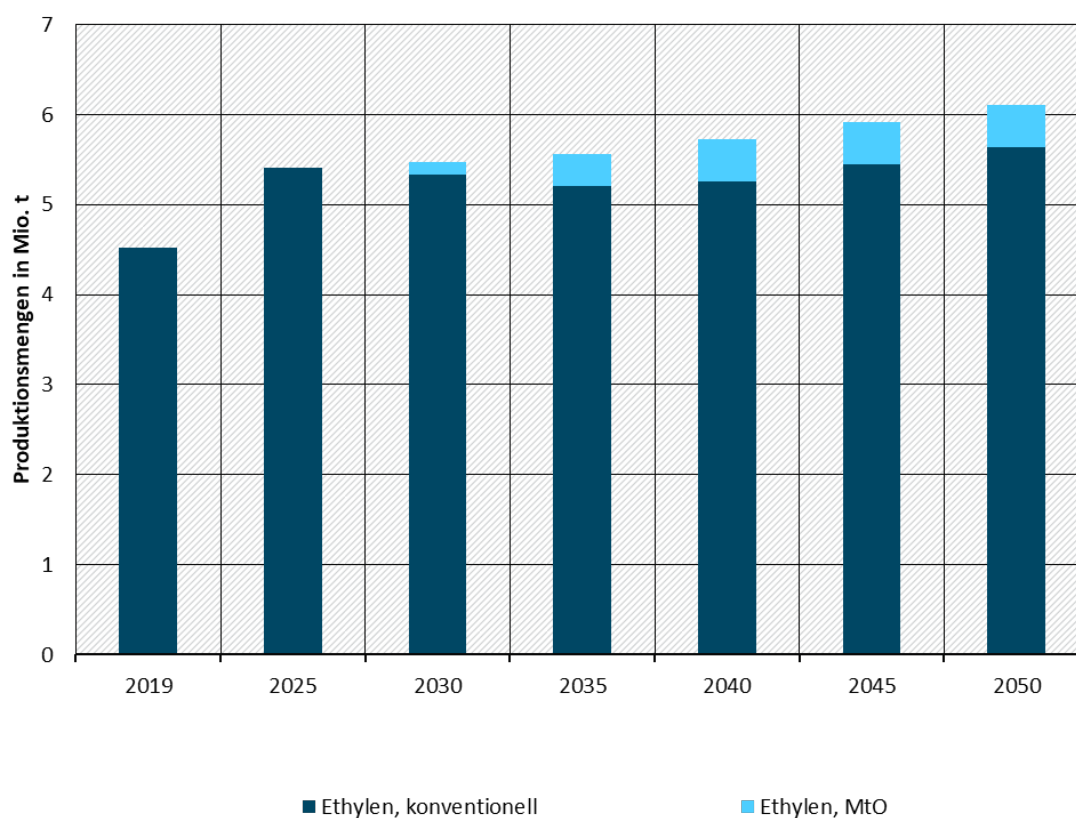
Quelle: Fraunhofer ISI

Im Subsektor "Grundstoffchemie" ist die wasserstoffbasierte Herstellung von Olefinen und Aromaten ein wichtiges Verfahren, um die Nutzung von fossilen Rohstoffen zu reduzieren. In der verwendeten Modellierung wird von der Methanol-zu-Olefin-Route (MtO, Bazzanella und Ausfelder (2017)) ausgegangen und aufgrund der im konventionellen Verfahren gekoppelten Produktion die Menge an Ethylen als Indikator verwendet (Abbildung 35). Der maßgebliche Kostenfaktor der wasserstoffbasierten Verfahren ist die Nutzung von Wasserstoff als Rohstoff – dies ist unabhängig vom konkreten Verfahren. Im MMS spielt die Umstellung der Verfahren allerdings erst ab 2030 eine Rolle. Dies hat mehrere Gründe. Die Vermeidungskosten sind aufgrund des hohen Wasserstoffbedarfs vergleichsweise hoch – insbesondere höher als alternative Vermeidungsoptionen wie Elektrifizierung der Prozesswärmeerzeugung (siehe Abbildung 38) und CCS. Eine für stärkere Diffusion der Technologie notwendige Förderung würde das verfügbare Budget sehr schnell aufbrauchen. Darüber hinaus ist die Verfügbarkeit von Wasserstoff jedenfalls bis 2030 und vermutlich darüber hinaus limitiert. Schließlich wirken die durch die Vermeidung fossiler Rohstoffe entstehenden Treibhausgasemissionsminderungen aufgrund ihrer Bilanzierung nicht bzw. nur indirekt im Industriesektor. Die verfügbaren Förderbudgets wurden daher in der Modellierung nur insofern für die Schließung der Differenzkosten dieser Verfahren eingesetzt, um ab 2030 Produktionsmengen darzustellen, die Pilot- oder Demonstrationsanlagen entsprechen könnten und so den Einstieg in die Technologie ermöglichen. Trotz der geringen Produktionsmenge und geringer Investitionen erzeugen hohe Differenzen der laufenden Kosten (Wasserstoff ist als Substitution des fossilen Naphthas drei- bis viermal so teuer) hohe Budgetbedarfe. zwischen 2020 und 2040 werden etwa 36 % (24,5 Mrd. €) des verfügbaren Budgets der Förderprogramme für diese Verfahren aufgewendet. Diese Kosten fallen zwar weit überwiegend (zu 90 %) nach 2030 an – wenn viele andere Vermeidungsoptionen aufgrund des steigenden CO₂-Preises nur noch geringere Förderungen benötigen. Allerdings zeigen diese Verhältnisse, dass die dauerhafte Subventionierung hoher Wasserstoffpreise die Möglichkeiten der angenommenen Budgets übersteigt.

Die wasserstoffbasierte Chemie benötigt neben Wasserstoff auch Kohlenstoff. Dieser wird im vorliegenden Konzept vorrangig über abgeschiedene (sonst nicht oder schwer vermeidbare) CO₂-Mengen gedeckt (siehe Abbildung 36). Dabei wird die Nutzung (CCU) von abgeschiedenem CO₂ als vorrangig betrachtet – aufgrund der hohen Differenzkosten für die potenzielle Senke (die wasserstoffbasierten Chemieprodukte) wird aber tatsächlich nur ein geringerer Teil (2030 etwa 440 kt CO₂, 2050 etwa 1600 kt CO₂)⁴⁹ der abgeschiedenen Emissionen in MMS und MWMS genutzt.

Dadurch ist der Großteil der Rohstoffnutzung der Grundstoffchemie im MMS auch 2045 noch fossil. Weitere Instrumente, um deren Umstellung voranzutreiben, sind notwendig.

Abbildung 37: Verfahren der Ethylenherstellung bis 2050 im MMS



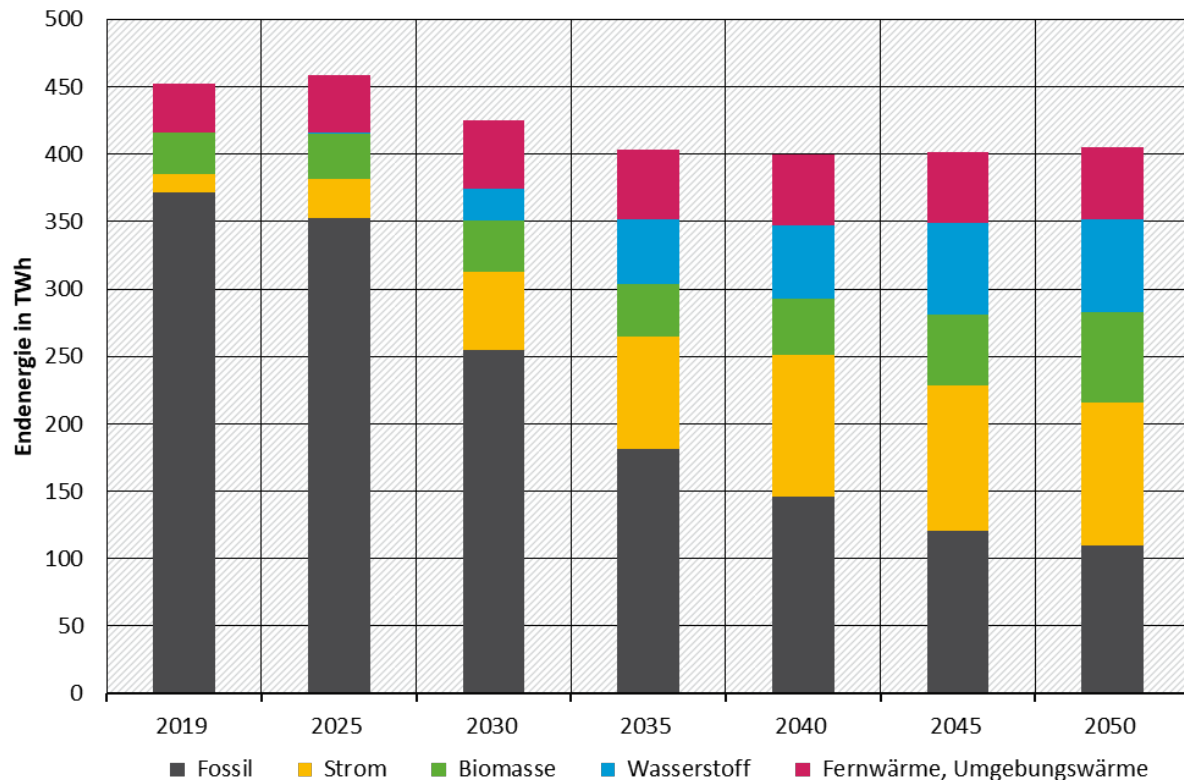
Quelle: Fraunhofer ISI

Die industriell genutzte Prozesswärme wird im MMS bis 2030 und darüber hinaus stark elektrifiziert (Abbildung 38). Bis 2030 steigt der Anteil der direkten Stromnutzung von 3 % (14 TWh) auf 14 % (58 TWh). Zusätzlich werden in Hochtemperaturwärmepumpen etwa 16 TWh Umgebungs- bzw. Abwärme genutzt. Diese Entwicklung wird maßgeblich durch steigende CO₂-Preise in Kombination mit zugewiesenen Budgets der Förderprogramme zur Abdeckung der Differenzkosten zu fossiler Prozesswärmeerzeugung getrieben. Von den zwischen 2020 und 2040 etwa 67 Mrd. € zur Verfügung stehenden Mitteln werden gut 10 % (6,9 Mrd. €) für die direkte Elektrifizierung aufgewendet. Dabei werden Anwendungen bevorzugt, die über Hochtemperaturwärmepumpen und hybride elektrische Beheizung (der elektrische Betrieb erfolgt mit geringen Volllaststunden) vergleichsweise geringe Differenzkosten aufweisen.

⁴⁹ Der Kohlenstoffanteil (massebasiert) in Olefinen beträgt etwa 86 %. Pro Tonne Olefin werden also 0,86 Tonnen Kohlenstoff benötigt, das entspricht 3,4 Tonnen CO₂.

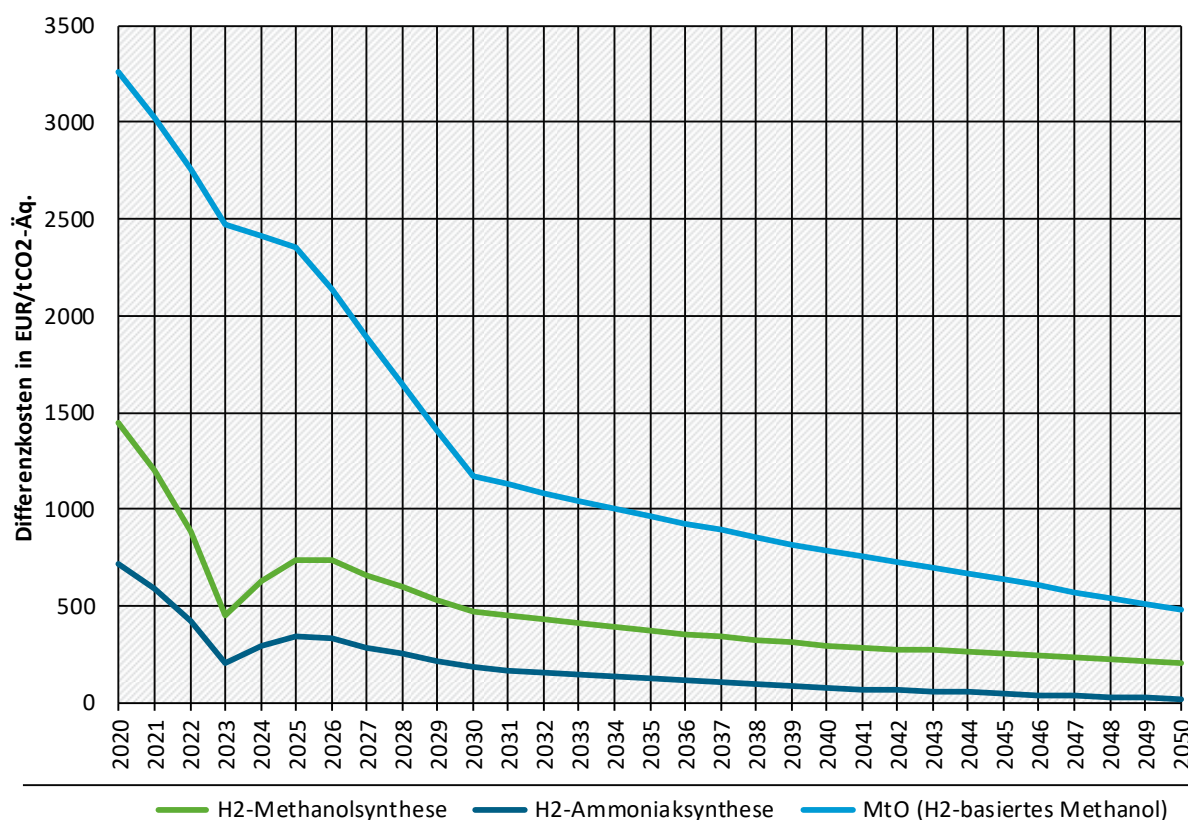
Mit den angenommenen Energieträger-, insbesondere Strompreisen (Strom ist 2030 etwa dreimal so teuer wie Erdgas), weist eine vollständige Elektrifizierung von Prozesswärmeerzeugung auch langfristig noch hohe Vermeidungskosten auf. Dadurch verlangsamt sich im MMS der Trend zur Elektrifizierung und die Nutzung fossiler Energien in der Prozesswärmeerzeugung verbleibt bis nach 2045 relevant.

Abbildung 38: Energieträgernutzung in der Prozesswärmeerzeugung im MMS



Quelle: Fraunhofer ISI

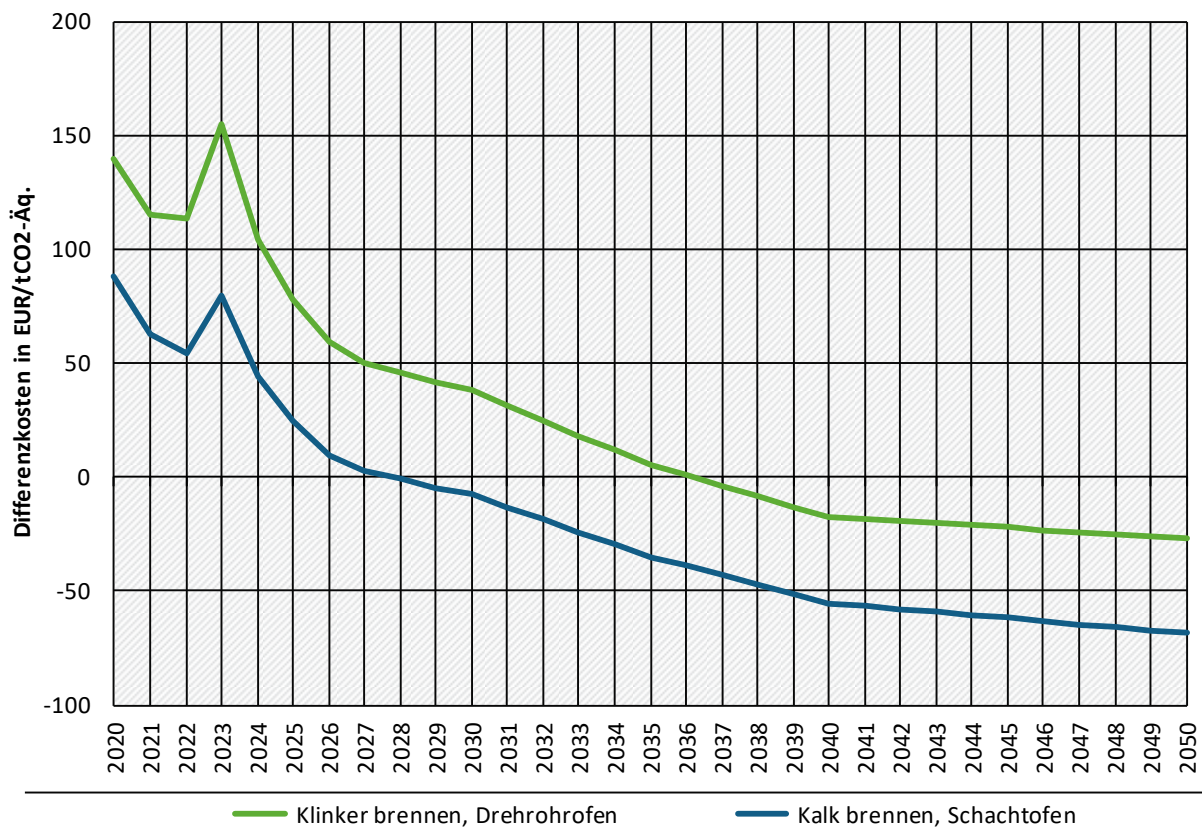
Für die Bewertung der mit Budgets der Förderprogramme unterstützten Technologien und Verfahren sind die CO₂-bezogenen Differenzkosten (in €/t CO₂-Äq.) eine wichtige Orientierung. Diese werden in einem vereinfachten Verfahren berechnet, das neben den Investitionen vor allem die energiebedingten Mehrkosten CO₂-armer Verfahren und die bestehende CO₂-Bepreisung betrachtet. Andere Kostenbestandteile wie Personal, Material und weitere Betriebskosten werden ausgeblendet. Daraus ergeben sich direkte Abhängigkeiten von den angenommenen Energieträger- und CO₂-Preisen und für jedes Modellierungsjahr Differenzkosten. Budgets der Förderprogramme müssen in der Modellierung diese Differenz ausgleichen, um die Diffusion der Verfahren zu ermöglichen. Diese energiebedingten Differenzkosten werden auf die spezifische Treibhausgasminderung bezogen.

Abbildung 39: Differenzkosten für wasserstoffbasierte Chemieprodukte im MMS

Quelle: Fraunhofer ISI

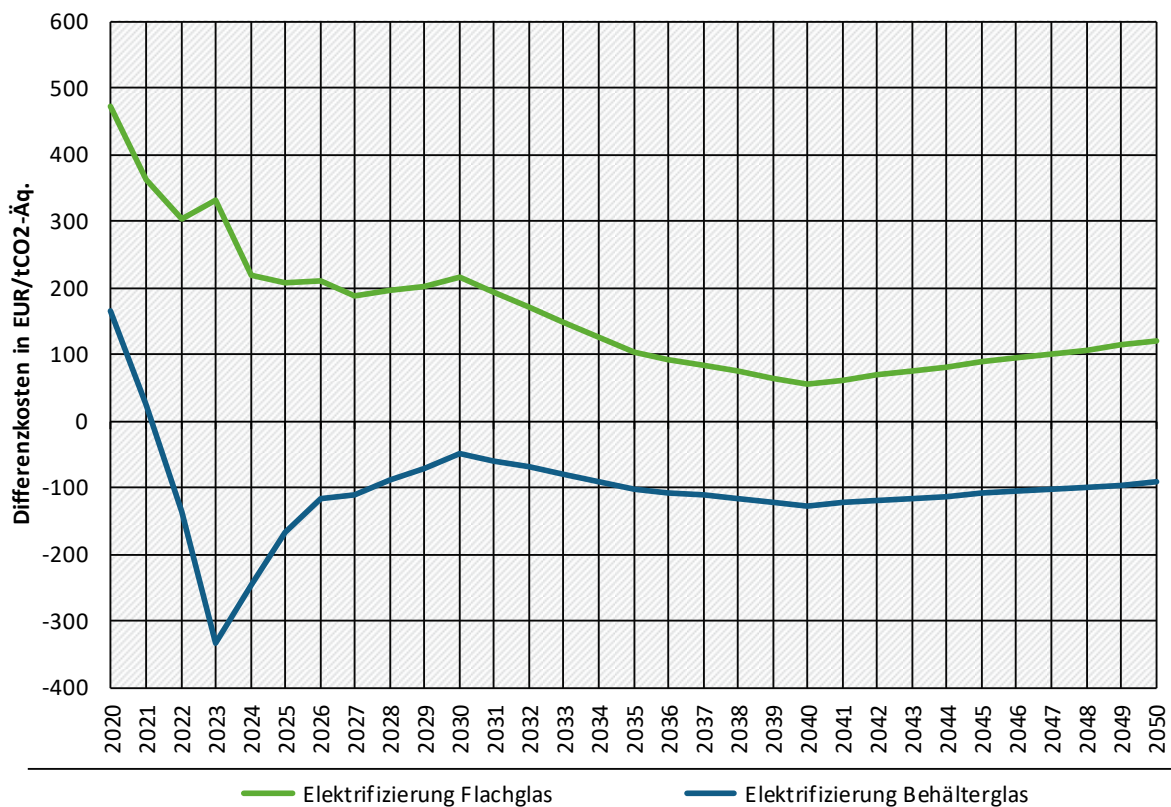
Daraus ergeben sich CO₂-bezogene Differenzkosten, die den Förderbedarf anzeigen. Darin enthalten sind bereits die im jeweiligen Jahr anliegenden CO₂-Preise in MMS. Für die wasserstoffbasierte Chemie sind diese im MMS zunächst enorm hoch und sinken im gesamten Modellierungszeitraum nicht unter null (Abbildung 39). Die besonders hohen Werte ergeben sich dabei vor allem aus dem Wasserstoffbedarf. Für die wasserstoffbasierte MtO (Methanol-to-Olefines)-Route werden etwa 115 GJ Wasserstoff je Tonne Produkt benötigt⁵⁰. Durch zunächst sehr hohe Wasserstoffpreise von etwa 58 €(2019)/GJ entstehen gegenüber der konventionellen Route (naphtha-basiert, etwa 11 €(2019)/GJ, bei ähnlichem Gesamtenergiebedarf) energiebedingte Mehrkosten von etwa 5.400 € pro Tonne Produkt. Die CO₂-Bepreisung kann diese Differenz nicht ausgleichen, obschon je Tonne Produkt etwa 1,8 t CO₂-Äq. eingespart werden. Ähnliche, wenn auch weniger stark ausgeprägte Zusammenhänge gelten für die wasserstoffbasierte Herstellung von Ammoniak und Methanol.

⁵⁰ Dieser Wert beinhaltet die bilanzielle Erzeugung von in der konventionellen Route gekoppelten Produkten – auf energetischer Basis stellt die MtO-Route so die gleichen Produktmengen her.

Abbildung 40: Differenzkosten für CCS-Anwendungen in MMS

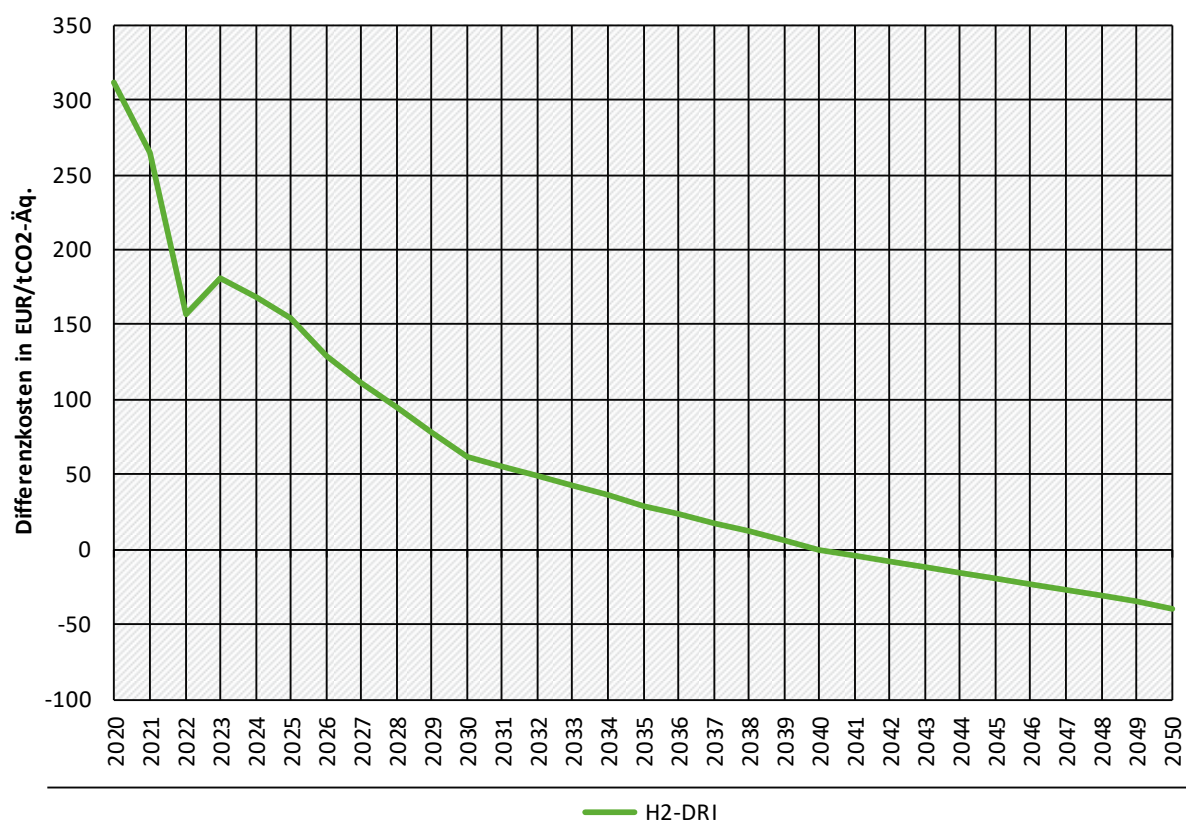
Quelle: Fraunhofer ISI

Andere Zusammenhänge ergeben sich bei der Anwendung von CCS bei der Herstellung von Zementklinker im Drehrohrofen und Kalk in Schachtofen (Abbildung 40). Dort werden energiebedingte Mehrkosten bereits früh (deutlich vor 2030) durch ansteigende CO₂-Preise ausgeglichen. Hinzu kommen allerdings relevante Investitionen in Abscheidung, Speicherung und Transport, wodurch der Zeitpunkt negativer Vermeidungskosten um 2030 erreicht wird. Maßgeblich begrenzender Faktor ist daher vor allem die erwartete Umsetzung rechtlicher Rahmenbedingungen und die Errichtung der benötigten Infrastruktur.

Abbildung 41: Differenzkosten elektrifizierten Glasschmelzens im MMS

Quelle: Fraunhofer ISI

Die Differenzkosten der Elektrifizierung der Glasherstellung werden stark von der Entwicklung des Erdgaspreises beeinflusst (Abbildung 41). Dabei wird ausschließlich die Schmelzwanne als zentrales Aggregat der Prozesswärmeerzeugung berücksichtigt und die Weiterverarbeitung als in konventionellem und CO₂-armen Verfahren weitgehend identisch betrachtet. Die elektrifizierte Behälterglasherstellung weist zu Beginn des MMS bereits negative Differenzkosten auf, was maßgeblich durch relevante Effizienzvorteile und der Erdgaspreisspitze bedingt ist. Sinkende Erdgaspreise werden dann zum Teil durch steigende CO₂-Preise kompensiert, so dass dieses Verfahren durchgängig negative Differenzkosten aufweist. Die elektrifizierte Flachglasherstellung ist durch höhere Strombedarfe und geringe Effizienzgewinne weniger attraktiv und erreicht ab 2035 Differenzkosten unter 100 €/t CO₂-Äq.

Abbildung 42: Differenzkosten für wasserstoffbasierte Stahlerzeugung im MMS

Quelle: Fraunhofer ISI

Die Differenzkosten wasserstoffbasierter Stahlerzeugung wird – ähnlich wie die der wasserstoffbasierten Chemie – durch die Energieträgerpreisdifferenz von Wasserstoff und dem konventionellen Energieträger (hier: Kohle) bestimmt. Mit deren angenommenen Verläufen (siehe Mendelevitch et al. (2022)) und der CO₂-Bepreisung erreicht das Verfahren etwa 2040 negative Differenzkosten. Darin sind relevante Investitionsanteile enthalten – ohne diese werden negative Differenzkosten etwa 2035 erreicht. Dies ist auch der Zeitraum, in dem im MMS Förderbudgets in Anspruch genommen werden, um die in bereits angekündigten und geförderten Projekten (aber auch darüber hinaus) angestrebten Mengen darzustellen. Nach 2035 erfolgt der Zubau autonom und die konventionelle Produktion in der Hochofenroute wird ohne weitere Förderung ersetzt.

5.3.4 Annahmen zur Differenzkostenberechnung

Den in Abschnitt dargestellten Differenzkosten liegen Annahmen über Investitionen (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) konventioneller und CO₂-armer Verfahren zugrunde. Diese Annahmen wurden im Vergleich zum letzten Bericht leicht angepasst, um Informationen über geplante Projekte in Ergänzung zu Literaturangaben zu berücksichtigen (Tabelle 73). Dadurch wurde für die CAPEX von wasserstoffbasierter Direktreduktion ein deutlich höherer Wert (1000 €/t_{Kapazität} statt 415 €/t_{Kapazität}) angenommen – und damit auch über die konkrete Produktionsanlage notwendige Umbauten und Aufwendungen einbezogen. Ähnlich wurde für die Investitionen für CCS (und CCU) ein höherer Wert angesetzt (650 €/t_{Produktkapazität} statt 350 €/t_{Produktkapazität}). Dies beinhaltet nun neben den Differenzkosten der Produktionsanlage (Zement oder Kalk) auch einen pauschalen Aufschlag zur Deckung von Transportkosten.

Neu hinzugekommen sind explizite Techniken zur Prozesswärmeerzeugung und deren Elektrifizierung (Dampferzeugung, Industrieöfen und Hochtemperaturwärmepumpen), deren Einsatz

nun auch über die Investitions- und Betriebskostenförderung der "Programme zur Förderung der Markteinführung klimafreundlicher Herstellungsverfahren" (siehe Tabelle 67) modelliert wird.

Tabelle 73: Annahmen zu CAPEX der durch Förderprogramme adressierten Technologien

Referenzprozess	CO ₂ -armer Prozess	Spez. Investition [€/t Kap.] oder [€/kW]	Quellen
Methanol erdgasbasiert	Methanol wasserstoffbasiert	470	[1]
Ammoniak erdgasbasiert	Ammoniak wasserstoffbasiert	27	[1]
Glasschmelze Gasbrenner	Vollelektrisch	571	[2]
Hochofen	Wasserstoffbasierte Direktreduktion	1000	[3]
Zementherstellung	CCS/CCU*	650	[4]
Kalkherstellung	CCS/CCU*	650	[4]
Ethylen, fossil	Ethylen, MtO	300	[1]
Erdgasbasierte Dampferzeugung	(Hybrid-) elektrische Dampferzeugung	85	[5]
Erdgasbeheizte Industrieöfen	(Hybrid-) elektrische Industrieöfen	200	[5]
Erdgasbasierte Dampferzeugung	Hochtemperatur-Wärmepumpe	400	[5]

*CCU und CCS werden mit den gleichen Kosten angesetzt. Diese betreffen aber ausschließlich die Bereitstellung des CO₂ – weitere Kosten der Nutzung werden auf der Senkenseite verortet. Die Anwendung von CCU ist durch diese Senken limitiert. Quellen:

1: (Perez-Fortes und Tzimas 2016), (Geres et al. 2019), (Perez-Fortes et al. 2016)

2: (Eichhammer et al. 2018), (Hibschler et al. 2005)

3: (Vogl et al. 2018), (Eichhammer et al. 2018)

4: (Bundeskartellamt 2017), (Eichhammer et al. 2018), (Kuramochi et al. 2012), (SINTEF Energy Research 2018)

5: (Fleiter et al. 2022)

Zusätzlich zur CAPEX-Förderung wird eine OPEX-Förderung modelliert. Diese basiert auf Differenzkosten der konventionellen und CO₂-armen Produktionsverfahren – darin berücksichtigt sind ausschließlich energiebedingte Kosten. Unterschiede von weiteren Betriebskosten sowie Materialbedarfe sind nicht enthalten, da diese in einigen Fällen gar keine Rolle spielen (z.B. Prozesswärmeerzeugung, CCS/CCU) und sonst regelmäßig gegenüber den energiebedingten zurücktreten⁵¹. Für die wasserstoffbasierte Chemie wird der Rohstoff –mithin der Hauptteil der Differenzkosten – als Teil der "energiebedingten" Kosten gesehen (Tabelle 74).

⁵¹ Vergleiche beispielsweise (Agora Energiewende 2021) für eine Aufschlüsselung der OPEX für Rohstahl. Dort werden die Mehrkosten für Material (Eisenerz und Zuschlagsstoffe) zwischen der Hochofenroute und der Direktreduktion mit Wasserstoff mit 28 €/t_{Rohstahl} angegeben – die energiebedingten Mehrkosten mit etwa 240 €/t_{Rohstahl}. Allgemeine Betriebskosten werden dort als identisch angenommen.

Tabelle 74: Annahmen zur OPEX-Differenzkostenberechnung

			Referenzprozess							Innovativer Prozess						
			Energieträger		Energiebedarf [GJ/t oder GJ/kW (Prozesswärme/Dampf)]			Emissionen [tCO ₂ /tProdukt]/[tCO ₂ /kW]		Energieträger		Energiebedarf			Emissionen [tCO ₂ /tProdukt]/[tCO ₂ /kW]	
Produkt	Referenzprozess	Innovativer Prozess	Brennstoff	Rohstoff	Brennstoff	Strom	Rohstoff	Gesamt		Brennstoff	Rohstoff	Brennstoff	Strom	Rohstoff	Gesamt	
Methanol	Erdgasbasierte Methanolsynthese	H ₂ -Methanolsynthese	Erdgas	Erdgas	10,0	0,5	22,7	33,2	1,8		Wasserstoff	0,0	5,4	22,7	28,1	0,9
Ammoniak	Erdgasbasierte Ammoniaksynthese	H ₂ -Ammoniaksynthese	Erdgas	Erdgas	11,3	0,5	23,5	35,3	1,9		Wasserstoff	0,0	6,2	25,2	31,4	0,0
Ethylen-Äquivalent	Naphthabasierte Olefineproduktion	MtO (H ₂ -basiertes Methanol)	Erdgas	Naphtha	35,9	0,0	87,7	123,6	2,0		Wasserstoff	0,0	11,2	115,4	126,6	0,2
Klinker	Klinker brennen, Drehrohrofen	+CCS	Klinker-Mix		3,5	0,1	0,0	3,6	0,8	Klinker-Mix		3,5	2,1	0,0	5,6	0,1
Branntkalk	Kalk brennen, Schachtofen	+CCS	Erdgas		3,7	0,1	0,0	3,8	1,2	Erdgas		3,7	2,1	0,0	5,8	0,1
Flachglas	Gasbeheizte Schmelzwanne	Vollelektrische Schmelzwanne	Erdgas		10,9	0,9	0,0	11,9	0,6			0,0	10,0	0,0	10,0	0,1
Behälterglas	Gasbeheizte Schmelzwanne	Vollelektrische Schmelzwanne	Erdgas		5,8	1,4	0,0	7,2	0,3			0,0	3,3	0,0	3,3	0,1
Rohstahl	Hochofen	H ₂ -DRI	Kohle		17,1	0,9	0,0	17,9	1,7	Wasserstoff		8,0	2,3	0,0	10,3	0,1
Prozesswärme	Erdgasbeheizte Industrieöfen	Elektrische Industrieöfen (Teillast)	Erdgas		4,0	0,0	0,0	4,0	0,2	Strom		3,8	0,0	0,0	3,8	0,0
Dampf	Erdgasbeheizte Dampferzeugung	HT-Wärmepumpe	Erdgas		32,0	0,0	0,0	32,0	1,8	Strom		14,4	0,0	0,0	14,4	0,0

6 Gebäude

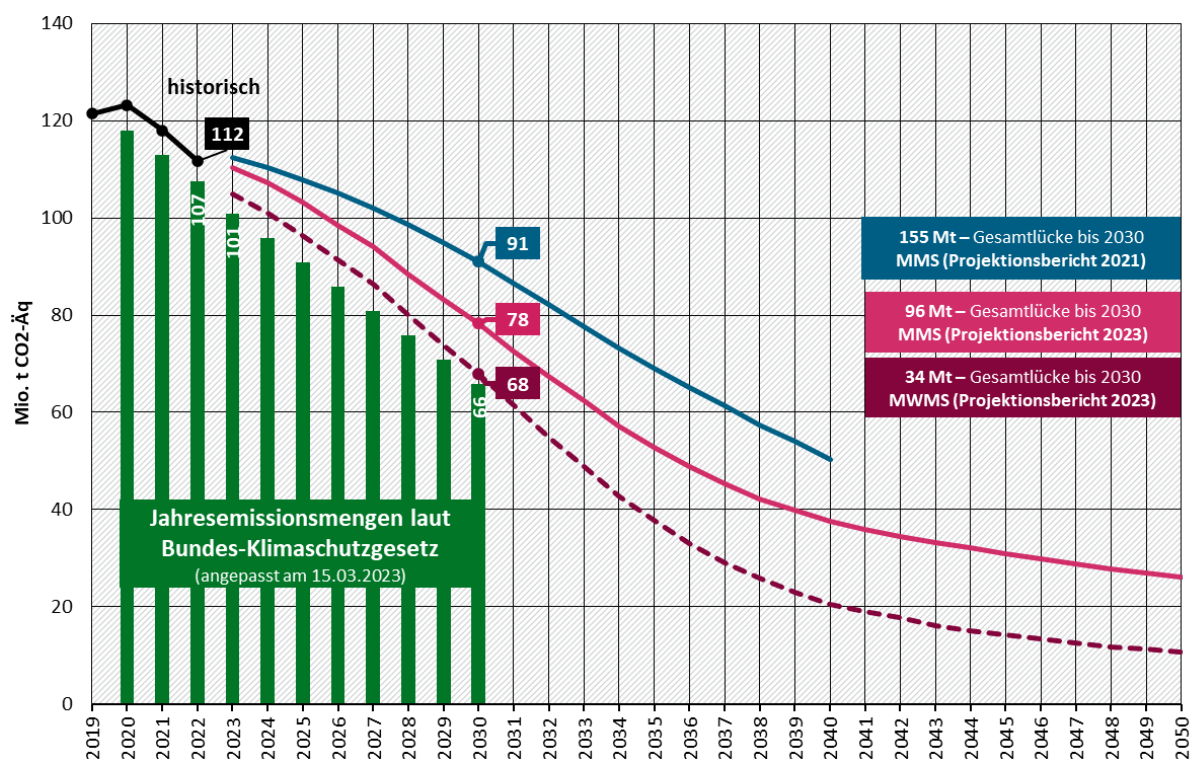
Der Sektor Gebäude umfasst im Bundes-Klimaschutzgesetz die Emissionen aus Verbrennung im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (CRF-Kategorie 1.A.4.a) und in privaten Haushalten (CRF 1.A.4.b). Emissionen, die durch den Bezug von Strom und Fernwärme entstehen, werden nicht im Sektor Gebäude bilanziert, sondern in der Energiewirtschaft.

Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

6.1 Zentrale Ergebnisse

Abbildung 43 zeigt die Entwicklungen der direkten Treibhausgasemissionen aus Brennstoffen im MMS und MWMS im Vergleich mit den Jahresemissionsmengen des KSG sowie des MMS im Projektionsbericht 2021. Im MMS sinken die Treibhausgasemissionen bis 2030 auf 78 Mio. t CO₂-Äq., im MWMS auf 68 Mio. t CO₂-Äq. Damit wird die Lücke zum KSG-Sektorziel bereits im MMS im Vergleich zum Projektionsbericht 2021 deutlich reduziert. Das MWMS mit zusätzlich geplanten Instrumenten und Maßnahmen verfehlt das Sektorziel im Jahr 2030 knapp um rund 2 Mio. t CO₂-Äq. Die Gesamtlücke 2023 bis 2030 beträgt 96 Mio. t CO₂-Äq. im MMS; im MWMS kann sie um rund zwei Drittel auf 34 Mio. t CO₂-Äq. reduziert werden.

Abbildung 43: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude



Anmerkungen: Die dargestellten Emissionsdaten basieren auf dem Datenstand 2023, modelliert wurde mit dem Datenstand 2022. Für die Jahre ab 2023 wurden die vom UBA nach § 4 Abs. 3 angepassten JEM dargestellt. Aufgrund teilweise unterschiedlicher Parametrisierung der Instrumente sind die Projektionsberichte nicht vollständig konsistent

Quelle: (UBA 2023b), Modellierung: IREES, Fraunhofer ISI

Seit dem Projektionsbericht 2021 haben sich nicht nur die politischen Instrumente, sondern auch die Rahmenbedingungen grundlegend verändert. Nicht nur sind die Energiepreise deutlich gestiegen, zu berücksichtigen sind auch angepasstes Nutzerverhalten sowie technologische Entwicklungen im Bereich von Wärmepumpen. Wesentliche Treiber der Entwicklungen im MMS

sind die gestiegenen Energiepreise und das damit angepasste Nutzerverhalten, sowie die novelierte Bundesförderung für Effiziente Gebäude (Stand Juli 2022⁵²). Darüber hinaus ist im MWMS die berücksichtigte Ausgestaltung der 65 %-Anforderung für neue Wärmeversorgungssysteme, hier angesetzt mit Inkrafttreten zum 1.1.2024, der zentrale Treiber des deutlichen Rückgangs. Wie im Instrumentenpapier dargestellt, bildet die Ausgestaltung damit nicht die aktuellen Entwicklungen ab.

Ergänzend sind in Tabelle 75 die Treibhausgasemissionen im MMS von 2019 bis 2050 nach Quellgruppen dargestellt. In den Jahren 2025 und 2030 sind zudem das Sektorziel des KSG sowie die sich ergebende Abweichung abgebildet. Tabelle 76 zeigt diese Ergebnisse für das MWMS. Gemäß KSG-Sektoreinteilung werden hierbei jeweils die direkten Treibhausgasemissionen aus Brennstoffen innerhalb des Gebäudesektors bilanziert. Emissionen aus Stromerzeugung – etwa für Wärmepumpen oder Haushaltsgeräte – sowie Fernwärme werden im Sektor Energiewirtschaft (Kapitel 4) bzw. Industrie (Kapitel 5) bilanziert.

Tabelle 75: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.						
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Sonstige	30,8	25,3	19,0	13,1	9,7	8,2	7,3
Haushalte	90,6	78,0	59,2	39,6	28,0	22,8	18,8
Gesamt	121,4	103,2	78,3	52,7	37,6	31,0	26,1
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		90,9	65,9				
Abweichung vom Sektorziel		12,3	12,4				

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen IREES, Fraunhofer ISI

Tabelle 76: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.						
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Sonstige	30,8	24,1	17,1	10,2	6,2	5,2	4,9
Haushalte	90,6	72,1	51,2	27,5	14,2	9,0	5,9
Gesamt	121,4	96,2	68,2	37,7	20,5	14,2	10,8
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		90,9	65,9				
Abweichung vom Sektorziel		5,3	2,3				

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen IREES, Fraunhofer ISI

⁵² Die Novelle berücksichtigt die Änderungen aus dem Sofortprogramm 2022.

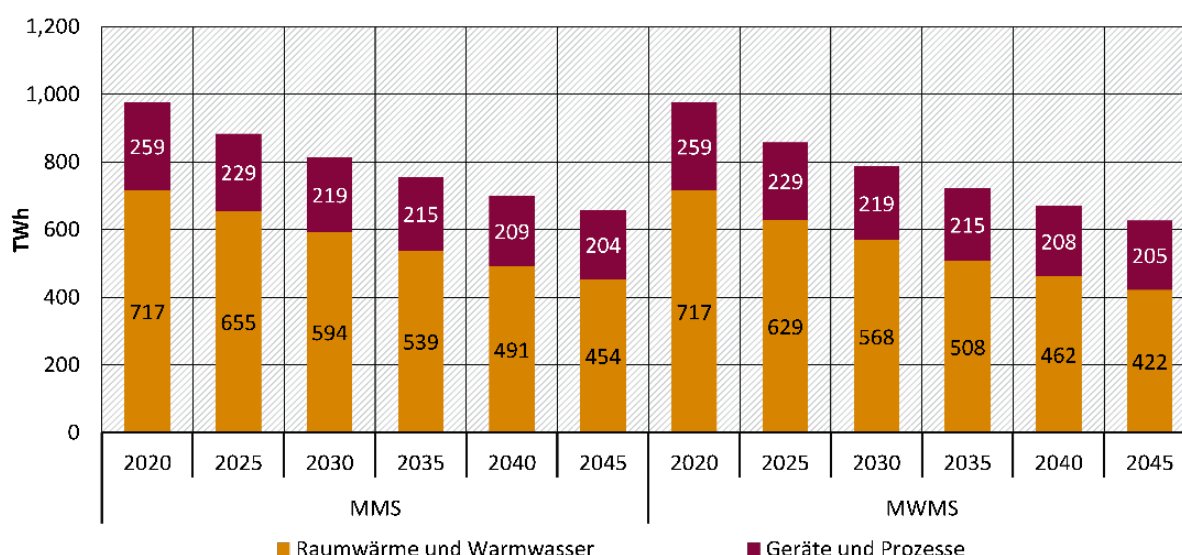
Tabelle 77 zeigt darüber hinaus noch die absolute und relative Entwicklung der Treibhausgasemissionen bis 2050 ausgehend vom Basisjahr 1990.

Tabelle 77: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.								
Entwicklung 1990 – 2019	210,1	153,9	121,4						
MMS				103,2	78,3	52,7	37,6	31,0	26,1
MWMS				96,2	68,2	37,7	20,5	14,2	10,8
	Veränderung ab 1990 in %								
Entwicklung 1990 – 2019		-26,7	-42,2						
MMS				-50,9	-62,7	-74,9	-82,1	-85,2	-87,6
MWMS				-54,2	-67,5	-82,0	-90,3	-93,2	-94,9
	Veränderung ab 2005 in %								
Entwicklung 2005 – 2019			-21,1						
MMS				-32,9	-49,2	-65,8	-75,6	-79,9	-83,0
MWMS				-37,5	-55,7	-75,5	-86,7	-90,8	-93,0

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen IREES, Fraunhofer ISI

Die zentrale Energieanwendung im Gebäudesektor sind Raumwärme und Warmwasser. Die restlichen Emissionen entfallen auf Geräte und Prozesse für Private Haushalte und GHD (siehe unten). Abbildung 44 zeigt zunächst den Gesamtenergieverbrauch des Gebäudesektors gemäß dieser Anwendungsgruppen. Dieser verringert sich von 976 TWh im Jahr 2020 auf 658 TWh (-33 %) im Jahr 2045 im MMS beziehungsweise 627 TWh (-36 %) im MWMS. Im Folgenden werden die beiden Anwendungsgruppen näher betrachtet.

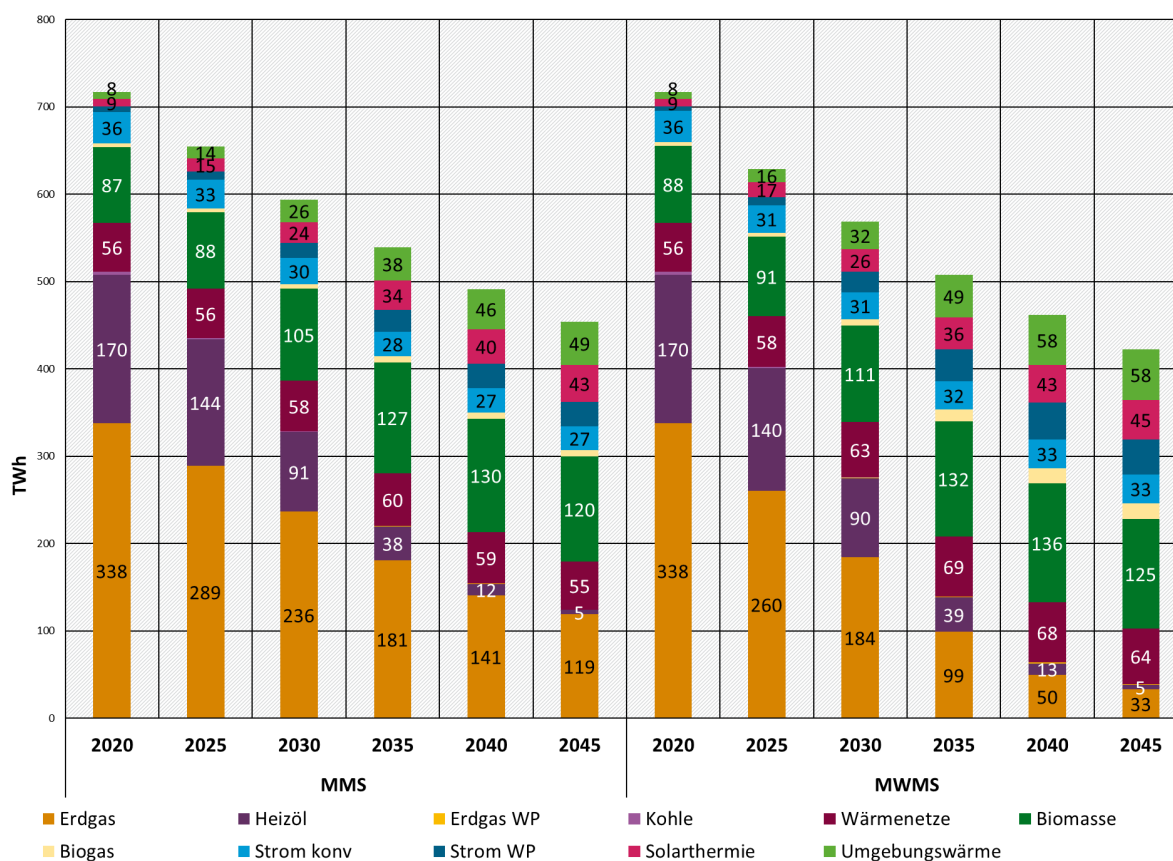
Abbildung 44: Endenergieverbrauch des Gebäudesektors nach Anwendungsgruppe im MMS und MWMS

Quelle: Berechnungen IREES/Fraunhofer ISI

Abbildung 45 zeigt dazu die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser im MMS und MWMS bis 2045. Der Endenergieverbrauch sinkt im MMS im Zeitraum 2020 bis 2030 um 17 % und bis 2045 um 37 %. Das MWMS verzeichnet einen höheren Rückgang von 20 % bis 2030 und 40 % bis 2045. Der Unterschied zwischen MMS und MWMS mit Bezug auf den Endenergieverbrauch ist insbesondere auf eine höhere Sanierungstiefe im MWMS (siehe Abbildung 47) zurückzuführen. Dafür verantwortlich ist vor allem die Einführung des EH70-Leitstandards im GEG bei Gesamt-sanierungen sowie der in der Modellierung resultierende höhere Anteil an Effizienzhaus-Sanierungen.

Beide Szenarien verzeichnen zwischen 2020 und 2030 einen starken Rückgang von Heizöl, von 170 TWh auf 91 TWh (MMS) bzw. 90 TWh (MWMS). Bis 2045 spielt Heizöl im Gebäudesektor in beiden Szenarien kaum noch eine Rolle. Hinsichtlich der Rolle von Erdgas zeigt sich hingegen ein deutlicher Unterschied. Hier werden im MMS im Jahr 2030 noch 236 TWh Erdgas für die Wärmebereitstellung genutzt, während es im MWMS insbesondere aufgrund der 65 %-Anforderung „nur“ noch 184 TWh sind. Dieser Trend setzt sich bis 2045 fort, sodass im MMS im Zieljahr der Treibhausgasneutralität noch ein hoher Anteil von Erdgas verwendet wird (119 TWh). Im MWMS ist der fossile Anteil deutlich geringer, beträgt aber im Jahr 2045 immer noch 33 TWh fossiles Erdgas. Dazu kommt in das Erdgasnetz eingespeiste Biomethan (Biogas). Ausgehend von rund 4 TWh im Jahr 2019 steigt dieser Wert im MMS auf rund 5 TWh im Jahr 2030 und rund 7 TWh im Jahr 2045. Aufgrund der 65 %-Regel steigt der Anteil im MWMS im Jahr 2030 bereits auf 7 TWh und erreicht 18 TWh im Jahr 2045.

Der Endenergieverbrauch von Wärmenetzen ist im MMS über den simulierten Zeitraum nahezu konstant. Da Wärmenetze eine Erfüllungsoption der 65 %-Regel sind, steigt der EEV von Wärmenetzen im MWMS von 56 TWh im Jahr 2020 auf 63 TWh im Jahr 2030 und 68 im Jahr 2040.

Abbildung 45: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser im MMS und MWMS

Quelle: Berechnungen IREES

Der Beitrag von elektrischen Wärmepumpen zur Wärmebereitstellung setzt sich aus den Energieträgern Umweltwärme und Strom-Wärmepumpen zusammen. In beiden Szenarien zeigt sich eine deutliche Steigerung des Anteils von Wärmepumpen an der Wärmeversorgung. Im MMS beträgt der Anteil 7 % im Jahr 2030 und 17 % im Jahr 2045. Im MWMS sind es 9 bzw. 22 %.

In beiden Szenarien zeigt sich bis 2045 aufgrund fehlender politischer Instrumente zudem ein starker Zubau von Biomasse-Wärmeversorgungssystemen, der dazu beiträgt, dass die Biomassenachfrage das inländisch verfügbare Biomassepotenzial deutlich übersteigt (siehe Abschnitt 3.4.2.). Dabei ist anzumerken, dass im Gegensatz zur Modellierung im Projektionsbericht 2021 der Einsatz von Biomasse nicht mehr fix durch eine maximal dem Gebäudesektor zur Verfügung stehende Menge begrenzt wurde, sondern ausschließlich über Kosten-Potenzialkurven und den Preis beschränkt wird. Damit nimmt der Preis für die unterschiedlichen Biomassefraktionen mit zunehmender Nachfrage zwar zu, im Vergleich mit anderen Wärmeversorgungssystemen stellen Biomasse-Zentralheizungskessel in vielen Gebäuden trotzdem eine preislich konkurrenzfähige Option dar.

Im Vergleich zum MMS des Projektionsberichts 2021 wird eine höhere Aktivität beim Heizungstausch angenommen, die insbesondere auf die hohen Energiepreise zurückzuführen ist. Diese ist anhand der jährlich installierten Wärmeversorgungssysteme mit der realen Entwicklung bzw. Steigerung der Installationszahlen in den Jahren 2020 bis 2022 kalibriert. Die fossilen Systeme werden vorzeitig durch Wärmepumpen, Biomasse-Kessel, mit Biomethan betriebene Kessel, Kombinationen mit Solarthermie sowie Wärmenetzanschlüsse getauscht. Im MWMS führt die ab

1.1.2024 angesetzte 65 %-Anforderung im GEG zu einem zusätzlichen Rückgang der fossilen Energien.

Der Anteil von EE-Wärme⁵³ beläuft sich auf 15 % im Jahr 2019. Im MMS steigt dieser Wert bis 2030 auf rund 27 % und bis 2040 auf rund 48 %. Im MWMS beträgt der Anteil im Jahr 2030 rund 31 %, im Jahr 2045 rund 58 %.

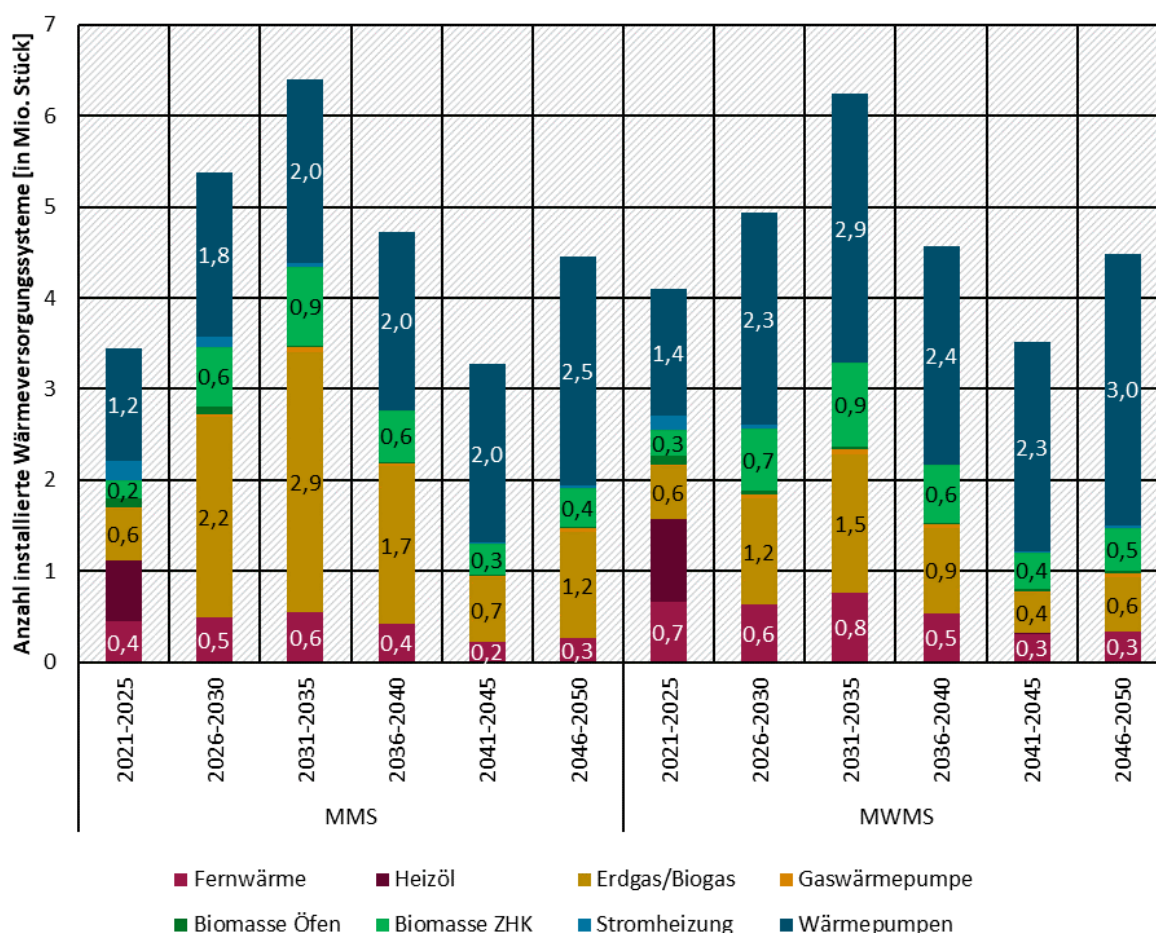
Ergänzend zum Endenergieverbrauch zeigt Abbildung 46 die Entwicklung der neuinstallierten Wärmeversorgungssysteme in Wohn- und Nichtwohngebäuden bis zum Jahr 2050. Aufgrund natürlicher Austausch- und Sanierungszyklen, die aus unterschiedlichen Baualtersklassen resultieren, steigt die Anzahl neuinstallierter Wärmeversorgungssysteme bis 2035 in beiden Szenarien an und sinkt anschließend wieder. In beiden Szenarien ist zudem von 2021 bis 2025 aufgrund der angenommenen Energiepreise ein kurzfristiger Rückgang von installierten Zentralheizkesseln und BHKW auf Basis von Erdgas bzw. Biogas zu beobachten. Im MMS steigt ab 2026 nicht nur die insgesamt Anzahl installierter Wärmeversorgungssysteme, sondern auch die Anzahl an gasbasierten Systemen. Allerdings ist auch eine deutliche Steigerung beim Marktanteil von Wärmepumpen festzustellen. Von 2021 bis 2030 werden rund 2,8 Mio. gasbetriebene Systeme, rund 1 Mio. biomassebasierte Systeme und rund 3 Mio. Wärmepumpen installiert. Von 2031 bis 2040 werden weitere 4,5 Mio. gasbasierte Systeme, 1,5 Mio. biomassebasierte Systeme und rund 4 Mio. Wärmepumpen installiert. Dazu kommen noch jeweils rund 1 Mio. Anschlüsse an Wärmenetze.

Im MWMS ist ab 2026 der Effekt der 65 %-Regel zu beobachten, der im Vergleich zum MMS zu einem deutlich niedrigeren Anteil von erdgasbasierten Systeme und dafür höheren Anteilen von Biomasse-Heizungen und Wärmepumpen führt. Zudem ist die Anzahl von Anschlüssen an Wärmenetze höher als im MMS. Von 2021 bis 2030 werden rund 1,7 Mio. gasbetriebene Systeme, rund 1,1 Mio. biomassebasierte Systeme und rund 3,7 Mio. Wärmepumpen installiert. Von 2031 bis 2040 werden weitere 2,5 Mio. gasbasierte Systeme, 1,6 Mio. biomassebasierte Systeme und rund 5,3 Mio. Wärmepumpen installiert. Dazu kommen noch jeweils rund 1,3 Mio. Anschlüsse an Wärmenetze.

Durch das Neuinstallationsverbot von reinen Ölheizungen ab 2026 bzw. der 65 %-Regel werden diese nur bis zum Jahr 2025 installiert.

Betrachtet man den Bestand an installierten Wärmeversorgungssystemen ist in beiden Szenarien ein deutlicher Rückgang von Erdgaskesseln und ein Ausbau von Wärmepumpen zu beobachten, wobei es die Instrumente in beiden Szenarien nicht schaffen, die im Jahr 2045 verbleibende noch relevante Anzahl an fossilen Erdgasheizungen zu verdrängen.

⁵³ Fernwärme, Biomasse, Biogas, Solarthermie und Umgebungswärme

Abbildung 46: Entwicklung der installierten Wärmeversorgungssysteme im MMS und MWMS

Quelle: Berechnungen IREES

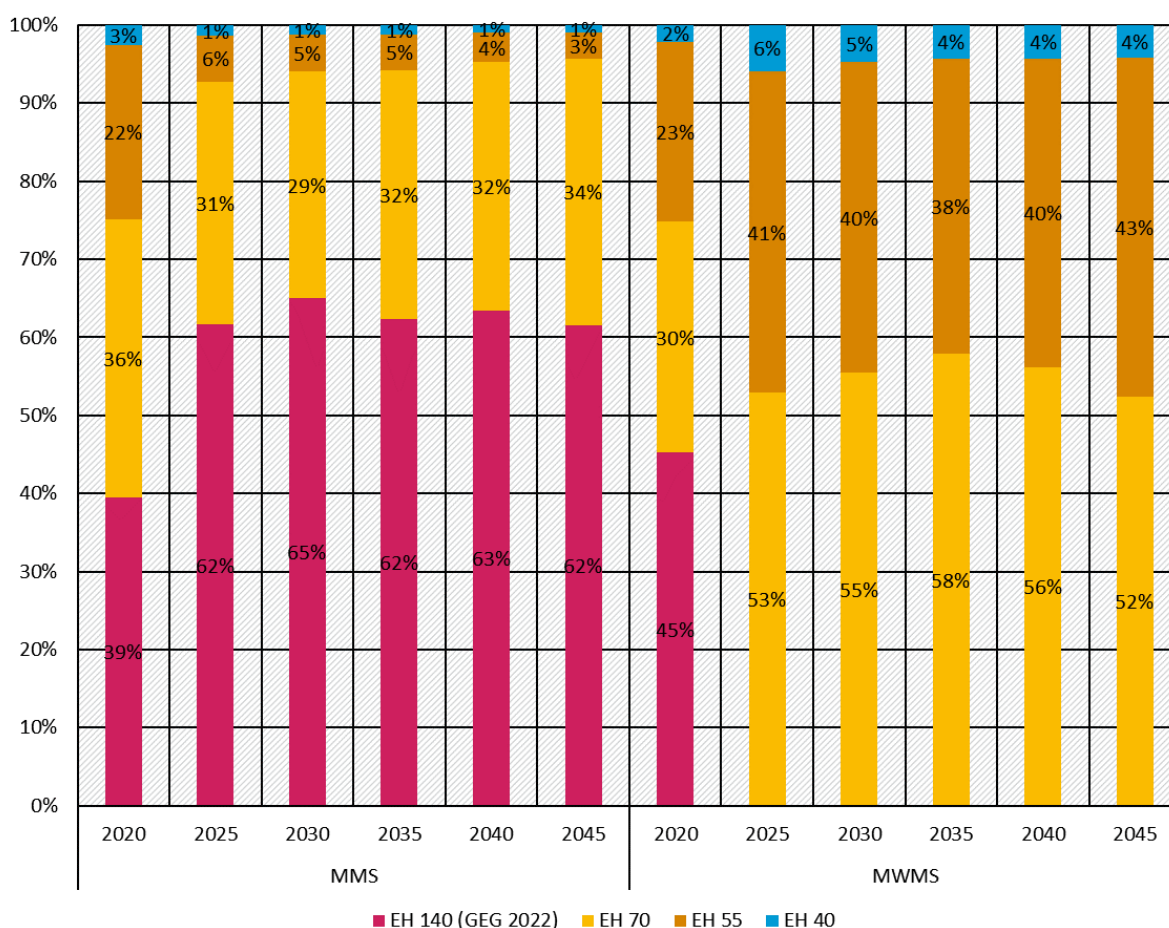
Im MWMS wird bei Wohngebäuden bis 2030 eine energetische Sanierungsrate (ohne Instandsetzung) von durchschnittlich 1,5 % erreicht, bei Nichtwohngebäuden 0,5 %. Bis 2045 sind es 1,1 % bzw. 0,3 %. Dabei sind im MWMS die Mindesteffizienzstandards für Nichtwohngebäude bereits berücksichtigt. Im MMS beträgt die Sanierungsrate bei Wohngebäuden zwischen 2031 und 2045 durchschnittlich 1,7 %. Bei Nichtwohngebäuden werden bis 2030 durchschnittlich 0,7 % und zwischen 2031 und 2045 im Schnitt 0,4 % erreicht.

Insgesamt ist die energetische Sanierungsrate im MWMS also niedriger als im MMS und die Sanierungsrate von Wohngebäuden höher als die von Nichtwohngebäuden. Das liegt daran, dass infolge der im MWMS unterstellten höheren Anforderungen an die thermische Hülle (Einführung von EH 70 als Leitstandard im GEG) insgesamt weniger thermische Sanierungen erfolgen. Die durchgeführten Sanierungen haben dagegen ein höheres Ambitionsniveau, weshalb die Effizienz schlussendlich höher ist. Damit bestätigt sich, dass die Sanierungsrate nur ein Indikator für die Aktivität im Gebäudebestand ist.

Abbildung 47 zeigt deshalb zusätzlich das Ambitionsniveau von Sanierungsaktivitäten im MMS und MWMS von 2020 bis 2045. Zu beachten ist, dass ab 2025 im MWMS das Effizienzhaus 70 zum Sanierungsstandard im GEG wird. Bislang gilt im GEG der Standard EH 140 bezogen auf das Neubauniveau der EnEV 2009. Die Umstellung führt ab 2025 dazu, dass mehr Sanierungen nach EH 55 und EH 40 durchgeführt werden. Im MMS steigt dagegen die Anzahl an Standardsanierungen nach GEG, während die Zahl der Sanierungen nach EH 70 zurückgeht. Durch Erhöhung des

Ambitionsniveaus im GEG und einer höheren Anzahl an Sanierungen nach EH 55 wird im MWMS insgesamt trotz niedriger Sanierungsrate eine höhere Sanierungstiefe erreicht als im MMS.

Abbildung 47: Erreichte Sanierungstiefe im MMS und MWMS in den Jahren 2020 bis 2040



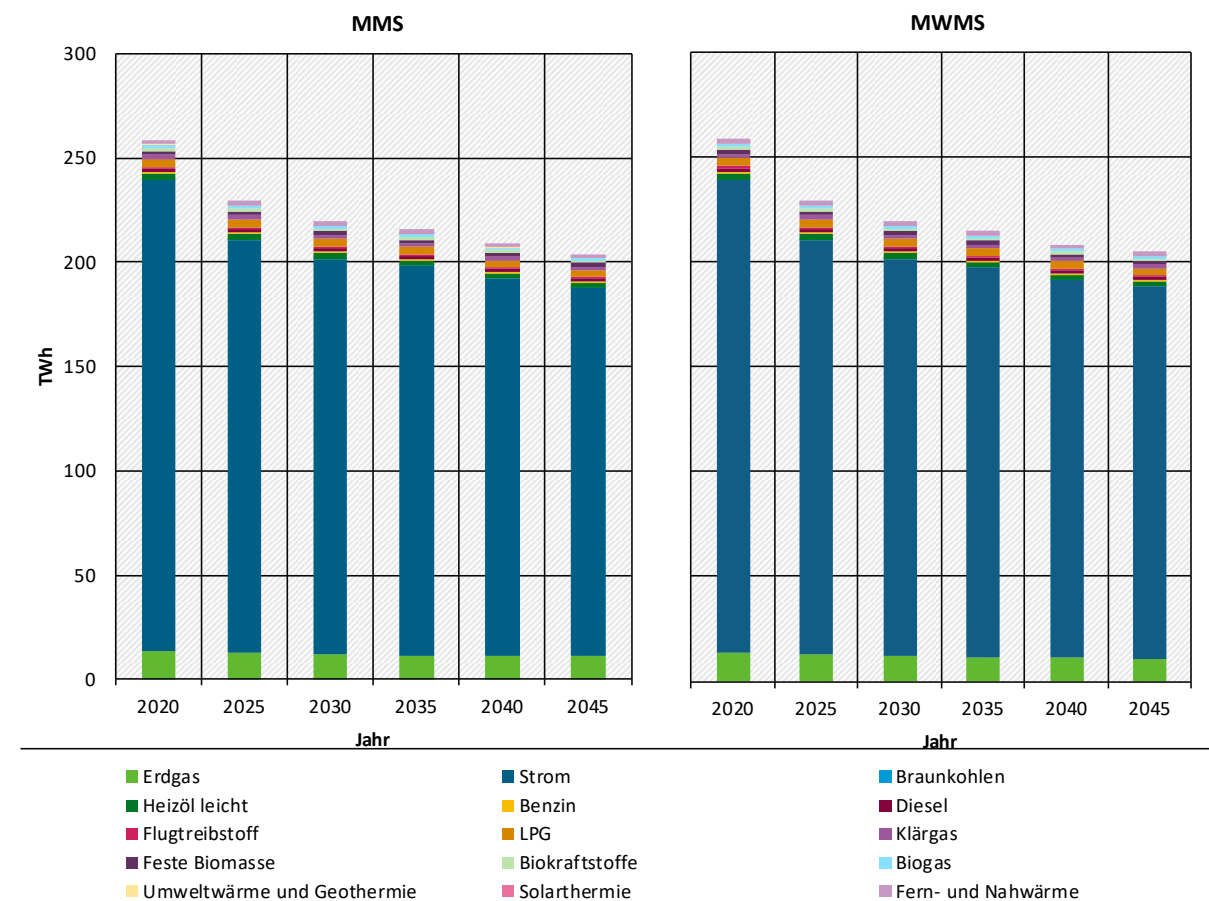
Quelle: Berechnungen IREES

Neben dem Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser wurde auch die Entwicklung der übrigen Verbräuche in den Sektoren Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen quantifiziert. Dazu zählen in Wohngebäuden beispielsweise Elektrogroßgeräte (Kühlschränke, Waschmaschinen etc.), Unterhaltungselektronik (Fernseher, Tablets etc.), Beleuchtung, Klimageräte und Kochgeräte (z.B. Herde). In Nichtwohngebäuden werden zusätzlich verschiedene Prozesswärme- und Kälteanwendungen (z.B. Backöfen in Bäckereien) berücksichtigt. Wie oben erklärt, werden Emissionen, die durch den Bezug von Strom und Fernwärme entstehen, nicht im Sektor Gebäude bilanziert, sondern in der Energiewirtschaft.

Wie Abbildung 48 zeigt, sinkt der Endenergieverbrauch von Haushalts- und Dienstleistungsgeräten und -prozessen von 259 TWh im Jahr 2020 auf 204 TWh im MMS und 205 TWh im MWMS im Jahr 2050. Ausschlaggebend für diese Reduktionen sind die Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von Produkten im Rahmen des Ökodesigns. Im MWMS wird der Minderungseffekt teilweise durch strengere Anforderungen an die Produktlebensdauer konterkariert. Diese führen dazu, dass relativ ineffiziente Geräte länger im Bestand verbleiben und erst verzögert gegenüber dem MMS durch effizientere Varianten ersetzt werden. Insgesamt ist Strom über den Betrachtungshorizont der dominierende Energieträger. Erdgas wird für Prozesswärmeanwen-

dungen in Gewerbebetrieben des GHD-Sektors und in geringem Umfang für Gasherde in Haushalten eingesetzt. Der geringe Anteil der Brennstoffe am Endenergieverbrauch für Geräte und Prozesse führt zu geringen direkten Emissionen innerhalb des Gebäudesektors.

Abbildung 48: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Geräte und Prozesse im Gebäudesektor im MMS und MWMS



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

6.2 Instrumentenbewertung

Die Instrumentenbewertung basiert auf dem Instrumentenpapier (Anhang A.3).

Im Folgenden erfolgt die Bewertung einer Auswahl zentraler wirkmächtiger Politikinstrumente für den Gebäudebereich. Diese betreffen in erster Linie die Gebäudeanwendungen Raumwärme und Warmwasser, da hier im Vergleich zu weitgehend elektrifizierten Geräten und Prozessen die meisten direkten Treibhausgasemissionen entstehen. Im MMS sind dies das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG), die Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG), die steuerliche Förderung der Gebäudesanierung, das Gebäudeenergie-Gesetz (GEG), die Mittelfristenergieversorgungsicherungsmaßnahmenverordnung (EnSimiMaV) und die Vorbildfunktion Bundesgebäude.

Für eine Reihe anderer flankierender Instrumente wird aus verschiedenen Gründen auf eine Wirkungsabschätzung verzichtet: Für einige Instrumente mangelt es für die Wirkungsabschätzung an der empirischen Grundlage. Dies gilt zum Beispiel für

- mögliche Anpassungen am Mietrecht, z.B. durch ein Teilwarmmietenmodell,

- die Förderung der seriellen Sanierung oder
- die Umlagebegrenzung des CO₂-Preises des BEHG.

Die Förderrichtlinie für die serielle Sanierung ist vorrangig darauf ausgelegt, 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. Das Gesetz zur Aufteilung der Kohlendioxidkosten (CO₂KostAufG) regelt die Aufteilung der Kosten aus der CO₂-Bepreisung zwischen Vermieter und Mieter in Abhängigkeit von den spezifischen CO₂-Emissionen eines Gebäudes. Diese gehen mit der energetischen Güte des Gebäudes einher. Für eine Wirkungsabschätzung fehlt die empirische Grundlage für den möglichen Sanierungsanreiz auf Seiten der Vermieter, der daraus resultiert, dass sie z.B. bei schlecht gedämmten Gebäuden einen hohen Anteil der CO₂-Kosten selbst tragen müssen.

Die Bewertung der Einzelinstrumente erfolgt für die meisten Instrumente bottom-up. Hierfür kommt ein Excel-basiertes Wirkmodell zum Einsatz. Grundlage der quantitativen Wirkungsabschätzung ist dabei eine Parametrisierung des zu untersuchenden Instruments, insbesondere im Hinblick auf die wirkmächtigen Ausgestaltungscharakteristika (z.B. zur Verfügung stehendes Förderbudget eines Förderprogramms, Förderkonditionen, Auslösetatbestände ordnungsrechtlicher Regelungen). Das Wirkmodell arbeitet mit einer Reihe verschiedener Wirkmechanismen, v.a. Wirtschaftlichkeitsvergleiche, Preiselastizitäten, Nutzenfunktionen, investorenspezifische Entscheidungskalküle, programmspezifische Fördereffizienzen usw. 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 Einzelinstrumente zu Grunde liegen, findet sich in Anhang A.3. Die Abschätzung der Wirkung der Einzelinstrumente des MMS erfolgt gegenüber einem Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS). Im Rahmen des OMS wird unterstellt, dass das betroffene Einzelinstrument nicht existiert und somit keine Wirkung entfalten kann. Die Wirkung der Einzelinstrumente wird ab dem Jahr 2022 abgeschätzt, so dass die kumulierten jährlichen Einsparungen den Zeitraum zwischen 2022 und dem jeweiligen Betrachtungsjahr erfassen. Die kumulierten Einsparungen im Jahr 2030 erfassen damit den Zeitraum 01.01.2022-31.12.2030). Auch wenn ein Instrument schon vor 2022 existiert (z.B. das GEG oder die finanzielle Sanierungsförderung), wird seine Wirkung erst ab dem Jahr 2022 quantifiziert.

Tabelle 78 gibt einen Überblick, mit welchen Aktivitätsraten, spezifischen Effizienzen und sonstigen Annahmen die Wirkung der Einzelinstrumente gegenüber dem Vergleichsszenario abgeschätzt wird.

Tabelle 78: Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im MMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung

Instrument	Annahmen zur Referenz-Entwicklung ohne Instrumente (OMS)
Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG)	Abschätzung der isolierten Wirkung des Instruments gegenüber einem Vergleichsszenario ohne Bepreisung der CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe (Vergleich zweier Modellläufe mit INVERT/EE-Lab, bei denen bei einem Lauf der CO ₂ -Preis „eingeschaltet“, beim anderen „ausgeschaltet“ wird).

Instrument	Annahmen zur Referenz-Entwicklung ohne Instrumente (OMS)
Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG)	Im Vergleichsszenario werden weder der Einbau von Anlagen zur EE-Wärmeerzeugung noch Sanierungsmaßnahmen bei bestehenden Gebäuden finanziell gefördert. Bei Sanierungen sowie der Installation von Anlagen zur EE-Wärmeerzeugung wird angenommen, dass die im Rahmen des MMS durch die Bundesförderung induzierten Investitionen im Vergleichsszenario 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). Gebäudebestand: Die Berechnung der Einsparwirkung erfolgt unter der Annahme einer konstanten Sanierungsrate sowie unter Zugrundelegung gebäudetypspezifischer Einsparwerte für eine Sanierung auf die Mindestanforderungen des GEG für eine vollständige Sanierung. Es wird ferner angenommen, dass in rund der Hälfte aller Sanierungsfälle auch ohne GEG eine GEG-konforme energetische Modernisierung stattfinden würde. Bei der Abschätzung der Einsparwirkung der Nachrüstpflicht für alte Heizkessel wird für die Hälfte der betroffenen Kessel 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). Installationsverbot für neue Ölkessel ab 01.01.2026: Eingedenk des schon heute zu beobachtenden Anteils von Hybridanlagen beim Ölkesslersatz (z.B. Ölkessel+Solarthermie) wird auf Basis der Marktabsatzdaten der letzten Jahre angenommen, dass das Verbot ab 2026 pro Jahr rund 40.000 Ölkessel betrifft, ein Großteil davon in EZFH. Es wird ferner unterstellt, dass bei EZFH in 10 % der Fälle und bei MFH und Nichtwohngebäuden in 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).
EnSimiMaV	Im Vergleichsszenario bestehen keine Verpflichtungen zur Optimierung von Heizungsanlagen oder zur Durchführung eines hydraulischen Abgleichs. Die EnSimiMaV wird entsprechend ihrer Geltungsdauer bis 30.9.2024 berücksichtigt.
Vorbildfunktion Bundesgebäude	Für bestehende Bundesgebäude wird im Vergleichsszenario eine jährliche Sanierungsrate von 1,2 % (im Sinne einer äquivalenten Vollsaniierungsrate) unterstellt. Sanierungen erfolgen auf ein Durchschnittsniveau von KfW EG-100.

Quelle: Annahmen 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 einem zweiten Schritt durch eine Effektbereinigung herausgerechnet. Im dritten 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 Nachfrageseite (Gebäudehülle) sowie Versorgungsseite (Wärmeerzeuger) durchgeführt werden. Die Gesamtwirkung ergibt sich dann nicht aus einfacher Addition der beiden individuellen Maßnahmenwirkungen, sondern die prozentualen Einzelwirkungen sind multiplikativ zu verbinden.

In Tabelle 79 sind die Netto-Emissionsminderungen der Instrumentenbewertung pro Jahr aufgeführt. Die Wirkungen erfassen die Bereiche Raumwärme und Warmwasser. Die Bilanzierung der Emissionen erfolgt anhand der KSG-Sektorlogik. Ein mit Strom oder Fernwärme beheiztes Gebäude verursacht im KSG-Gebäudesektor keine Emissionen. Diese werden im KSG-Sektor Energiewirtschaft bilanziert. Gleiches gilt, wenn die Instrumente zu Mehr- oder Minderverbräuchen an Strom oder Fernwärme führen.

Tabelle 79: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente im MMS (ohne Wirkungen auf Umwandlungssektor, Bilanzraum Gebäude)

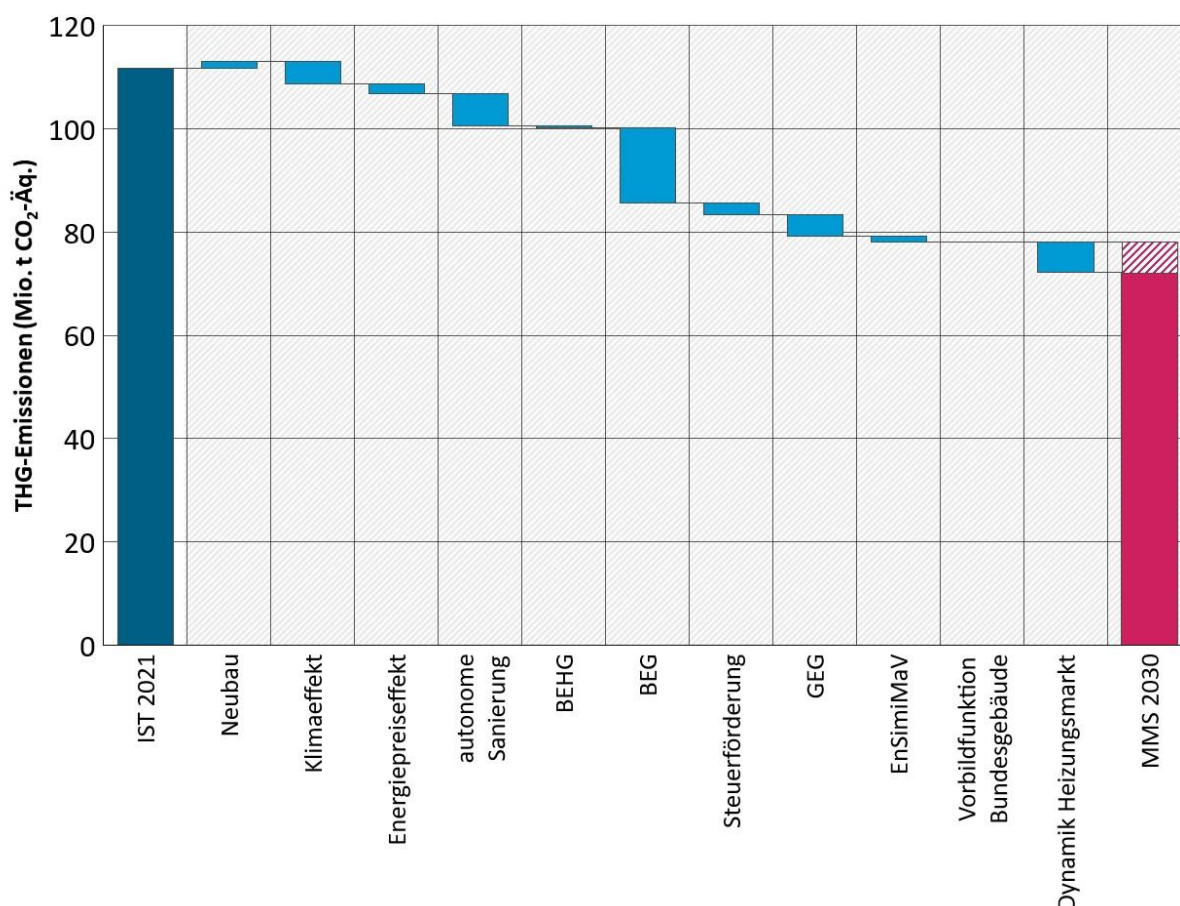
Direkte Emissionsminderung* (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungsabschätzung	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG)	2022	0,2	0,4	1,0	1,3	k.A.	k.A.
Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG)	2022	6,7	14,6	22,0	28,9	k.A.	k.A.
Steuerliche Förderung der Gebäudesanierung	2022	1,1	2,4	3,6	4,9	k.A.	k.A.
Gebäudeenergie-Gesetz (GEG)	2022	2,0	4,1	6,2	8,4	k.A.	k.A.
EnSimiMaV	2023	1,1	1,1	0,6	0,1	k.A.	k.A.
Vorbildfunktion Bundesgebäude	2022	0,0	0,1	0,1	0,2	k.A.	k.A.

Anmerkung: * Nur fossile Brennstoffe in der dezentralen Wärmeerzeugung ohne Fernwärme und Strom

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 49 zeigt für das Jahr 2030 die Minderungswirkung der Instrumente im MMS sowie anderer emissionsrelevanter Effekte gegenüber dem Emissionswert für 2021. Bilanzraum ist dabei die Raumwärme- und Warmwasserversorgung, also ein Teilausschnitt des Gebäudesektors nach KSG-Zuschnitt.

Minderungswirkungen für Einzelinstrumente werden nur bis 2040 ausgewiesen. Die Wirkung von Einzelinstrumenten ist stark abhängig von der schwer abschätzbaren Entwicklung des Umfeldes (z.B. Technologie- und Kostenentwicklungen, individuelle Einstellung von Gebäudeeigentümer*innen zu Sanierungen, Marktlage). Außerdem kann ein Politik-Mix der Gegenwart keine Herausforderungen adressieren, deren Eintreten noch mit Unsicherheiten behaftet ist. Entsprechend unsicher ist die zukünftige Wechselwirkung der im Rahmen der Szenarien „starr“ ausgestalteten Einzelinstrumente (Beispiel: 65 %-Anforderung führt zum stärkeren Phase-Out von Gas-Kesseln -> Durchsatz durch Gasverteilnetze nimmt ab -> Netzentgelte steigen -> Einbau von Gas-Kessel wird unwirtschaftlicher -> Förderbedarf für klimafreundliche Alternativen sinkt).

Abbildung 49: Minderungswirkung der Instrumente des MMS im Jahr 2030 im Vergleich zu den Sektoremissionen 2021 (Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser)

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Neubau: Aufgrund von Neubauaktivität nimmt bis 2030 sowohl die Wohn- als auch die gewerbliche Nutzfläche zu. Dies geht mit Mehremissionen einher. Diese berechnen sich aus dem Nettoflächenzuwachs, Annahmen zum energetischen Standard (GEG-Anforderungen) sowie dem technologie- und Energieträgermix für die Wärmeversorgung. Neubaufäche und Energieträgermix orientieren sich dabei an den Werten und Entwicklungen der letzten Jahre.

Klimaeffekt: Steigen die Außentemperaturen infolge der Klimakrise, muss weniger geheizt werden, was den Einsatz fossiler Brennstoffe und damit die Emissionen in Gebäuden verringert. Auf Grundlage der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes reduzieren sich die in Invert/ee-Lab hinterlegten Heizgradtage bis 2045 linear, wie Abbildung 51 zeigt. Die daraus folgende Abnahme des Endenergieverbrauchs fossiler Brennstoffe wird mit dem sich zeitlich verändernden Anteil an fossiler Wärmeerzeugung verrechnet.

Energiepreiseffekt: Dessen Abschätzung erfolgt analog zur Bestimmung des Effekts des BEHG mit Invert/ee-Lab: Ein Modelllauf mit den Preisen aus dem vergangenen Projektionsbericht 2021 wird einem Modelllauf gegenübergestellt mit den Preisen gemäß der Rahmendaten des Projektionsberichts 2023. Durch die hohen Preise insbesondere für Gas in der ersten Hälfte der Zwanzigerjahre fallen vermehrt Investitionsentscheidungen zugunsten erneuerbarer Wärmeerzeuger.

Autonome Sanierung: Hauseigentümer*innen würden auch ohne Instrumente Sanierungen durchführen, die zu Energie- und Emissionseinsparungen führen. Dies gilt sowohl für Sanierun-

gen an der Gebäudehüllfläche als auch Maßnahmen an den Heizungsanlagen. Bei den Heizungsanlagen umfasst dies sowohl den Umstieg auf erneuerbare Wärmeenergien (bei Verzicht auf eine Förderung) als auch die Einsparungen, die aus den Effizienzgewinnen resultieren, die beim Austausch eines alten Gas- oder Ölkessels zu Gunsten eines effizienten Gas- oder Ölkessels entstehen.

Instrumente des MMS: Den größten Minderungseffekt erzielt die BEG, gefolgt vom GEG und der Steuerförderung. Die CO₂-Bepreisung durch das BEHG wirkt im Bündel der MMS-Instrumente vor allem als Türöffner/Enabler, also als eine Art Verstärkungsfaktor, der v.a. die Wettbewerbsfähigkeit klimaneutraler Heizungsvarianten gegenüber Gas- und Ölkesseln verbessert. Die Höhe des unterstellten CO₂-Preises reicht jedoch allein nicht aus, isoliert signifikante Einsparungen zu induzieren.

Dynamik Heizungsmarkt: Bei den Gebäuden erfolgen die Modellierung des Instrumentenbündels und die Einzelinstrumentenbewertung unabhängig voneinander und basieren deshalb teilweise auf verschiedenen Rahmenbedingungen und Annahmen. Im MMS werden in der Szenarienmodellierung mit dem Gebäudesimulationsmodell Invert/ee-Lab bis 2030 deutlich mehr EE-Anlagen außerhalb der Förderung der BEG realisiert. Diese Investitionen finden vor dem Hintergrund einer veränderten Weltlage bzw. einem Energiepreisschock und dem Wunsch nach Versorgungssicherheit statt, die mit den zum Zeitpunkt der Modellierung angenommenen hohen Energiepreisen einhergehen. Durch hohe Preise und der damit verbundenen Annahme eines vorzeitigen Austauschs von fossilen Wärmeversorgungssystemen ergeben sich zusätzliche Emissionseinsparungen. Da die Annahme zur Dynamik des Heizungsmarktes sehr sensitiv ist, wird der Unterschied aus Einzelinstrumentenbewertung und Modelllauf gestrichelt dargestellt. In der Einzelinstrumentenbewertung finden sich die zusätzlichen EE-Anlagen, die im MMS dem Effekt „Dynamik Heizungsmarkt“ zugeschrieben werden, in der Wirkung der MWMS-Instrumente wieder (v.a. 65 %-Anforderung).

Die Quantifizierung der Instrumente des MWMS erfolgt gegenüber dem MMS. Im Hinblick auf das Zusammenwirken der Instrumente gelten die oben dargestellten Effekte. Tabelle 80 listet die drei Kerninstrumente auf: Dies sind die 65 %-Anforderung für erneuerbare Wärmeenergien, die Weiterentwicklung der energetischen Standards im GEG sowie die Mindestenergieeffizienzstandards für Bestandsgebäude (MEPS). Eine detaillierte Beschreibung dieser Instrumente findet sich in Anhang A.3. Die Wirkung flankierender Instrumente wird nicht abgeschätzt:

- Teilwärmemietenmodell als Reform der Modernisierungsumlage
- Qualifikationsoffensive Wärmepumpe
- Überarbeitung für die Anforderungen an den Energieausweis.

Tabelle 80: Umsetzung und Annahmen für die Einzelinstrumentenbewertung im MWMS

Einzelmaßnahme	Annahmen zur Umsetzung
Gebäudeenergiegesetz (GEG): Weiterentwicklung der energetischen Standards	Neubau: Verschärfung des Neubaustandard für Wohn- und Nichtwohngebäude hinsichtlich des zulässigen Jahresprimärenergiebedarfs auf EH-40 ab 01.01.2025 (gilt für Bauanträge ab 01.01.2025 -> erstes Wirkjahr 2026) Gebäudebestand: Im Rahmen der bedingten Sanierungspflichten Anhebung der Bauteilanforderungen an den Leitstandard EH-70 (dies betrifft die U-Wert-Anforderung aus Anlage 7 des GEG); bei im Vergleich zum MMS gleichbleibender Sanierungsrate erhöht sich damit die Sanierungstiefe; Wirkbeginn 2024

Einzelmaßnahme	Annahmen zur Umsetzung
Gebäudeenergiegesetz (GEG): 65 %-EE-Anforderung	Inkrafttreten der Regelung im Laufe von 2023, so dass Anforderung für jeden Heizungstausch ab 01.01.2024 gilt; Absatz Heizanlagen 2024-2030 analog den Absatzzahlen aus 2022, also knapp 1 Mio. Anlagen pro Jahr (dahinter steckt die Annahme, dass infolge eines dauerhaften höheren Energiepreinsniveaus auch die Austauschrate und damit der Marktabsatz an Heizanlagen auf einem höheren Niveau bleibt als im Durchschnitt der Vorjahre). Für den Erfüllungsmix (also die Frage, mit welchen Technologieoptionen die Gebäudeeigentümer*innen die 65 %-Anforderung materiell erfüllen, Differenzierung zwischen Neubau und Gebäudebestand, Gebäudetypen (EZFH, MFH, Nichtwohngebäude) und verschiedenen Erfüllungsoptionen (v.a. 100 % EE, 65 % EE + Gaskessel, Anschluss Fernwärme). Ausnahmen gelten im Falle technischer Unmöglichkeit, die Primärpflicht zu erfüllen oder im Falle unbilliger Härte; Übergangsfristen gelten beim Anschluss an ein Wärmenetz, wenn dieses an einem betroffenen Gebäude noch nicht anliegt. Bereinigung um autonome Entwicklung (auch ohne 65 %-Anforderung wechseln Gas- und Ölkesselbetreiber beim Kesseltausch anteilig zu 65 %-kompatiblen Heizsystemen oder fossil-basierten Heizsystemen, die effizienter und damit weniger CO ₂ -intensiv sind als die ausgetauschten alten Gas- und Ölkessel).
Mindestenergieeffizienzstandards (MEPS)	Nichtwohngebäude: Unterteilung des Bestandes mit Basis 2020 nach Primärenergieverbrauch zur Definition von maximalen Schwellenwerten, denen alle Gebäude zeitpunktbezogen entsprechen müssen: 2030: 15 % und 2034: 25 %. Ein Teil der betroffenen Gebäude erfüllt diese Anforderung durch sowieso durchgeführte (autonome) Sanierungen. Einem weiteren Teil wird unterstellt, dass nach angenommenem Beschluss der MEPS in 2025 Bauteile, die ihren Reinvestitionszyklus erreicht haben, direkt ambitionierter saniert werden, um die Anforderungen zu erfüllen. Der Großteil der betroffenen Gebäude führt in den Jahren vor den Erfüllungszeitpunkten Sanierungen von einzelnen Bauteilen durch oder wechselt zu einem erneuerbaren Wärmeversorger, um den primärenergetischen Anforderungen zu entsprechen. Wohngebäude: Das definierte Effizienzziel für den Gesamtbestand ist kein Instrument und entfaltet daher keine Minderungswirkung.

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Das Ergebnis der Berechnung der Netto-Minderungen der Treibhausgasemissionen pro Jahr der drei Instrumente im MWMS gegenüber dem MMS ist in Tabelle 81 zu sehen.

Tabelle 81: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen pro Jahr für ausgewählte Instrumente im MWMS gegenüber dem MMS (ohne Wirkungen auf Umwandlungssektor) (Bilanzraum Gebäude)

Direkte Emissionsminderung* (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungsabschätzung	2025	2030	2035	2040	2045	2050
GEG: Weiterentwicklung der energetischen Standards	2024/2025	0,8	2,9	4,9	7,0	k.A.	k.A.
65 %-Anforderung	2024	4,0	13,3	21,7	29,2	k.A.	k.A.
Mindestenergieeffizienzstandards (MEPS) für NWG	2025	0,0	0,3	0,5	0,3	k.A.	k.A.

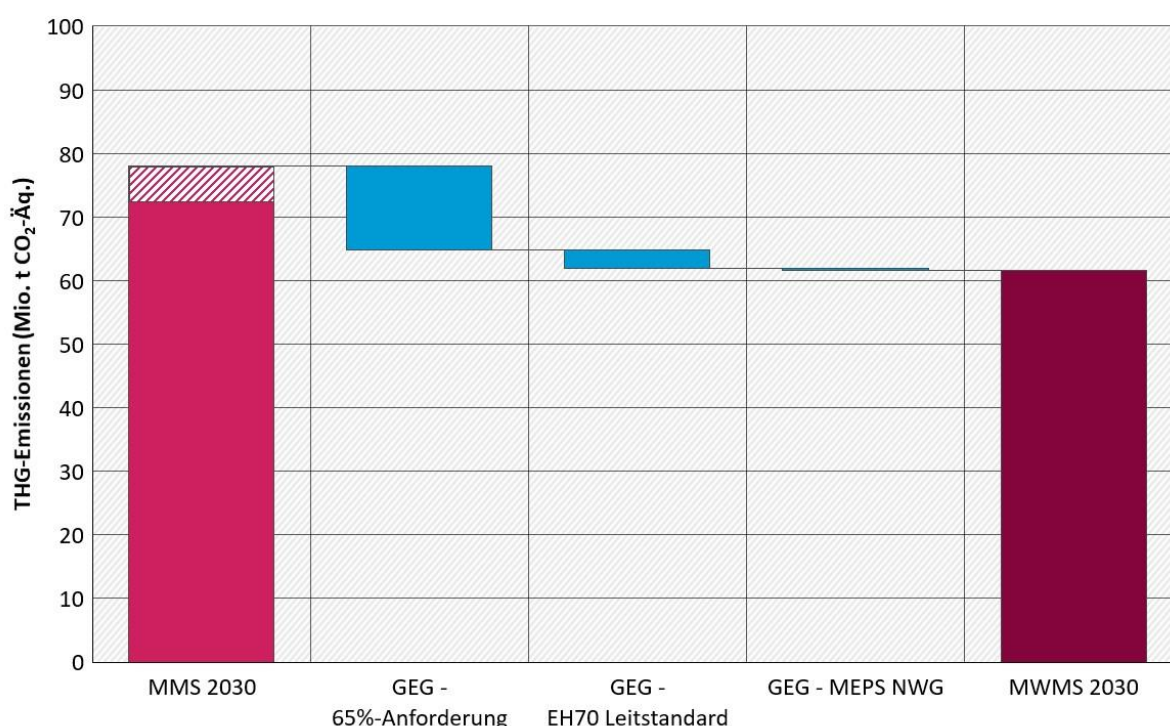
Anmerkung: * Nur fossile Brennstoffe in der dezentralen Wärmeerzeugung ohne Fernwärme und Strom

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 50 zeigt für das Jahr 2030 die Minderungswirkung der Instrumente MWMS gegenüber dem MMS. Bilanzraum ist dabei wieder die Raumwärme- und Warmwasserversorgung in Gebäuden des KSG-Sektors.

Im MWMS ist die 65 %-Anforderung in der ursprünglichen Kabinettsfassung das wirkmächtigste Instrument. Die durch den Effekt „Dynamik Heizungsmarkt“ im MMS ohne Instrumentenzuordnung verbauten EE-Heizungen (gestrichelter Balken), werden im Rahmen der Einzelinstrumentenbewertung von der 65 %-Anforderung erfasst. Die Einführung des EH70-Standards als Leitstandard für die bedingten Sanierungsanforderungen des GEG führt ebenfalls zu signifikanten Einsparungen. MEPS für Nichtwohngebäude führen aufgrund ihres vergleichsweise geringen Anteils am Gebäudebestand hingegen nur zu geringen Einsparungen.

Abbildung 50: Minderungswirkung der Instrumente des MWMS im Jahr 2030 im Vergleich zum MMS (Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser)



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

6.3 Sektorspezifische Parameter & Annahmen

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 (Anhang A.1) berechnet. Letztere leiten sich aus den aktuellen Vorausberechnungen der Europäischen Kommission ab (EC 2022a). 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 82). 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 82: Vergleich der Anzahl privater Haushalte verschiedener Quellen

	Quelle	2020	2025	2030	2035	2040
Bevölkerung (Mio.)	Anhang A.1	83,2	83,6	83,8	83,8	83,5
Haushaltsgröße	Basierend auf nationalen Prognosen (Statistisches Bundesamt 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: (EC 2020; Statistisches Bundesamt 2017)

Wohnfläche und Entwicklung der Nutzfläche in Nichtwohngebäuden

Tabelle 83 zeigt die Bevölkerungsentwicklung sowie die Veränderung der spezifischen Wohnfläche. Seit 2002 ist die Wohnfläche pro Kopf von 41,4 m² auf 46,7 m² pro Person im Jahr 2018 angestiegen (Statistisches Bundesamt 2019). Nach den jetzigen Prognosen wird die Pro-Kopf-Wohnfläche zumindest bis 2030 weiter zunehmen. Bis zum Jahr 2030 entspricht die Entwicklung in Tabelle 83 der Wohnungsmarktprognose des BBSR (Held und Waltersbacher 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 m² auf insgesamt 52 m² pro Kopf steigt. Die Nutzfläche in Nichtwohngebäuden ist an die Wohnfläche gekoppelt und folgt deshalb dem relativen Zuwachs der spezifischen Wohnfläche.

Tabelle 83: 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: (Statistisches Bundesamt 2019; Held und Waltersbacher 2015)

Berücksichtigung des Klimawandels

Bei der Berechnung des Endenergieverbrauchs 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.

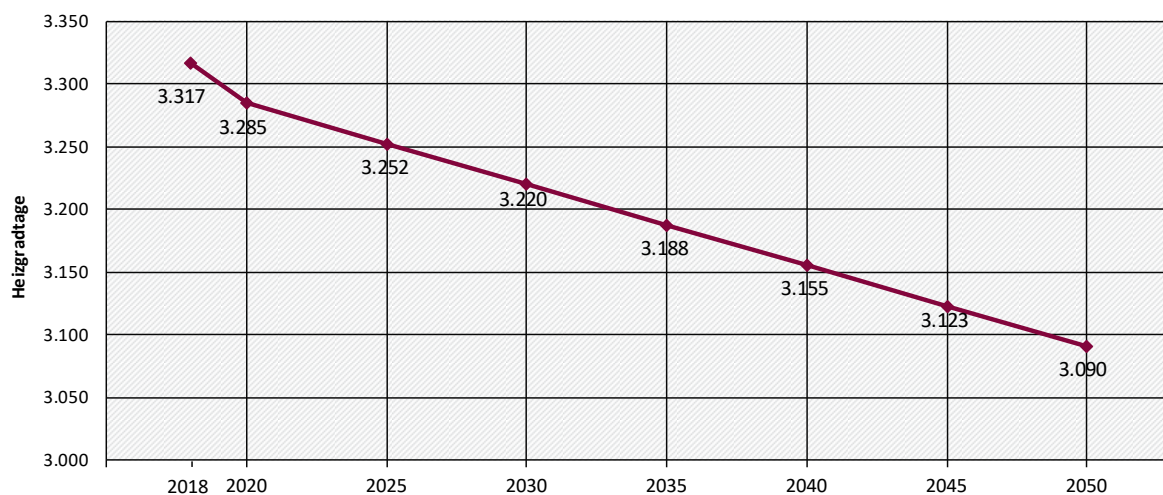
Für die Berechnung der Temperaturentwicklung werden die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Diese umfassen Daten für ein mittleres Jahr, sowie für einen extremen Sommer und Winter. Die Berechnung der Klimamodelle erfolgt auf Basis von repräsentativen Konzentrationspfaden (RCPs), 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 (BBR 2017; Spinoni et al. 2018).

Nach aktuellen Berechnungen des Climate Action Tracker (Climate Analytics; NewClimate Institute) 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 Endenergieverbrauch in In-vert/ee-Lab ist die Entwicklung der Heizgradtage entscheidend. Die Entwicklung der Heizgradtage bis 2050 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. Abbildung 51 zeigt die jährliche Entwicklung der Heizgradtage im Zeitraum 2018 bis 2050.

Abbildung 51: Entwicklung der Heizgradtage im Zeitraum 2018 bis 2050



Quelle: Berechnungen IREES auf Basis von BBSR (2017)

7 Verkehr

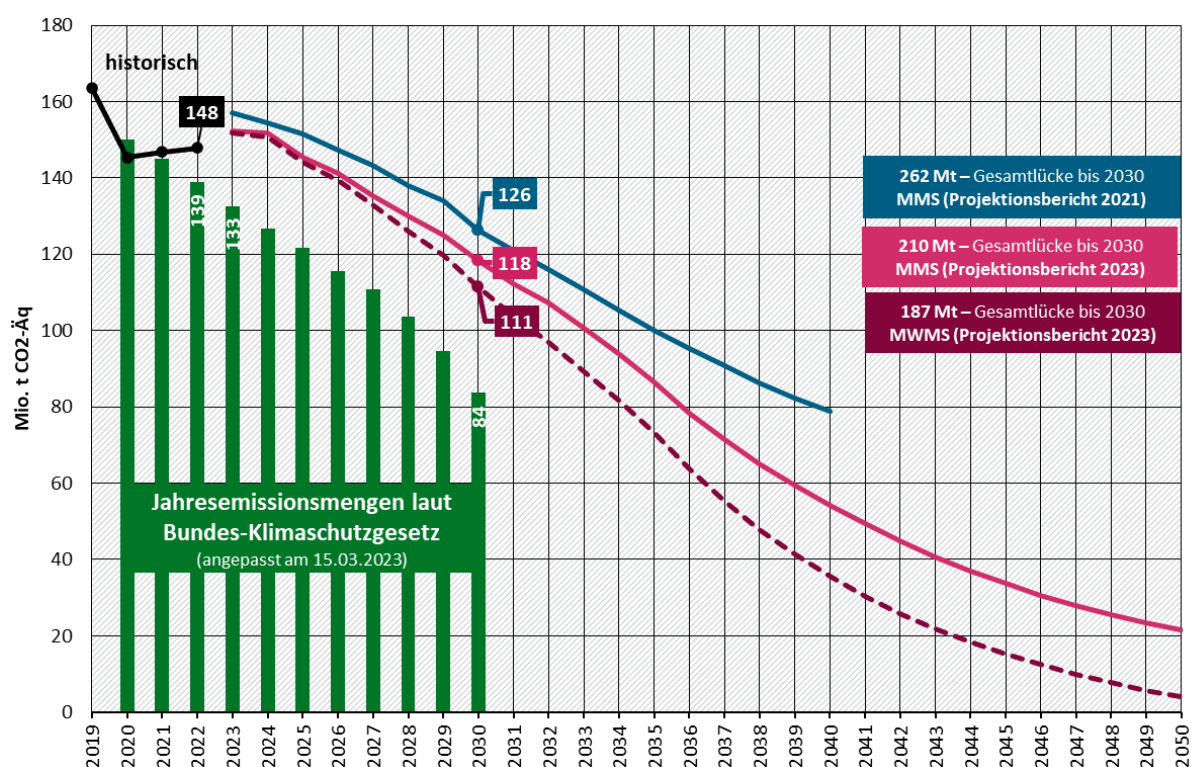
Der Sektor Verkehr umfasst im Bundes-Klimaschutzgesetz die Emissionen des inländischen Flugverkehrs (CRF-Quellgruppe 1.A.3.a), des Straßenverkehrs (CRF 1.A.3.b), des Schienenverkehrs (CRF 1.A.3.c) und der Binnenschifffahrt (CRF 1.A.3.c). Emissionen des internationalen Luftverkehrs (CRF 1.D.1.a) sowie der Hochseeschifffahrt (CRF 1.D.1.b) sind nicht enthalten. Sie werden nur nachrichtlich ausgewiesen.

Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

7.1 Zentrale Ergebnisse

In Abbildung 52 ist die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im nationalen Verkehrssektor dargestellt. Im Vergleich zu den anderen Sektoren ist im Sektor Verkehr die Gesamtlücke am größten und der Fortschritt zur Minderung der Emissionen zwar vorhanden, aber unzureichend, um die Jahresemissionsmengen des KSG zu erreichen. Sowohl im MMS als auch im MWMS liegen die Emissionen unterhalb denen der letzten Projektion aus dem Projektionsbericht 2021. Wesentliche Gründe sind gestiegene Energiepreise sowie neu hinzugekommene Instrumente (im MMS z.B. Novellierung und Fortschreibung der EU-CO₂-Emissionsstandards für neue Pkw und leichte Nutzfahrzeuge auf EU-Ebene, vollständige EEG-Umlage-Entlastung beim Strompreis, Erhöhung und Fortschreibung der THG-Quote), die eine Elektrifizierung des Fahrzeugbestands vorantreiben sowie eine Verlagerung auf den Umweltverbund anreizen. Im MMS nimmt die Lücke zu den Jahresemissionsmengen des KSG über die Jahre dennoch zu und erreicht im Jahr 2030 eine Höhe von 34,7 Mio. t CO₂-Äq.⁵⁴ Die Gesamtlücke bis 2030 beläuft sich auf 210 Mio. t CO₂-Äq. Im MWMS bleibt die Lücke näherungsweise konstant und liegt bei etwa 27,7 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030. Die Gesamtlücke im MWMS beläuft sich bis 2030 auf 187 Mio. t CO₂-Äq.

⁵⁴ Die Bilanzierung der Emissionen aus der Verbrennung von PtL-Kraftstoffen erfolgt nach den Regeln der Treibhausgasinventare. Bei der Nutzung von importierten PtL-Kraftstoffen, die mit CO₂ aus der Luft hergestellt wurden, entsteht im Ausland eine CO₂-Senke. Wenn atmosphärischer Kohlenstoff anders bilanziert würde, sind die Emissionen des Verkehrssektors 3,7 Mio. t CO₂ niedriger.

Abbildung 52: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr

Anmerkungen: Die dargestellten Emissionsdaten basieren auf dem Datenstand 2023, modelliert wurde mit dem Datenstand 2022. Für die Jahre ab 2023 wurden die vom UBA nach § 4 Abs. 3 angepassten JEM dargestellt. Aufgrund teilweise unterschiedlicher Parametrisierung der Instrumente sind die Projektionsberichte nicht vollständig konsistent.

Quelle: (UBA 2023b), Modellierung: Öko-Institut

Tabelle 84 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im MMS und Tabelle 85 im MWMS, aufgeteilt nach Verkehrsart in Fünfjahresschritten. Absolut gesehen trägt der heute wesentlich für die Treibhausgasemissionen verantwortliche Straßenverkehr mit Abstand am meisten zur Minderung bei und erreicht bis 2050 eine Minderung um rund 140 Mio. t CO₂-Äq. gegenüber 2019 im MMS (155 Mio. t CO₂-Äq. im MWMS).

Tabelle 84: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.							
Ziviler Luftverkehr	2,3	2,4	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1
Straßenverkehr	159,2	140,8	114,1	82,5	50,3	29,8	17,9
Schienenverkehr	0,8	0,8	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
Schiffsverkehr	1,6	1,4	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3
Gesamt	163,8	145,4	118,3	86,5	54,3	33,7	21,7
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		121,7	83,7				
Abweichung vom Sektorziel		23,7	34,7				

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Nachrichtlich:							
Internationaler Flugverkehr	29,8	32,0	33,7	34,9	35,9	36,8	37,4
Internationaler Schiffsverkehr	3,7	3,7	3,8	3,6	3,4	3,2	3,1
Gesamt inklusive nachrichtlich	197,3	181,1	155,8	125,1	93,7	73,7	62,1

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Tabelle 85: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.						
Ziviler Luftverkehr	2,3	2,4	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1
Straßenverkehr	159,2	139,4	107,1	69,1	31,8	11,6	0,5
Schienenverkehr	0,8	0,9	0,5	0,5	0,4	0,3	0,0
Schiffsverkehr	1,6	1,4	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3
Gesamt	163,8	144,1	111,4	73,2	35,7	15,3	4,0
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		121,7	83,7				
Abweichung vom Sektorziel		22,4	27,7				
Nachrichtlich:							
Internationaler Flugverkehr	29,8	32,0	33,7	34,9	35,9	36,8	37,4
Internationaler Schiffsverkehr	3,7	3,7	3,8	3,6	3,4	3,2	3,1
Gesamt inklusive nachrichtlich	197,3	179,8	148,8	111,7	75,1	55,3	44,4

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

In Tabelle 86 sind die Treibhausgasemissionen der beiden Szenarien gegenübergestellt, absolut sowie jeweils relativ zu den Bezugsjahren 1990 und 2005. Bis 2050 können die Emissionen im MMS um rund 87 % und im MWMS um rund 98 % gegenüber 1990 gesenkt werden.

Tabelle 86: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien

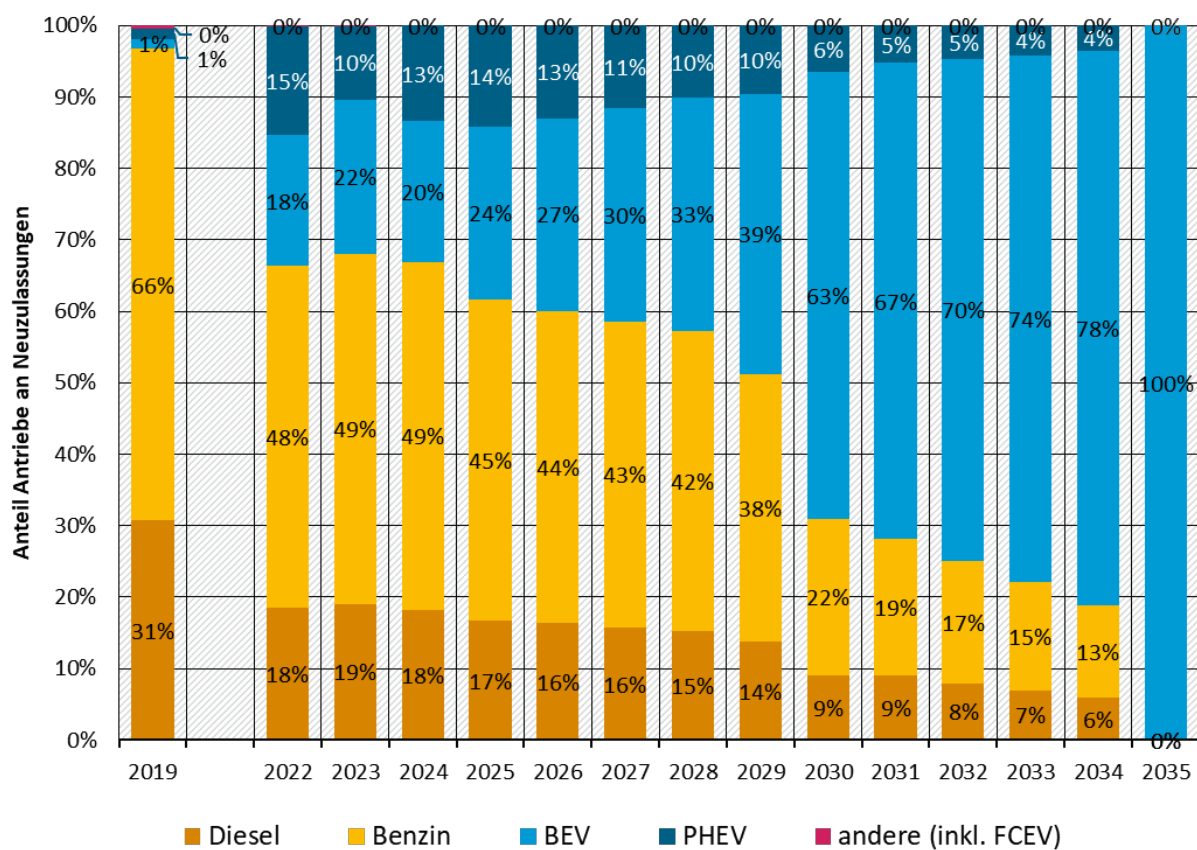
	1990	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.								
Entwicklung 1990 – 2019	163,3	159,7	163,8						
MMS				145,4	118,3	86,5	54,3	33,7	21,7
MWMS				144,1	111,4	73,2	35,7	15,3	4,0
	Veränderung ab 1990 in %								

	1990	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Entwicklung 1990 – 2019		-2,1	+0,4						
MMS				-10,9	-27,5	-47,0	-66,7	-79,4	-86,7
MWMS				-11,7	-31,8	-55,2	-78,1	-90,6	-97,6
Veränderung ab 2005 in %									
Entwicklung 2005 – 2019			+2,6						
MMS				-9,0	-25,9	-45,8	-66,0	-78,9	-86,4
MWMS				-9,8	-30,3	-54,2	-77,6	-90,4	-97,5

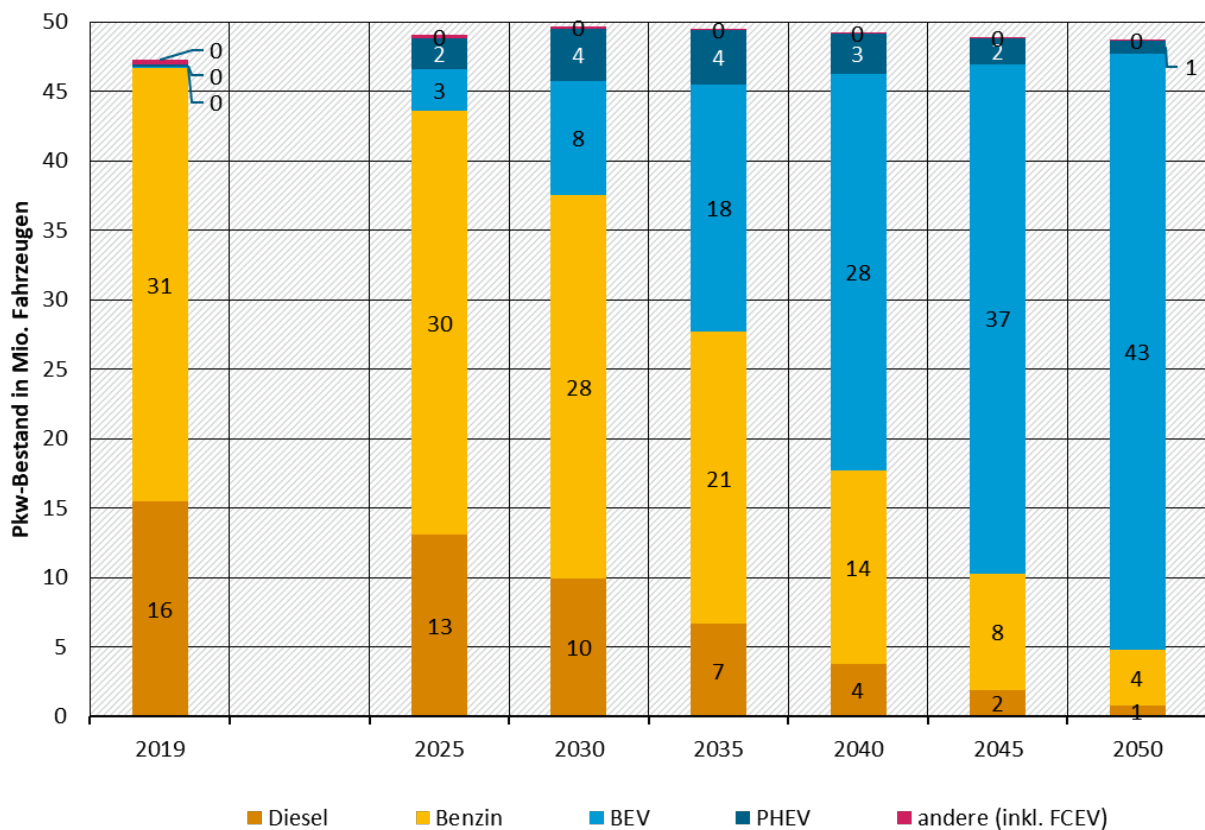
Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Abbildung 53 zeigt die Entwicklung der Neuzulassungsstruktur für Pkw im MMS und MWMS. Da im MWMS mit der Einführung des Deutschlandtickets im Personenverkehr nur ein Instrument gegenüber dem MMS hinzugekommen ist, ergeben sich in der Neuzulassungsstruktur zwischen den beiden Szenarien nur unwesentliche Änderungen. Die Neuzulassungen batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) steigen in den kommenden Jahren steil an und erreichen im Jahr 2030 einen Anteil von 63 % (entspricht 1,9 Mio. BEV). Ab dem Jahr 2035 werden bis auf sehr wenige Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) ausschließlich BEV neu zugelassen (entspricht 2,7 Mio. BEV). Hier wird insbesondere der Einfluss der verschärften EU-CO₂-Standards auch mit Zielen nach 2030 auf EU-Ebene deutlich, die eine Reduktion der CO₂-Emissionen bei den Neuzulassungen um 100 % ab dem Jahr 2035 vorschreiben. FCEV weisen in den meisten Fällen deutlich höhere Gesamtnutzungskosten auf (TCO), sodass sie im Bereich der Pkw eine vernachlässigende Rolle im Antriebsmix einnehmen. Der Anteil von Plugin-Hybriden (PHEV) wächst im Jahr 2025 auf 14 % leicht an und geht in den Folgejahren auf null zurück. Im Bestand führt die Elektrifizierung im Jahr 2030 zu 8,2 Mio. BEV und 3,7 Mio. PHEV.⁵⁵ Bis zum Jahr 2050 steigt der Anteil von BEV im Bestand auf ca. 90 %. Insgesamt wird die historische Zunahme des Pkw-Bestandes ab dem Jahr 2030 durch den Bevölkerungsrückgang leicht gedämpft und erreicht eine Stückzahl von 48 Mio. Fahrzeugen im Jahr 2050 (Abbildung 54).

⁵⁵ Andere Studien und Abfragen, die im Auftrag der Bundesregierung durch einzelne Ressorts durchgeführt wurden, weisen im Ergebnis einen signifikant höheren Pkw-Bestand im Jahr 2030 von BEV auf. Dies ist auf Unterschiede in den Annahmen, Methoden und verwendeten Datenquellen zurückzuführen.

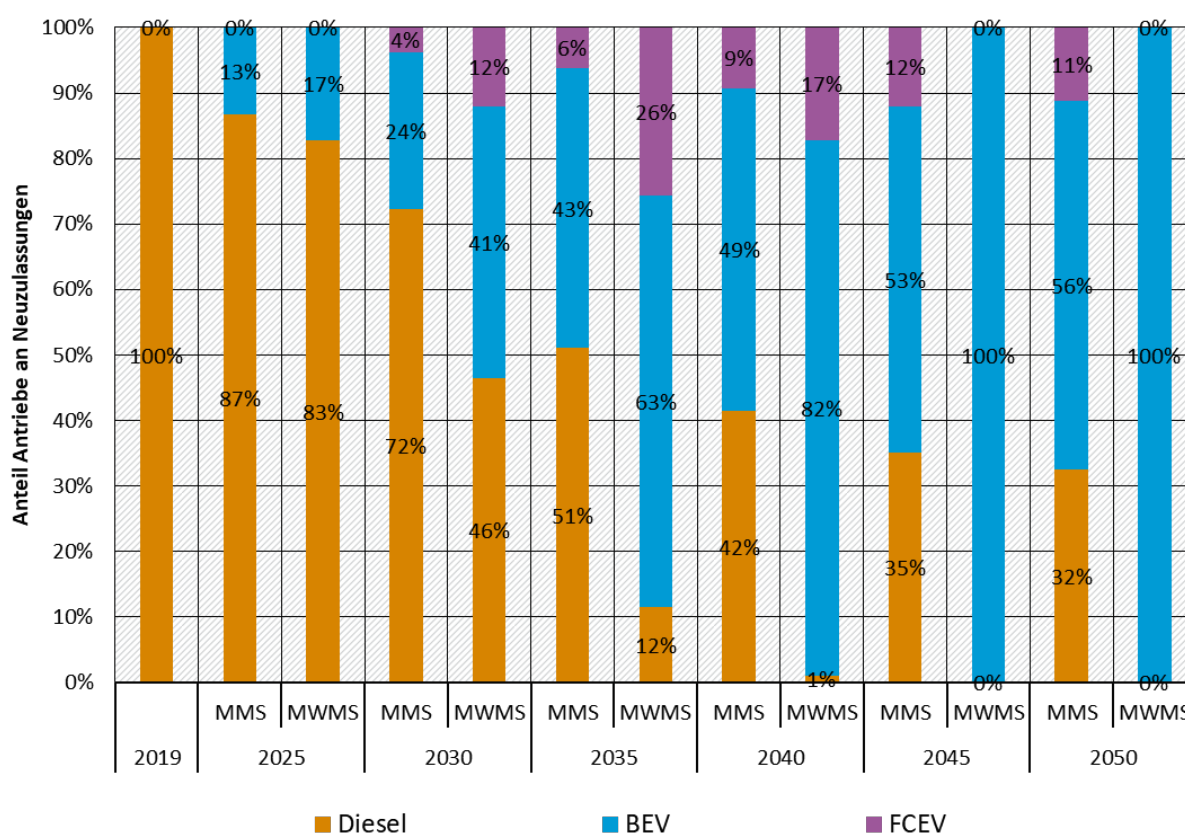
Abbildung 53: Antriebsverteilung der Pkw-Neuzulassungen in MMS/MWMS

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 54: Entwicklung des Pkw-Bestands in MMS/MWMS

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

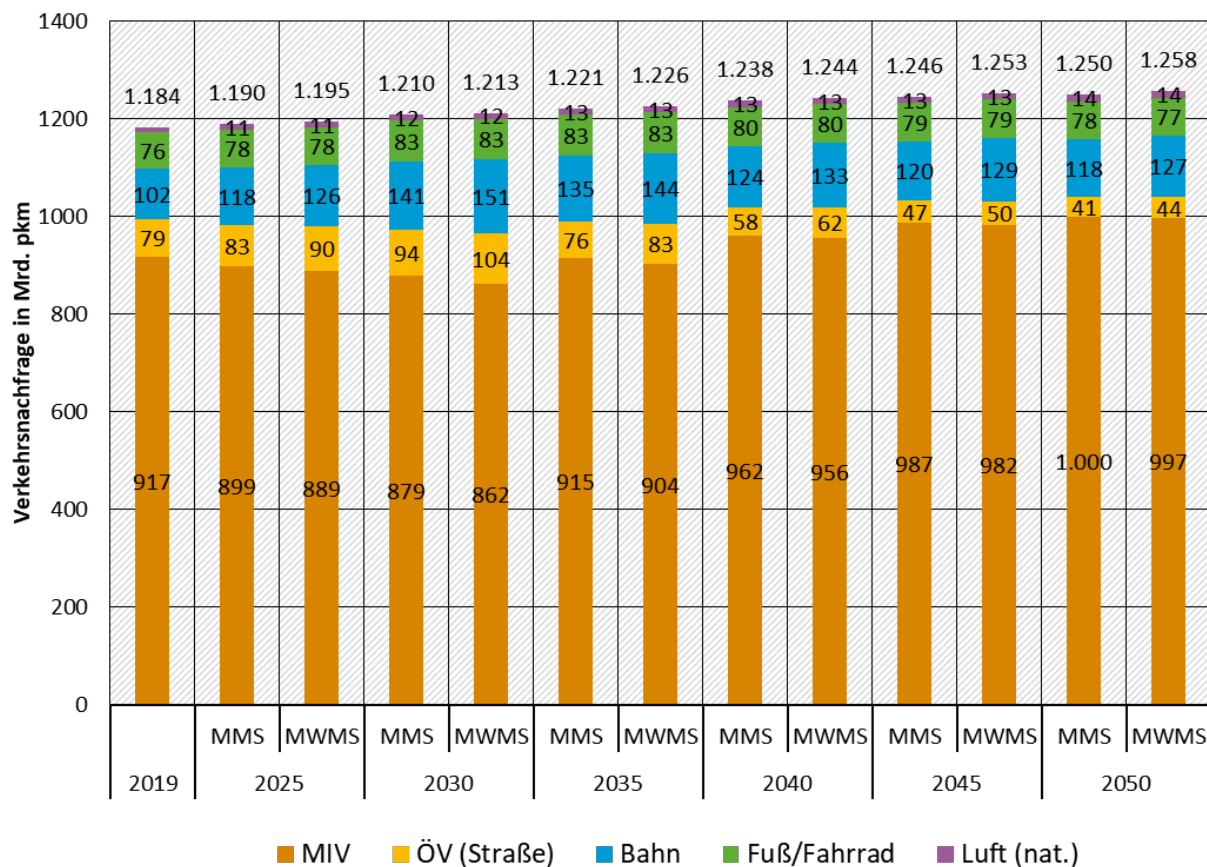
Die Entwicklung der Neuzulassungen schwerer Nutzfahrzeuge ab 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht in Abbildung 55 unterscheidet sich im MMS und MWMS in Abhängigkeit der Ausgestaltung der Lkw-Maut. Die stärkere CO₂-Spreizung der Lkw-Maut im MWMS bewirkt eine schnellere Elektrifizierung der Neufahrzeugflotten durch batterieelektrische Antriebe (BEV) und Lkw mit Wasserstoff-Brennstoffzellen (FCEV). In Summe erreichen die emissionsfreien Antriebe im Jahr 2030 einen Anteil an den Neuzulassungen von 28 % im MMS und 53 % im MWMS. Im MWMS werden ab dem Jahr 2040 fast ausschließlich emissionsfreie Lkw und Sattelzüge neu zugelassen, während im MMS im Jahr 2050 knapp ein Drittel der Neuzulassungen auf Neufahrzeuge mit Dieselmotor entfällt. BEV besitzen gegenüber FCEV einen komparativen Kostenvorteil, ihr Hochlauf ist aber mittelfristig durch die nicht voll ausgebaute Ladeinfrastruktur limitiert. Mit einer voll ausgebauten Ladeinfrastruktur für BEV geht bei den Neuzulassungen der Anteil an FCEV bis zum Jahr 2050 auf quasi Null zurück. Die elektrische Fahrleistung steigt in den Szenarien im Jahr 2030 auf 13 % (MMS) und 26 % (MWMS). Im Jahr 2050 werden 67 % (MMS) und 100 % (MWMS) erreicht.

Abbildung 55: Antriebsverteilung der Lkw-Neuzulassungen >12t in MMS und MWMS

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

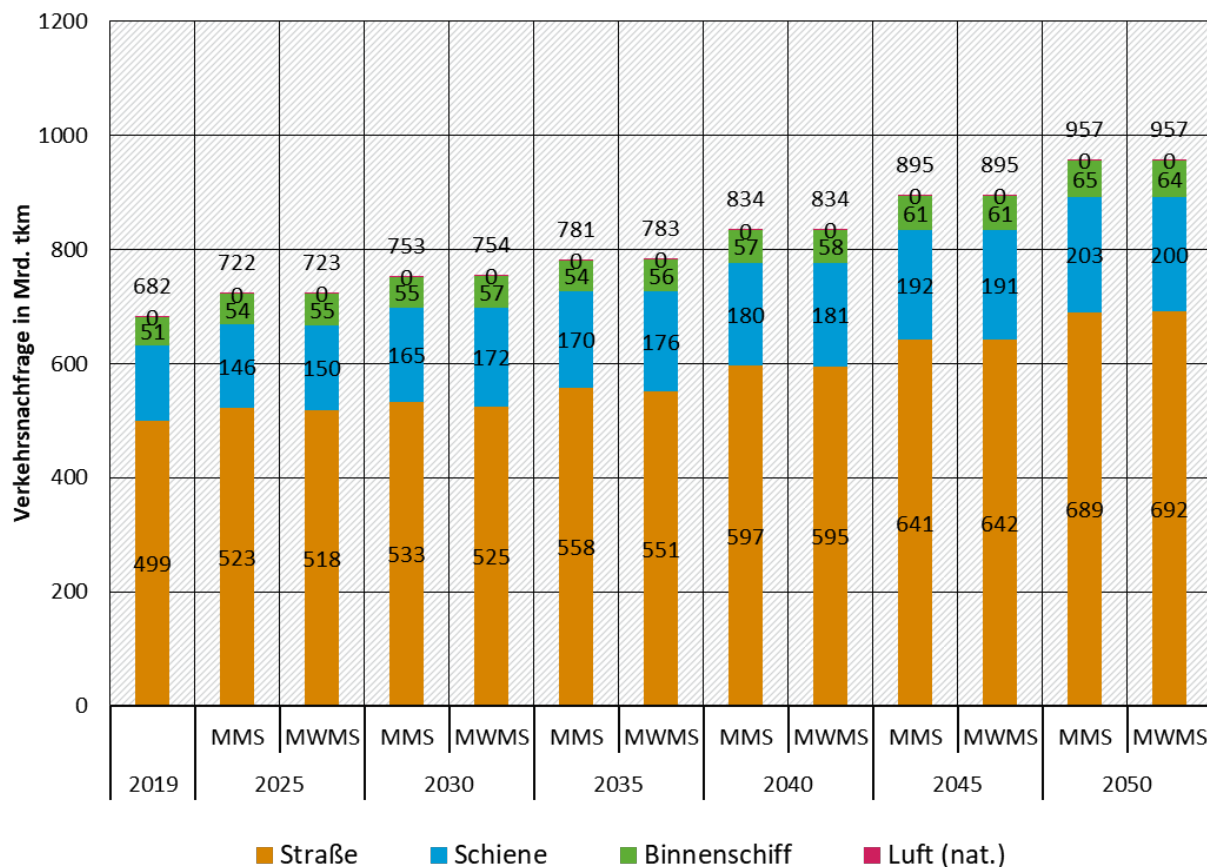
Die Entwicklung der Nachfrage im Personenverkehr in Abbildung 56 verzeichnet eine moderate Zunahme im Zeitraum von 2019 bis 2050 um 5,6 % im MMS und 6,3 % im MWMS. Im Vergleich zum MMS höhere Kilometerkosten von Pkw mit Verbrennungsmotor (inkl. PHEV), die sich vor allem durch einen höheren Zielwert der THG-Quote im MWMS ergeben⁵⁶, führen zu einem Rückgang des motorisierten Individualverkehrs (MIV) im MWMS gegenüber dem MMS von 879 auf 862 Mrd. Personenkilometern im Jahr 2030. Die höheren Kilometerkosten führen zu einer Verlagerung auf den öffentlichen Verkehr (ÖV), welche zudem durch auf die ÖV-Förderung ausgelegte Instrumente (z.B. Erhöhung der GVFG-Mittel) im MMS und MWMS unterstützt wird. Im Vergleich zum Jahr 2019 sinkt der Anteil des MIV am Personenverkehr bis zum Jahr 2030 zunächst von 77,4 % auf 72,6 % im MMS und 71,1 % im MWMS. Die zunehmende Elektrifizierung führt langfristig jedoch wieder zu sinkenden Kilometerkosten im MIV, sodass die Verkehrsleistung des MIV anschließend auf knapp 80 % im Modal Split im Jahr 2050 wieder ansteigt.

⁵⁶ In der THG-Quote gibt es einen Anpassungsfaktor für die zu erreichende Minderung der Treibhausgasemissionsintensität, wenn die THG-Quote wesentlich durch die THG-Emissionsminderungsbescheinigungen von Strom im Straßenverkehr erreicht wird. Durch die höhere Anzahl an batterieelektrischen Lkw steigt die an öffentlichen Ladepunkten geladene Strommenge, so dass sich der Zielwert der THG-Quote erhöht. Dies führt zu höheren Kosten für die Inverkehrbringer der Kraftstoffe, die diese Kosten an die Fahrzeugnutzer weitergeben.

Abbildung 56: Personenverkehrsnachfrage in MMS und MWMS

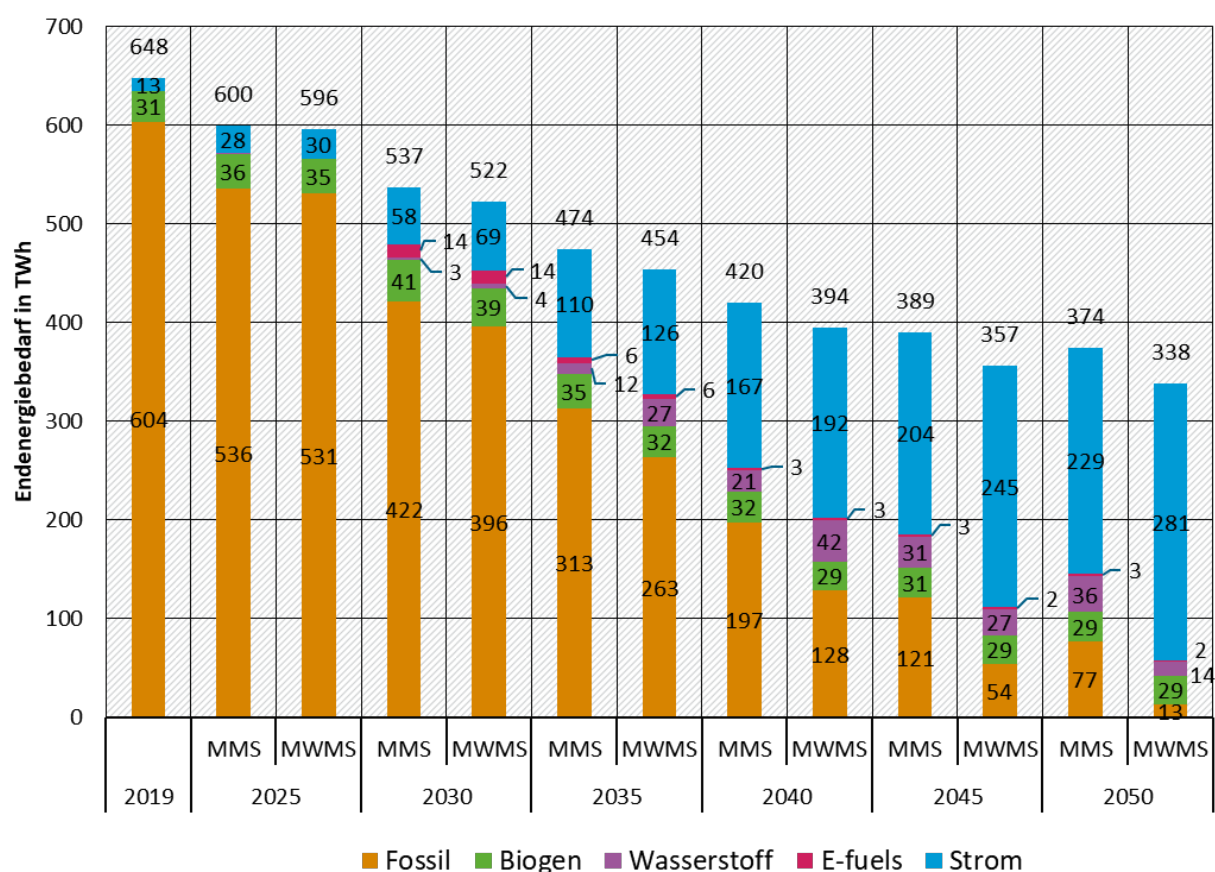
Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Die Güterverkehrsleistung steigt im MMS und MWMS bis zum Jahr 2050 auf 957 Tonnenkilometer an (vgl. Abbildung 57). Gegenüber dem Jahr 2019 entspricht dies einem Zuwachs um 40,3 %. Die höhere Lkw-Maut für emittierende Lkw und Sattelzüge führt im MWMS gegenüber dem MMS zu einer moderaten Erhöhung der Nachfrage von Schienen- und Schiffstransporten. So werden im Jahr 2030 7 Mrd. Tonnenkilometer zusätzlich auf der Schiene befördert und 2 Mrd. Tonnenkilometer im Binnenschiff. Der Anteil der Straße am Güterverkehr bleibt mit Anteilen zwischen 73 % und 70 % über den modellierten Zeitraum dominierend. Der Schienenverkehr verbleibt mit 22 % (MMS) bzw. 23 % (MWMS) im Modal Split im Jahr 2030 unter dem Modal-Split-Ziel von 25 %, welches im Koalitionsvertrag der Bundesregierung gesetzt wurde. Das Aufkommen an nationaler Luftfracht ist vergleichsweise gering und daher in Abbildung 57 nicht sichtbar.

Abbildung 57: Güterverkehrsnachfrage in MMS und MWMS

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Die Entwicklung des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors stellt Abbildung 58 dar. Im Vergleich zum Jahr 2019 sinkt der Endenergiebedarf bis zum Jahr 2050 um 42,3 % im MMS und um 47,8 % im MWMS. Haupttreiber für die Entwicklung ist die Elektrifizierung im Straßenverkehr, die jedoch auch zu einem Anstieg des Strombedarfs führt. Die schnellere Elektrifizierung im MWMS erzeugt eine Stromnachfrage von 69 TWh im Jahr 2030 und 281 TWh im Jahr 2050. Im MMS liegt sie bei 58 TWh im Jahr 2030 und 229 TWh im Jahr 2050. Synthetische strombasierte Kraftstoffe (E-fuels) und biogene Kraftstoffe haben zusammen einen Anteil von ca. 10 % am Endenergiebedarf des Verkehrs im Jahr 2030 (zusammen 55 bzw. 53 TWh). Die Nachfrage nach Wasserstoff, die sich wesentlich durch die Nutzung von Brennstoffzellen-Lkw ergibt, beläuft sich im MMS und MWMS im Jahr 2030 auf rund 1 % des Endenergiebedarfs des Verkehrs (3 bzw. 4 TWh). Im weiteren Verlauf steigt der Bedarf weiter an und liegt im Jahr 2050 bei ca. 10 % (MMS) bzw. ca. 5 % (MWMS). Dies entspricht 36 TWh bzw. 14 TWh an Wasserstoffbedarf im Jahr 2050.

Abbildung 58: Entwicklung des Endenergiebedarfs in MMS und MWMS

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

7.2 Instrumentenbewertung

Die Instrumentenbewertung basiert auf dem Instrumentenpapier (Anhang A.3).

Die Bewertung der Einzelinstrumente basiert auf jeweils separaten Modellierungsläufen mit dem Modell TEMPS. Aufgrund der Vielzahl an Instrumenten mit sich teilweise überlagernder Wirkung werden die Instrumente im MMS zunächst in Gruppen ähnlicher Wirkungsmechanismen gebündelt (siehe Tabelle 87). Die Bündel werden in der „Minus-Eins-Logik“ bewertet. Dies bedeutet, dass ausgehend vom MMS alle Instrumente der jeweiligen Bündel gleichzeitig deaktiviert werden. Nachdem auf diese Weise alle Bündel bewertet wurden, werden Wechselwirkungsfaktoren abgeleitet, welche sicherstellen, dass die Summe Bündel die Gesamtminderung im Szenario ergeben. Im nächsten Schritt werden jeweils in den deaktivierten Bündeln die einzelnen Instrumente in einer „Plus-Eins-Logik“ bewertet (also jeweils ausgehend vom Bündel aktiviert). Auch hier gibt es potenzielle Wechselwirkungen, die ebenfalls innerhalb der Bündel durch Wechselwirkungsfaktoren bereinigt werden. Die Kombination von „Plus-Eins“ und „Minus-Eins-Logik“ soll die Ableitung ausgewogener Wechselwirkungsfaktoren ermöglichen.

Tabelle 87: Bündelung der Instrumente im MMS

Bündelname	Wirkungsmechanismus	Enthaltene Instrumente
Anschaffung	Hauptsächlicher Einfluss auf die Anschaffungentscheidung regulativ oder durch TCO	• CO₂-Emissionsstandards für LNF • Kaufförderung elektrische LNF-Förderung • CO₂-Emissionsstandards für Pkw • Stärkere Gewichtung der CO₂-Komponente der Kraftfahrzeugsteuer ab 2021 • Kaufprämie E-Pkw • Absenkung der Dienstwagenbesteuerung für E-Pkw mit Erstzulassung bis Ende 2030 • CO₂-Emissionsstandards für schwere Nutzfahrzeuge • Zuschuss für schwere Nutzfahrzeuge mit klimaschonenden Antrieben
Kilometerkosten	Hauptsächlicher Einfluss auf die Kilometerkosten und auf Verkehrsverlagerung	• Senkung der Stromkosten – Abschaffung EEG-Umlage • CO₂-Bepreisung in den Sektoren Wärme und Verkehr (BEHG) • Mautbefreiung von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben
Nachfrage	Direkte Wirkung auf die Verkehrsnachfrage	• Ausbau von Radwegen und Fahrradparkmöglichkeiten sowie Verbesserung der Rahmenbedingungen • Bereitstellung von Regionalisierungsmitteln • Wirkung 9-Euro-Ticket • Änderung der Entfernungspauschale für Fernpendler
Nicht gebündelt		• THG-Quote (inklusive Förderprogramm für fortschrittliche Biokraftstoffe und strombasierte Kraftstoffe) • Bundesfinanzhilfen zum Ausbau der Landstromversorgung in Häfen • Beimischquote für PtL im Flugverkehr

Quelle: eigene Darstellung

Das Vorgehen beim MWMS unterscheidet sich, da sich die Wirkungsmechanismen der zusätzlichen Instrumente jeweils unterscheiden und daher nicht gebündelt werden. Es werden alle Instrumente in "Minus-Eins-Logik" bewertet. Für die Jahre 2045 und 2050 werden in beiden Szenarien keine Minderungen der Instrumente ausgewiesen, da der Projektionszeitraum große Unsicherheiten beinhaltet.

Bei der Einschätzung der Treibhausgasminderungswirkung der Instrumente ist es wichtig zu beachten, gegenüber welcher Basisentwicklung bewertet wird (siehe auch vorige Fußnoten). Eine ausführliche Beschreibung und Parametrisierung der berücksichtigten Instrumente finden sich in Anhang A.3. Die Kaufprämie für E-Pkw beinhaltet beispielsweise nur die Verlängerung des Umweltbonus (und gleichzeitige Reduzierung der Höhe sowie Einschränkung auf private Käufer) ab 2023. Die Entfernungspauschale beinhaltet lediglich die vorgezogene Erhöhung in den Jahren 2022 bis 2024, ab 2025 ist daher kein Effekt ausweisbar.

In Tabelle 88 sind die Treibhausgasminderungen der Einzelinstrumente im MMS dargestellt. Bis zum Jahr 2030 entfällt die größte Wirkung auf die THG-Quote⁵⁷, welche zu steigenden Anteilen an erneuerbaren Kraftstoffen im Kraftstoffmix führt und andererseits indirekt Preisaufschläge

⁵⁷ Die Bewertung findet statt gegenüber der Ausgestaltung der THG-Quote vor der letzten Novelle des BImSchG, mit der die Umsetzung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie II durchgeführt wurde (Ambitionsniveau der THG-Quote von 6 % ab dem Jahr 2020).

auf flüssige Kraftstoffe mit sich bringt. Entsprechend entsteht die wesentliche Treibhausgasemissionsminderung aus den steigenden Anteilen der erneuerbaren Kraftstoffe; durch die THG-Quote steigt aber auch der Anteil elektrischer Antriebstypen bei den Neuzulassungen (jährliche Auszahlung der THG-Prämie und höhere Kraftstoffkosten) und die Verkehrsnachfrage reduziert sich durch höhere Kraftstoffkosten. Die zunehmende Elektrifizierung führt in den Folgejahren zu einem abnehmenden Effekt, da die steigende Stromnutzung und die geringeren Treibhausgasemissionen des Stromsystems die Quotenerfüllung sicherstellen und nach dem Jahr 2030 keine weitere Steigerung des Ambitionsniveaus der Höhe der THG-Quote stattfindet.⁵⁸ Die wirkmächtigsten Instrumente für das Jahr 2030 sind anschließend das BEHG⁵⁹ sowie die EU-CO₂-Standards für Pkw, LNF und SNF⁶⁰. Nach 2030 sind diese beiden Instrumente die wesentlichen Treiber zur Treibhausgasemissionsminderung in Bezug auf die in diesem Bericht verwendete Ausgangsbasis (Wirkbeginn).

Grundsätzlich lässt sich feststellen: die wirkmächtigsten Instrumente BEHG, THG-Quote und EU-CO₂-Standards reizen in Zusammenhang mit sinkenden Technologiekosten bereits eine Elektrifizierung an. Die anderen Instrumente haben in der Modellierung nur eine begrenzte zusätzliche Wirkung. Dies ist teilweise darin begründet, dass Verlagerungseffekte auf die Schiene bereits in der verwendeten Referenzentwicklung (siehe Abschnitt 7.3) beinhaltet sind. Diese Referenzentwicklung umfasst beispielsweise die Umsetzung von Schieneninfrastrukturvorhaben des vorrangigen Bedarfs im BVWP 2030 und relevante Maßnahmen für den Deutschland-Takt. Im Radverkehr sind entsprechend der zugrunde gelegten Entwicklung aus dem MKS-REF 2020-Szenario erhebliche Reisezeitverkürzungen im Radverkehr durch einen Trend zu mehr Radverkehr durch E-Bikes bereits im Referenzszenario enthalten.

Tabelle 88: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente im Verkehrssektor (MMS)

Direkte Emissionsminderung* (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungs- abschätzung	2025	2030	2035	2040	2045*	2050*
Kaufprämie E-Pkw	2022	0,09	0,07	0,06	0,04	NA	NA
Absenkung der Dienstwagenbesteuerung E-Pkw	2022	0,08	0,11	0,09	0,07	NA	NA
Stärkere Gewichtung der CO ₂ -Komponente der Kraftfahrzeugsteuer	2021	0	0,01	0,01	0,01	NA	NA
Abschaffung EEG-Umlage	2020	0,40	0,98	0,97	0,49	NA	NA
Änderung der Entfernungspauschale	2022	0	0	0	0	NA	NA
CO ₂ -Bepreisung (BEHG)	2021	0,88	5,26	13,69	15,74	NA	NA
Attraktivität des ÖPNV erhöhen	2022	0,04	0	0	0	NA	NA

⁵⁸ Der Mechanismus zur Anpassung der THG-Quote greift nach derzeitiger Rechtslage nur bis zu den im Straßenverkehr genutzten Strommengen des Jahres 2030.

⁵⁹ Das BEHG wird im Vergleich zu einem Szenario ohne BEHG bewertet.

⁶⁰ Die EU-CO₂-Standards für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge werden gegenüber der Novellierung des Jahres 2018 bewertet (Zielwerte im Jahr 2030: -37,5 % für Pkw; -31 % für leichte Nutzfahrzeuge). Für die EU-CO₂-Standards für schwere Nutzfahrzeuge ist der Vergleich, dass keine CO₂-Emissionsstandards existieren.

Direkte Emissionsminderung* (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungs- abschätzung	2025	2030	2035	2040	2045*	2050*
Ausbau von Radwegen	2020	0,06	0,09	0,06	0,03	NA	NA
Zuschuss für SNF mit klimascho- nenden Antrieben	2022	0,36	0,24	0,10	0,05	NA	NA
Mautbefreiung von Nutzfahr- zeugen mit alternativen Antrie- ben	2019	0,43	1,00	3,34	8,09	NA	NA
Ausbau der Landstromversor- gung in Häfen	2021	0	0,01	0,01	0,01	NA	NA
Höhere EU-CO ₂ -Emissionsstan- dards für Pkw und LNF	2025	0	1,06	8,46	20,68	NA	NA
EU-CO ₂ -Emissionsstandards für SNF	2021	0,65	4,05	10,84	17,75	NA	NA
THG-Quote	2020	1,29	9,47	1,99	1,16	NA	NA
Beimischquote PtL im Luftver- kehr	2026	0	0,12	0,11	0,11	NA	NA

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Anmerkung: * Prognose nicht möglich, da zu große Unsicherheit

Im MWMS entfällt der größte Teil der zusätzlichen Minderung gegenüber dem MMS auf die Ausweitung der CO₂-Differenzierung der Lkw-Maut (Tabelle 89). Diese führt zu einer deutlichen Steigerung des Elektrifizierungsgrads des Straßengüterverkehrs. Die Verwendung der zusätzlichen Einnahmen durch die CO₂-Komponente der Lkw-Maut für zusätzliche Infrastrukturmaßnahmen bei der Bahn ist nicht berücksichtigt. Die Wirkung der Lkw-Maut auf die Treibhausgasemissionen nimmt im Zeitverlauf mit dem entsprechenden Ladeinfrastrukturaufbau und steigenden Fahrzeugverfügbarkeiten deutlich zu. Da durch die Elektrifizierung die spezifischen Treibhausgasemissionen im Güterverkehr zurückgehen, sinkt für die Förderung effizienter Trailer insbesondere nach dem Jahr 2030 die Treibhausgasemissionsminderung. Auch das Deutschlandticket mindert umso weniger die Treibhausgasemissionen, je stärker der MIV elektrifiziert wird. Beide Instrumente sind jedoch generell mit eher geringen Treibhausgasemissionsminderungen verbunden.⁶¹

Tabelle 89: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente im Verkehrssektor (MWMS)

Direkte Emissionsminderung* (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungs- abschätzung	2025	2030	2035	2040	2045*	2050*
Ausweitung und CO ₂ -Differen- zierung der Lkw-Maut	2024	0,64	6,05	12,77	18,35	NA	NA
Förderung effiziente Trailer	2022	0,14	0,30	0,15	0,02	NA	NA

⁶¹ Andere Studien, die im Auftrag der Bundesregierung durch einzelne Ressorts durchgeführt wurden, weisen im Ergebnis einen signifikant höhere THG-Minderungswirkung des Deutschlandtickets auf. Dies ist auf Unterschiede in den Annahmen, Methoden und verwendeten Datenquellen zurückzuführen.

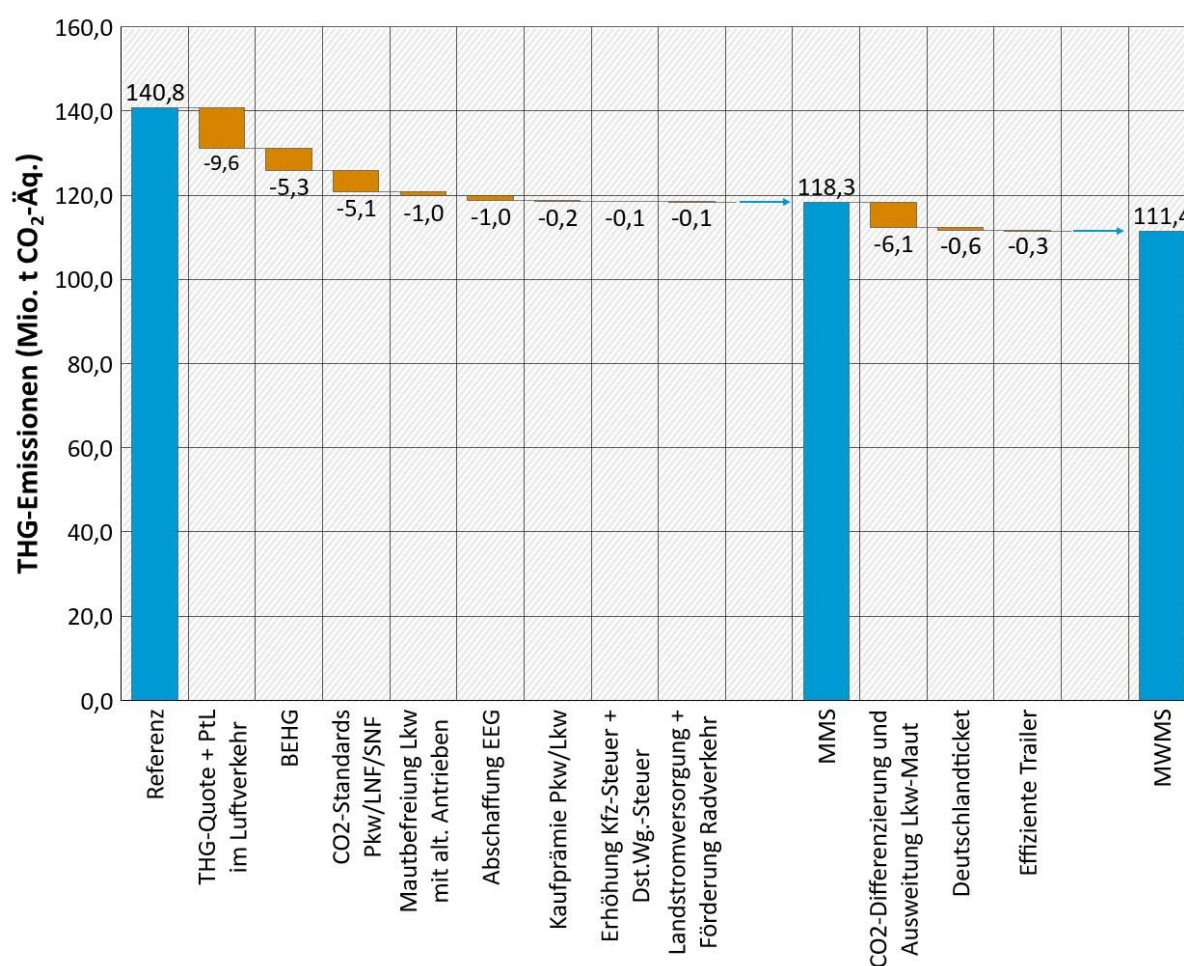
Direkte Emissionsminderung* (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungs- abschätzung	2025	2030	2035	2040	2045*	2050*
Deutschlandticket	2023	0,52	0,55	0,38	0,23	NA	NA

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Anmerkung: * Prognose nicht möglich, da zu große Unsicherheit

In Abbildung 59 ist die Wirkung der Instrumente des MMS und MWMS im Jahr 2030 zusammenfassend veranschaulicht.

Abbildung 59: Beiträge der Instrumente zur Treibhausgasemissionen 2030 in MMS und MWMS



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut

Um die oben genannten Minderungen der Treibhausgasemissionen zu ermöglichen, sind flankierende Instrumente notwendig, um die Entwicklung abzusichern (z.B. Sicherstellung der Energieversorgung von alternativen Antrieben, etc.). Die Wirkung dieser Instrumente ist indirekt und ermöglicht den quantifizierten Instrumenten, ihre Wirkung voll zu entfalten (z.B. Ausbau der Tank- und Ladeinfrastruktur, Investitionen in die Schiene). Auch sind unter den flankierenden Instrumenten teilweise übergreifende Strategien (Digitalstrategie Deutschland oder Fördermaßnahmen, die potenzielle Entwicklungen mit Pilotprojekten anstoßen sollen (z.B. Hybridelektrisches Fliegen / Klimaneutrales Fliegen, Nullemissionen-Schiff / Maritimes Forschungsschiff). Des Weiteren sind mögliche technische Innovationen (Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen und innovative Mobilitätsformen) und regulatorische Potenzialräume (Erweiterung

der kommunalen Handlungsspielräume) aufgeführt, die zunächst einmal ein Potenzial zur Treibhausgasemissionsminderung aufweisen; deren Potenzialerschließung bisher jedoch nicht erreicht wird. Im MMS und MWMS sind als flankierenden Instrumente die folgenden Instrumente aufgeführt:

- ▶ Ausbau Tank- und Ladeinfrastruktur
- ▶ Investitionen in die Schiene
- ▶ Hybridelektrisches Fliegen / Klimaneutrales Fliegen
- ▶ Verkehr automatisieren, vernetzen, verflüssigen und innovative Mobilitätsformen
- ▶ Digitalstrategie Deutschland
- ▶ Förderung Binnenschifffahrt
- ▶ Nullemissionen Schiff / Maritimes Forschungsprogramm
- ▶ Beschleunigung von Planung und Umsetzung neuer Infrastrukturen
- ▶ Erweiterung der kommunalen Handlungsspielräume / z.B. Gebühren für Bewohnerparkausweise

7.3 Sektorspezifische Parameter & Annahmen

Die Verkehrsnachfrage wird für vergangene Jahre bis 2021 aus dem Modell TREMOD (ifeu 2023) übernommen. Für die Prognose der Verkehrsnachfrage werden die Daten mit einer Steigerungsrate aus dem Referenzszenario 2020 der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS)-Referenz (Schade et al. 2022) fortgeschrieben. Dabei werden Aktualisierungen entsprechend unterschiedlicher Rahmenbedingungen zwischen dem Referenz-Szenario der MKS und den hier vorliegenden Szenarien vorgenommen. Hierbei werden die folgenden drei Aspekte berücksichtigt:

- ▶ BEHG-Preispfad
- ▶ BIP-Entwicklung
- ▶ Annahme einer Verstetigung des Trends zu mehr Homeoffice.

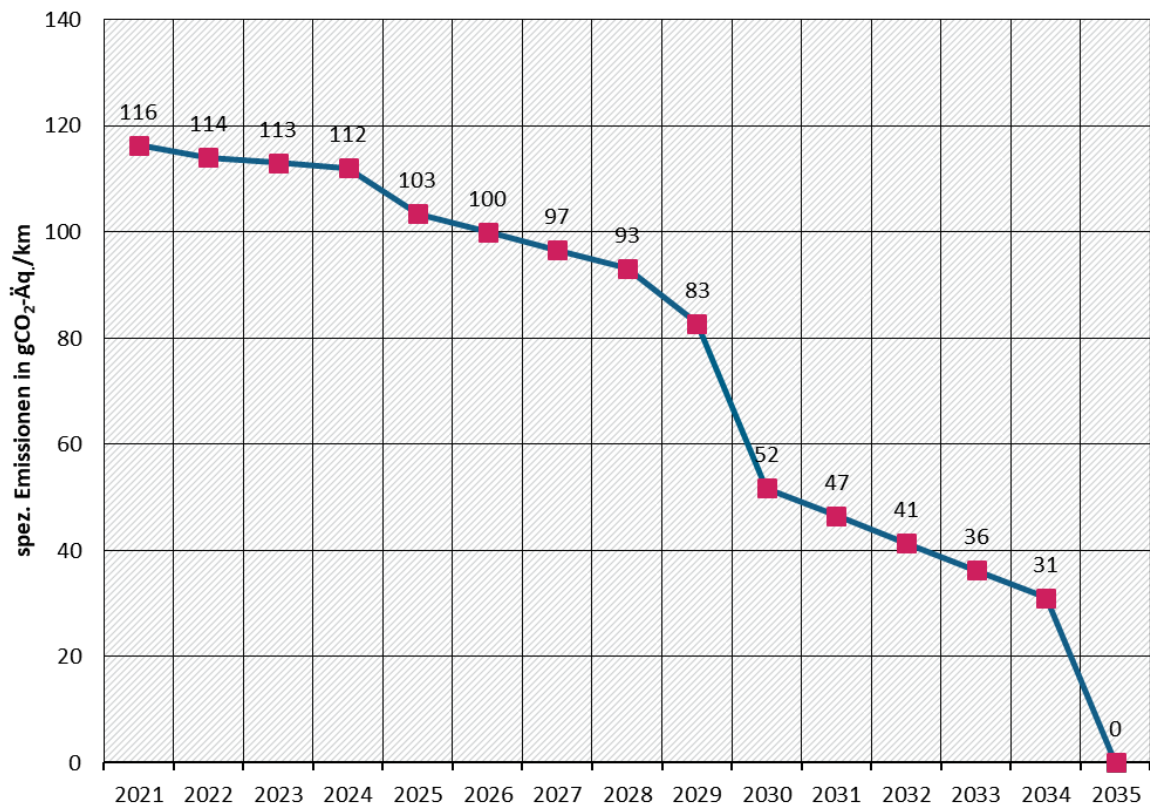
Verkehrsverlagerungen werden modellendogen aus Kostenelastizitäten abgeleitet. Die angenommenen Preiselastizitäten drücken den Effekt des Kraftstoffpreises auf die gefahrenen Kilometer im Straßenverkehr aus und entsprechen einer kurzfristigen Elastizität. Der Effekt der Preispolitik auf langfristige Entscheidungen wird an gesonderter Stelle durch ein Entscheidungsmodell der kostenabhängigen Antriebswahl abgebildet. Die langfristige Wirkung auf die Treibhausgasemissionsentwicklung ist dementsprechend höher als die reine Wirkung der Elastizität. In Anhang A.4.4 werden die verwendeten Elastizitäten genauer beschrieben.

In den Szenarien wird nicht angenommen, dass steigende Preise in Vorausschau die Kaufentscheidung beeinflussen. Der Effekt durch Vorausschau wurde in einer zusätzlichen Studie zum Projektionsbericht 2021 untersucht (Harthan et al. 2022).

Bei der Abbildung der EU-Emissionsstandards für neu zugelassene Fahrzeuge wird angenommen, dass Zielwerte der CO₂-Regulierung bis zum Jahr 2035 nicht auf einem linearen CO₂-Minde rungspfad erreicht werden. In den Jahren, in denen ein neuer Zielwert eingeführt wird, treten

rund 2/3 der erforderlichen CO₂-Emissionsminderung auf, dazwischen sinken die durchschnittlichen CO₂-Emissionen linear um rund 1/3. In Abbildung 60 ist der Verlauf der EU-Standards für Pkw dargestellt, welcher sich aus den genannten Annahmen ergibt.

Abbildung 60: Verlauf der EU-CO₂-Standards für Pkw



Quelle: eigene Berechnung Öko-Institut

8 Landwirtschaft

Der Sektor Landwirtschaft umfasst im Bundes-Klimaschutzgesetz einerseits die biologisch-chemischen Emissionen aus der Tiernutzung und von landwirtschaftlichen Böden (Quellgruppe CRF 3). Andererseits berücksichtigt er auch energetische Emissionen aus der Verbrennung von Kraft- und Brennstoffen in Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei (Quellgruppe CRF 1.A.4.c).

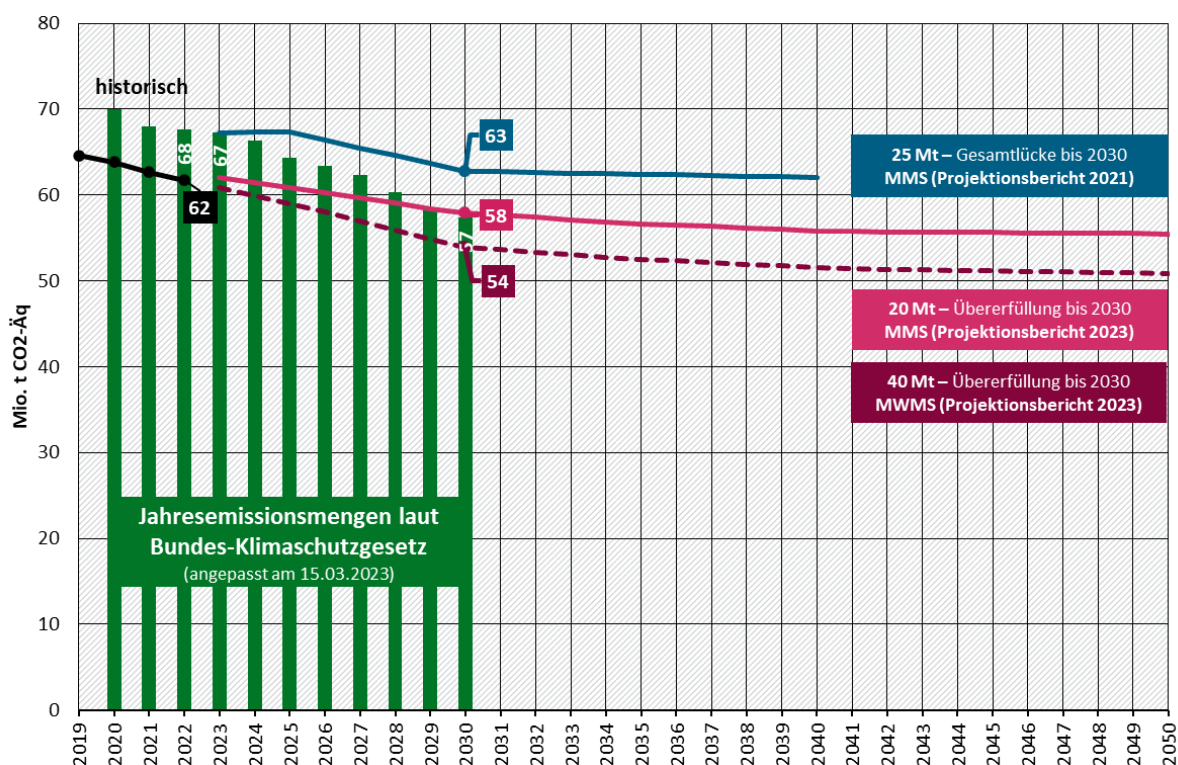
In der Quellgruppe CRF 3 Landwirtschaft dominieren Methan- und Lachgasemissionen aus der Tierhaltung (Verdauung, Wirtschaftsdüngermanagement) und aus landwirtschaftlichen Böden. Der Sektor ist daher in besonderer Weise durch die Umstellung der Treibhausgaspotenziale zur Umrechnung in CO₂-Äquivalente auf die Werte des 5. IPCC-Sachstandsberichts betroffen (Abschnitt 2.3). Dabei wird das Treibhausgaspotenzial für den Zeithorizont von 100 Jahren für Methan von 25 auf 28 um 10 % heraufgesetzt, wohingegen der Wert für Lachgas um von 298 auf 265 um 11 % abgesenkt wird. Weiterhin führten methodische Änderungen aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse hinsichtlich der Lachgasemissionen aus Böden zu einer deutlichen rechnerischen Absenkung der Emissionen seit Festlegung der Ziele im Bundes-Klimaschutzgesetz.

Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

8.1 Zentrale Ergebnisse

Die Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft sinken im MMS bis 2030 auf 58,0 Mio. t CO₂-Äq., bis 2040 auf 55,5 Mio. t CO₂-Äq. und bis 2050 auf 55,0 Mio. t CO₂-Äq. Im MWMS fallen die Emissionen des Sektors Landwirtschaft unter der Annahme, dass weitere Maßnahmen umgesetzt werden, um etwa 4 Mio. t CO₂-Äq. niedriger aus. Sie werden im Jahr 2030 auf 54,1 Mio. t CO₂-Äq. sinken, im Jahr 2040 auf 51,3 Mio. t CO₂-Äq. und im Jahr 2050 auf 50,4 Mio. t CO₂-Äq.

In Abbildung 61 wird die Entwicklung der Emissionen und die Zielerreichung im Sektor Landwirtschaft im MMS und MWMS anhand der Ziele gemäß KSG dargestellt. Zusätzlich werden im Jahr 2023 berichtete Ex-post-Emissionsdaten abgebildet. Während im Projektionsbericht 2021 noch von einer Zielverfehlung bis 2030 in Höhe von insgesamt 25 Mio. t CO₂-Äq. ausgegangen wurde, ergibt sich im MMS des Projektionsberichts 2023 eine Übererfüllung in Höhe von insgesamt 20 Mio. t CO₂-Äq. bis 2030, und im MWMS von 40 Mio. t CO₂-Äq.

Abbildung 61: Entwicklung der projizierten Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft im Vergleich zu den Zielen/Werten im KSG

Anmerkungen: Die dargestellten Emissionsdaten basieren auf dem Datenstand 2023, modelliert wurde mit dem Datenstand 2022. Für die Jahre ab 2023 wurden die vom UBA nach § 4 Abs. 3 angepassten JEM dargestellt. Aufgrund von Methodenänderungen und teilweise unterschiedlicher Parametrisierung der Instrumente sind die Projektionsberichte nicht vollständig konsistent. Der Wert in Mt CO₂-Äq. ergibt sich durch kumulative Betrachtung der Zielerreichung je Jahr von 2021 bis 2030.

Quelle: (UBA 2023b), Modellierung: Thünen-Institut und Öko-Institut

Für diese abweichenden Ergebnisse sind folgende Ursachen zu nennen: (1) Die direkten Lachgasemissionen werden im Berichterstattungs-Modell seit der Inventar-Submission 2022 mit einer verbesserten Methode berechnet, die auf Grundlage von Messdaten aus Deutschland entwickelt wurde (Mathivanan et al. 2021). Dadurch fällt der berechnete Emissionswert der Quellgruppe Landwirtschaft niedriger aus. Im Jahr 2020 lagen die Emissionen mit der neuen Methode um ca. 5 Mio. t CO₂-Äq. niedriger als mit der alten Berechnungsmethode. Im KSG werden jedoch absolute Zielwerte definiert, und eine Anpassung der Zielwerte im Falle methodischer Änderungen ist nicht festgelegt. Während die Zeitreihe der Emissionen mit der neuen Methode rekalkuliert wird, bleiben die Zielwerte, die sich an den alten Emissionsdaten orientieren, bestehen.

Durch die Methodenänderung ergibt sich eine deutliche, rein rechnerische Unterschreitung der zulässigen Jahresemissionsmengen, die sich über die Jahre aufsummiert. Eine Saldierung der rechnerischen „Überfüllung“ der Ziele im Landwirtschaftssektor mit anderen Sektoren würde dazu führen, dass die methodische Änderung im Landwirtschaftssektor reale Treibhausgasemissionen in anderen Sektoren „ausgleicht“. Um die Wirksamkeit der Ziele des Klimaschutzgesetzes sicherzustellen, ist deshalb zu prüfen, inwieweit die zulässigen Jahresemissionsmengen auf Grundlage prozentualer Ziele definiert und die zulässigen Emissionen bei Methodenänderungen neu berechnet werden sollten (vgl. Biewald et al. (2022)). (2) Die Tierbestände und die Stickstoff-Ausbringungsmengen und damit die Emissionen gehen im Projektionsbericht 2023 bis 2030 stärker zurück als im vorherigen Projektionsbericht angenommen.

Tabelle 90: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.						
Stationäre und mobile Feuerung	6,1	6,0	5,7	5,5	5,1	4,9	4,8
Fermentation bei der Verdauung	27,1	25,9	24,9	24,2	23,8	23,8	23,7
Wirtschaftsdünger-Lagerung ("Düngerwirtschaft")	9,8	9,1	8,6	8,5	8,4	8,4	8,3
Landwirtschaftliche Böden	16,9	15,9	15,5	15,2	15,1	15,0	15,0
Kalkung	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Harnstoffanwendung	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Andere kohlenstoffhaltige Dünger	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Andere (Emissionen aus Biogas-Gärresten)	1,7	1,1	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5
Gesamt	64,4	60,8	58,0	56,5	55,5	55,2	55,0
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		64,3	57,3				
Abweichung vom Sektorziel		-3,5	0,7				

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Thünen-Institut, Öko-Institut

Tabelle 91: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.						
Stationäre und mobile Feuerung	6,1	6,0	5,7	5,5	5,1	4,9	4,8
Fermentation bei der Verdauung	27,1	25,8	24,7	24,0	23,5	23,4	23,3
Wirtschaftsdünger-Lagerung ("Düngerwirtschaft")	9,8	7,5	5,4	5,3	5,2	5,2	5,2
Landwirtschaftliche Böden	16,9	15,9	15,0	14,6	14,3	14,2	14,0
Kalkung	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Harnstoffanwendung	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Andere kohlenstoffhaltige Dünger	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Andere (Emissionen aus Biogas-Gärresten)	1,7	1,1	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5
Gesamt	64,4	59,0	54,1	52,4	51,3	50,8	50,4
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		64,3	57,3				

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Abweichung vom Sektorziel		-5,3	-3,2				

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Thünen-Institut, Öko-Institut

Tabelle 92: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.									
Entwicklung 1990 – 2019	83,1	65,1	64,4						
MMS				60,6	58	56,5	55,5	55,2	54,9
MWMS				59,0	54,1	52,4	51,3	50,8	50,4
Veränderung ab 1990 in %									
Entwicklung 1990 – 2019		-21,6	-22,5						
MMS				-27,0	-30,2	-32,0	-33,2	-33,5	-33,9
MWMS				-29,0	-34,9	-36,9	-38,3	-38,9	-39,4
Veränderung ab 2005 in %									
Entwicklung 2005 – 2019			-1,2						
MMS				-6,9	-10,9	-13,2	-14,8	-15,2	-15,7
MWMS				-9,4	-16,9	-19,5	-21,3	-22,0	-22,7

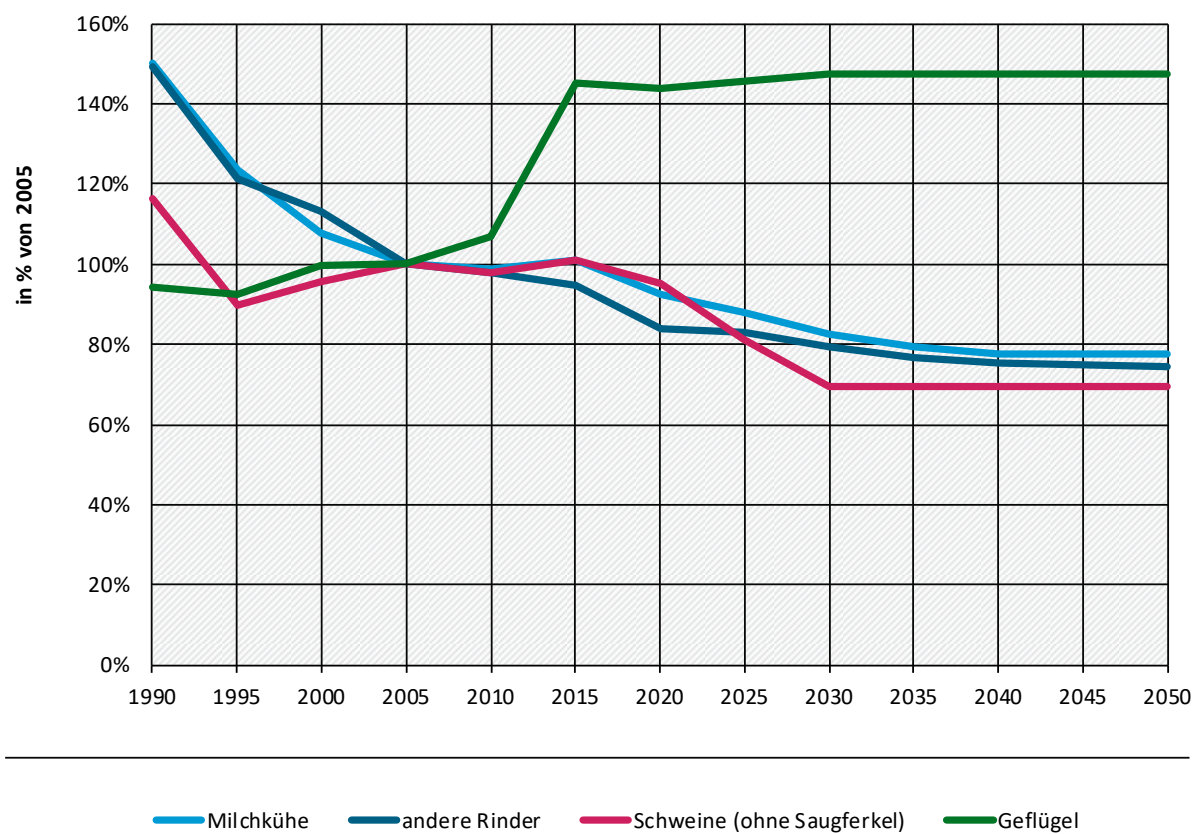
Quelle: (UBA 2022a), Modellrechnungen Thünen-Institut, Öko-Institut

Anmerkung: Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

Entwicklungen der Emissionen aus der Tierhaltung und der Düngung

Wichtige Treiber der projizierten Entwicklung sind die zurückgehenden Rinder- und Schweinebestände (Abbildung 62) und zurückgehende Stickstoff-Ausbringungsmengen (Abbildung 63). Diese Rückgänge haben sich bereits ex-post in den Jahren seit 2015 in den statistischen Daten gezeigt. Diese Trends werden, aus Gründen der Vorsicht mit geringerer Ausprägung, fortgeschrieben. Eine Ausnahme bildet die Ausbringungsmenge an Stickstoff-Mineraldünger, die aktuell sehr niedrig ist und nach den Annahmen wieder leicht ansteigt. Ein weiterer Treiber ist der erwartete starke Rückgang des Energiepflanzeneinsatzes in der Biogasproduktion, wodurch sich die Stickstoff-Ausbringungsmengen und die Methanemissionen aus der Biogasproduktion und der Gärrestlagerung verringern.

Die Entwicklung der Tierbestände ist auf einen beschleunigten Strukturwandel und geringere Investitionen in neue Haltungsanlagen zurückzuführen, was wiederum mit ungünstigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und ansteigenden umwelt- und tierschutzrechtlichen Anforderungen zusammenhängt. Der Rückgang der Stickstoff-Ausbringungsmengen ist u.a. auf die erhöhten Anforderungen im Düngerecht, auf die Ausweitung des Ökolandbaus und die Herausnahme von landwirtschaftlichen Flächen aus der Nutzung zurückzuführen.

Abbildung 62: Entwicklung der Tierbestände im MMS

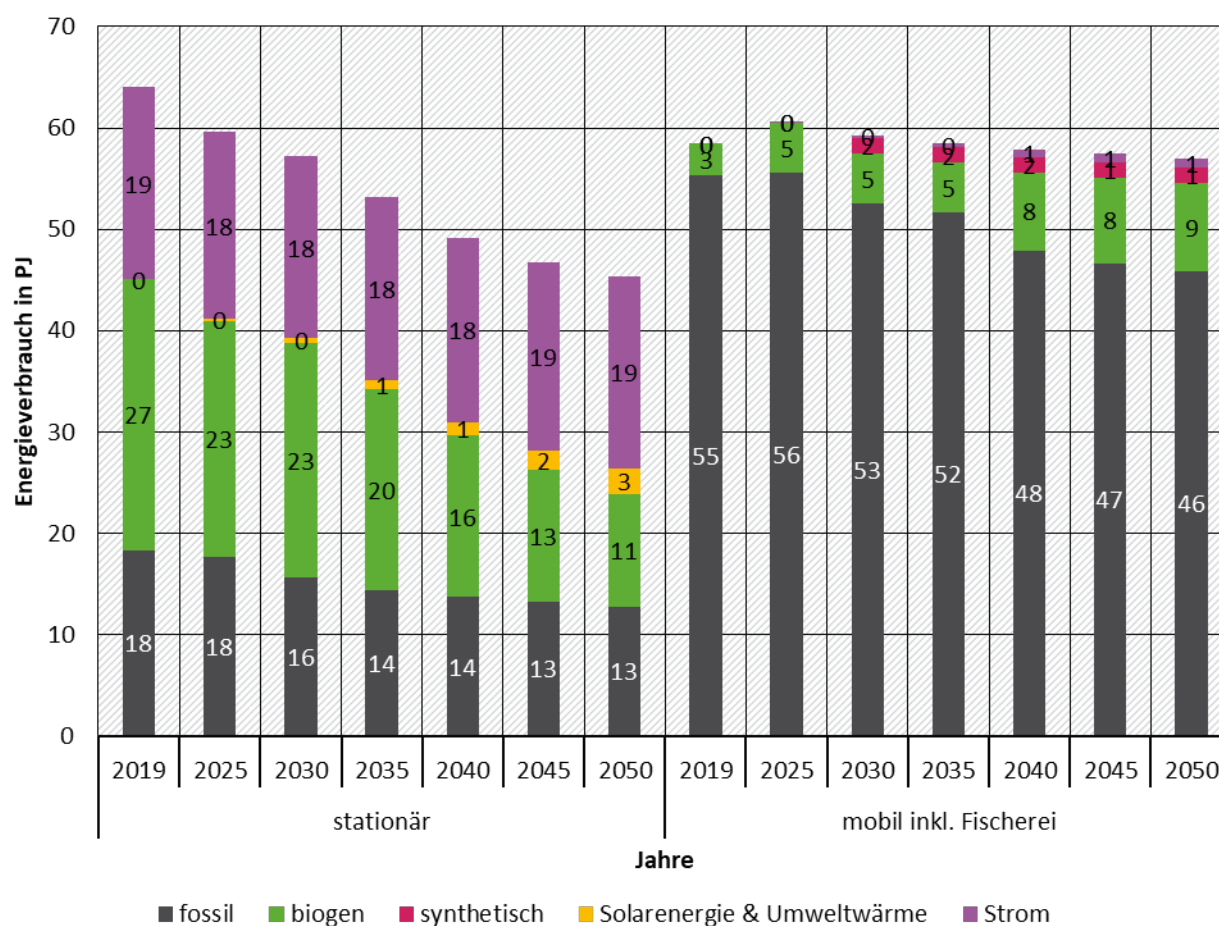
Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Thünen-Institut

Abbildung 63: Entwicklung der Stickstoffausbringung im MMS

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Thünen-Institut

Entwicklung der energiebedingten Emissionen

Bis zum Jahr 2030 sinkt der Endenergieverbrauch im Landwirtschaftssektor im Bereich der Wärmenutzung und des Kraftstoffeinsatzes von 135 PJ im Jahr 2019 auf 123 PJ im Jahr 2030. Vor allem bei den stationären Anwendungen (Stallheizung, Gewächshäuser, Getreidetrocknung etc.) geht der Energieverbrauch zurück, während bei mobilen Anwendungen der Energieverbrauch nur leicht sinkt. Auch nach 2030 kommt es zu einer weiteren Reduktion der Energienachfrage (Abbildung 64). Neben dem Rückgang der Tierbestände und der Ausweitung von unproduktiven Flächen lässt sich dies vor allem auf die Steigerung der Energieeffizienz zurückführen. Die Energieeinsparung erfolgt vor allem im Bereich der fossilen Energieträger. Gleichzeitig sinkt aber auch die Biogasnutzung, bedingt durch die rückläufige Biogaserzeugung in den landwirtschaftlichen Betrieben.

Abbildung 64: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Sektors Landwirtschaft nach Energieträger zwischen 2019 und 2050 im MMS und MWMS

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

Durch die Steigerung der Energieeffizienz und den Einsatz von erneuerbaren Energien sinken die Emissionen des landwirtschaftlichen Energieeinsatzes von 6,1 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2019 auf 5,7 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 und bis zum Jahr 2050 auf 4,8 Mio. t CO₂-Äq.

Der Großteil der Emissionsreduktion erfolgt im Bereich der stationären Quellen, durch die Ausweitung der Energieeffizienz und den Einsatz von erneuerbaren Energieträgern bzw. einem Wechsel zu Strom. Auch im Bereich des mobilen Kraftstoffeinsatzes erfolgt eine Emissionsreduktion. Diese lässt sich auf Effizienzmaßnahmen im Bereich der Landmaschinen (z.B. Reifendruckregelanlagen etc.) zurückführen. Mittel- bis langfristig wird die Emissionsreduktion vor allem über den Einsatz von alternativen Kraftstoffen (Biokraftstoffe, Biomethan, PtL) erreicht.

Tabelle 93: Entwicklung der energetischen Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft nach Quellgruppen zwischen 1990 und 2050 im MMS und MWMS

	1990	2005	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.									
Stationäre Quellen	6,0	2,4	1,9	2,0	1,8	1,6	1,4	1,4	1,3	1,2
Mobile Quellen	4,5	3,3	4,1	4,3	4,2	4,1	4,0	3,7	3,6	3,6

	1990	2005	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Fischerei	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt	10,5	5,7	6,1	6,3	6,0	5,7	5,5	5,1	4,9	4,8

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut Anmerkung: Für die Zuordnung nach Klimaschutzgesetz werden die energiebedingten Emissionen aus der Wärmenutzung und dem Kraftstoffeinsatz hier berichtet.

8.2 Instrumentenbewertung

Die Instrumentenbewertung basiert auf dem Instrumentenpapier (Anhang A.3).

Im Folgenden werden Instrumente und Maßnahmen im Landwirtschaftssektor vorgestellt und ihr Beitrag zur Emissionsminderung dargestellt, zunächst für das MMS (Tabelle 94 und Tabelle 95) und im MWMS (Tabelle 96 und Tabelle 97). Die Instrumente und ihr Bezug zu politischen Programmen und Maßnahmen können Anhang A.3 entnommen werden.

Die Berechnungen werden mit dem Berichterstattungsmodell py-GAS-EM durchgeführt. Die Wirkung der einzelnen Maßnahmen wird durch schrittweise Einbeziehung der Maßnahmen in die Berechnungen quantifiziert. Dadurch können die ausgewiesenen Wirkungen trotz verschiedener Wechselwirkungen z. B. im Bereich der landwirtschaftlichen N-Düngung, additiv dargestellt werden. Die Höhe der Wirkung einzelner Maßnahmen hängt aufgrund solcher Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen in den meisten Fällen von der Reihenfolge ab, in der diese in die Berechnungen einbezogen werden. Die Wirkungsangaben geben daher Größenordnungen im Kontext des insgesamt betrachteten Maßnahmenbündels wieder. Das gesamte MMS bzw. MWMS bildet die Wirkung einschließlich der Wechselwirkungen ab, soweit diese modellierbar sind.

Tabelle 94: Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im MMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen	Umsetzung der Düngeverordnung (2020) und flankierender Förderprogramme (insbes. das Investitionsprogramm Landwirtschaft im Rahmen des Investitions- und Zukunftsprogramms des BMEL, welches über die Landwirtschaftliche Rentenbank umgesetzt wird, u.a. für emissionsarme Gülleausbringung). Berechnet wird die Wirkung einer Reduzierung des N-Mineraldüngereinsatzes um 4 kg N/ha LF im Jahr 2030. Maßnahmen mit Wirkung auf Ammoniakemissionen werden aus den MMS-Projektionen zum Nationalen Luftreinhalteprogramm 2023 ⁶² übernommen (emissionsarme Ställe, Wirtschaftsdüngerlagerung und -ausbringung aufgrund Umsetzung der Düngeverordnung und der TA Luft).
Ausbau des Ökolandbaus	Erhöhung des Anteils des ökologischen Landbaus von 10 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche im Jahr 2020 auf 15 % im Jahr 2030, entsprechend der im GAP-Strategieplan ab 2023 eingeplanten Fördermittel (statt Fortschreibung von 10 % Flächenanteil). Nach 2030 wird der Anteil statisch fortgeschrieben. Die Umstellung auf ökologischen Landbau wirkt sich vor allem über die Verringerung des Stickstoff-Mineraldüngereinsatzes aus.

⁶² Zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Projektionsberichts 2023 lag eine noch nicht in der Bundesregierung abgestimmte Entwurfsfassung des Nationalen Luftreinhalteprogramm 2023 vor.

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
Wiedervernässung von Moorböden	Aufgrund der Wiedervernässung von Moorböden gehen die Lachgasemissionen aus entwässerten Moorböden zurück (im Sektor Landwirtschaft werden nur die Lachgasemissionen aus entwässerten Moorböden berichtet, die CO ₂ -Emissionen dagegen im Sektor LULUCF; vgl. die entsprechende Maßnahme im Kapitel zu LULUCF).
Förderung der Energieeffizienz in Landwirtschaft und Gartenbau	Fortschreibung des Fördermitteleinsatzes (Mittelwert 2019:2022) des „Bundesprogramms zur Steigerung der Energieeffizienz und CO ₂ Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau“ in Höhe von 36,8 Mio. Euro jährlich. Berücksichtigt werden nur die Emissions-einsparungen aus dem stationären Wärmeverbrauch und dem mobilen Kraftstoffeinsatz. Die Minderungswirkungen werden auf Grund der bestehenden Unsicherheiten nur bis zum Jahr 2040 ausgewiesen.
Weitere Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz und der Ausweitung der erneuerbaren Energien	Die Ausweitung der Energieeffizienz und der Ausbau von Erneuerbaren Energien werden über verschiedene Instrumente angereizt und gefördert (z.B. EEG, Marktanzreizprogramm, BEHG-Preis). Auf Grund von Modellrestriktionen und Datenverfügbarkeit kann die Instrumentenwirkung verschiedener Einzelinstrumente im Bereich des landwirtschaftlichen Energieverbrauchs (Wärme- und Kraftstoffverbrauch) nicht explizit modelliert werden. Diesen Instrumenten werden daher keine weiteren Minderungen zugeschrieben.
Verringerung der Treibhausgasemissionen in der Tierhaltung	Die Wirkungen dieser Maßnahme werden nicht quantifiziert, da die Umsetzung noch vorbereitet wird. Die gasdichte Lagerung von Wirtschaftsdünger wird im MWMS in Verbindung mit einer Nutzung in der Biogasproduktion über die Maßnahme "Stärkung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und landwirtschaftlichen Reststoffen" abgebildet.
Forschungsinitiative zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030	Die Wirkungen dieser flankierenden Maßnahme werden nicht quantifiziert. Die gestiegenen Anforderungen an die Landwirtschaft und besonders an den LULUCF-Sektor werden nur mithilfe verstärkter Forschungsaktivitäten in diesem Bereich zu erreichen sein. Dies wird nun initiiert.

Quelle: Zusammenstellung des Thünen-Instituts und des Öko-Instituts.

Tabelle 95: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente des Landwirtschaftssektors im MMS

Direkte Emissionsminderung (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungsabschätzung	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen	2021	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ausbau des Ökolandbaus	2021	0,1	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
Wiedervernässung von Moorböden ¹⁾	2023	0,02	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1
Förderung der Energieeffizienz in Landwirtschaft und Gartenbau	2022	0,2	0,5	0,8	1,1	k.a.	k.a.

¹⁾ Anmerkung: Der weit überwiegende Teil der Wirkung dieser Maßnahme wird gemäß Richtlinien im Sektor LULUCF berichtet.

Quelle: Berechnungen des Thünen-Instituts und des Öko-Instituts.

Eine Abschätzung der Wirkungen der Senkung der Stickstoffüberschüsse ist nicht eindeutig möglich, da sich die N-Düngung in den letzten Jahren durch verschiedene Einflüsse stark verringert hat, was die Ableitung eines Szenarios „ohne Maßnahmen“ erschwert. Bei dieser Entwicklung spielen Dürrejahre, insbesondere im Jahr 2018, Rückgänge der Tierbestände und Extensivierung der Flächennutzung sowie erhöhte Anforderungen im Düngerecht eine Rolle, seit 2022 auch die starken Preissteigerungen für Stickstoff-Mineraldünger aufgrund des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine. Bereits vor dem Beginn des hier betrachteten Zeitraums ist es zu deutlichen Verminderungen der Lachgasemissionen aus der landwirtschaftlichen N-Düngung gekommen. Im Jahr 2021 lagen die Emissionen um 3 Mio. t CO₂-Äq. unter denen des Jahres 2014. Die angenommenen, weiteren Emissionsminderungen ab 2021 fallen demgegenüber geringer aus. Infolge der Verringerung der landwirtschaftlichen Ammoniakemissionen durch Umsetzung der Düngeverordnung (emissionsarme Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger, Einsatz von Ureaseinhibitoren in Harnstoffdüngern) verringern sich die indirekten Lachgasemissionen aus der N-Deposition. Die Ausweitung des Ökolandbaus trägt durch den Verzicht auf mineralische N-Düngung zusätzlich zur Emissionsminderung bei. Die Lachgasemission aus entwässerten, landwirtschaftlich genutzten Moorböden werden im Sektor Landwirtschaft berichtet. Durch Wiedervernässungsmaßnahmen, einer Maßnahme im LULUCF-Sektor, kommt es hier zu einer leichten Verringerung von Lachgasemissionen. Deutliche Reduzierungen der Emissionen werden im Bereich der direkten energiebedingten Emissionen erwartet.

Tabelle 96: Umsetzung und Annahmen für die Bewertung der Instrumente im Landwirtschaftssektor im MWMS

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen	Umsetzung des Nachhaltigkeitsziels 70 kg N/ha bis 2030 durch geplante Umsetzung der Novelle der Stoffstrombilanz. Der N-Mineraldüngereinsatz wird im Vergleich zum MMS weiter verringert (-5 kg N/ha LF im Jahr 2030). Hinzu kommen weitere Maßnahmen zur Senkung der Ammoniakemissionen entsprechend des MWMS im Nationalen Luftreinhalteprogramm 2023 (emissionsarme Laufböden in Milchkuhställen; verstärkte Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger mit Injektions-/Schlitztechnik oder Ansäuerung).
Stärkung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und landwirtschaftlichen Reststoffen	Erhöhung des Anteils der in Biogasanlagen eingesetzten Gülle aus der Rinder- und Schweinehaltung von unter 30 % im Jahr 2020 auf 70 % im Jahr 2030, unter der Annahme, dass die Förderung weiter ausgebaut wird, um die Ziele des KSP 2030 umzusetzen. Nach 2030 wird der Anteil statisch fortgeschrieben.
Umsetzung des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz (ANK): Feldgehölze, Wiedervernässung von Moorböden	Anlage von Feldgehölzen auf bisheriger Ackerfläche sowie Wiedervernässung von Moorböden im Rahmen der Umsetzung des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz. Dadurch gehen die Lachgasemissionen aus der N-Düngung und aus entwässerten Moorböden zurück (vgl. entsprechende Maßnahmen im Kapitel zu LULUCF).

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
Ausbau des Ökolandbaus	Erhöhung des Anteils des ökologischen Landbaus von ca. 10 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche im Jahr 2020 auf 20 % im Jahr 2030, unter der Annahme, dass die Förderung weiter ausgebaut wird, um die Ziele des KSP 2030 umzusetzen. Nach 2030 wird der Anteil statisch fortgeschrieben.

Quelle: Zusammenstellung des Thünen-Instituts und des Öko-Instituts.

Tabelle 97: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente des Landwirtschaftssektors im MWMS

Direkte Emissionsminderung ¹⁾ (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungsabschätzung	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen	2024	0,0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Stärkung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und landwirtschaftlichen Reststoffen	2023	1,6	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Umsetzung des ANK: Feldgehölze, Wiedervernässung von Moorböden ²⁾	2023	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Ausbau des Ökolandbaus	2021	0,1	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3

¹⁾ Anmerkung: Die ausgewiesene Minderungswirkung im MWMS ist zusätzlich zur bereits im MMS ausgewiesenen Maßnahmenwirkung, ist also additiv zum MMS zu verstehen.

²⁾ Der überwiegende Teil der Wirkung dieser Maßnahme wird gemäß Richtlinien im Sektor LULUCF berichtet.

Quelle: Berechnungen des Thünen-Instituts und des Öko-Instituts.

Im MWMS führt die Umsetzung weiterer Maßnahmen zu einer zusätzlichen Senkung der Lachgasemissionen. Neben der Umsetzung der Stoffstrombilanz-Verordnung und von weiteren Maßnahmen zur Minderung der Ammoniakemissionen tragen dazu auch die Ausweitung der Agargehölzfläche sowie die umfassendere Wiedervernässung von Moorböden bei. Die Maßnahme mit dem höchsten Minderungspotential im MWMS ist die Stärkung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft, verbunden mit der gasdichten Lagerung der Gärreste.

8.3 Sektorspezifische Parameter & Annahmen

Die Annahmen für die Abbildung der Produktionsumfänge und Erträge im Landwirtschaftssektor stimmen mit den Szenarioanalysen des Thünen-Instituts zum Nationalen Luftreinhalteprogramm 2023 (BMUV 2023) überein, die im Rahmen der Umsetzung der NEC-Richtlinie in einem parallelen Prozess zu diesem Projektionsbericht erstellt wurden. Grundlage für die Annahmen zu Entwicklungen bis 2032 bildet die Thünen-Baseline 2022-2032 (Haß et al. 2022). Einige Besonderheiten der Annahmen werden im Folgenden genauer erläutert:

- Die Flächennutzung wird an die Maßnahmenumsetzung im Bereich LULUCF und an die Wirkungen veränderter Tierzahlen (insbes. Rinder) angepasst. Aufgrund der Ausweitung der Siedlungs- und Verkehrsfläche, der Waldfläche und der Freiflächen-Photovoltaik kommt es zu einer starken Abnahme der Ackerflächen, im MWMS um über 0,5 Mio. ha bis 2050.

- ▶ Ab dem Jahr 2030 werden Erträge im Pflanzenbau statisch fortgeschrieben, aufgrund der Folgen des Klimawandels wird nicht mit weiteren Ertragssteigerungen gerechnet. Die Milchleistung pro Kuh steigt von 8.250 kg p.a. im Jahresmittel 2028-2020 annahmegemäß bis 2040 weiter an auf 9.500 kg und wird dann statisch fortgeschrieben.
- ▶ Abweichend von dieser Baseline-Projektion wird angenommen, dass sich der in den letzten Jahren beobachtete Trend der starken Tierzahlreduktionen bei den Schweinen und etwas weniger stark bei Rindern weiter fortsetzt. Dieser Trend wird durch die aktuelle Projektion „EU agricultural outlook for markets, income and environment, 2022-2032“ (EC 2022b) der EU-Kommission, die im Dezember 2022 und damit nach Veröffentlichung der Thünen-Baseline 2022-2032 publiziert wurde, bestätigt. Der Jungrinderbestand wird proportional zum Rückgang der Milch- und Mutterkühe reduziert. Nach 2030 wird der Schweinebestand statisch fortgeschrieben. Bei Rindern kommt es zu einem weiteren, leichten Bestandsabbau aufgrund steigender Milchleistung pro Kuh und Wiedervernässung von Futterflächen auf Mooreböden.
- ▶ Die N-Mineraldüngermenge wird über den Inlandsabsatz von N-Mineraldünger in Tonnen Reinnährstoff erfasst. In den Jahren seit 2015 (Ausnahme: 2020) hat die N-Mineraldüngermenge sehr stark abgenommen. Im MMS wird davon ausgegangen, dass sich der seit 2015 zu beobachtende Trend zu stark sinkenden N-Mineraldüngermengen nicht weiter fortsetzt. Die für das Jahr 2030 projizierte N-Mineraldüngermenge liegt nach diesen Annahmen auf dem Niveau der N-Mineraldüngermenge im Mittel der Jahre 2018 bis 2020.
- ▶ Der Anteil flüssiger Wirtschaftsdünger, die mit Injektions- und Schlitztechnik ausgebracht werden, wird entsprechend des zunehmenden Trends zwischen 2010 und 2020 fortgeschrieben.
- ▶ Der Einsatz von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen wird im MMS auf Basis des Jahres 2021 statisch fortgeschrieben. Eine Erhöhung der Güllemenge in Biogasanlagen ist Bestandteil des MWMS.
- ▶ Der Einsatz von Energiepflanzen in Biogasanlagen geht zurück, wie in der Thünen-Baseline 2022-2032 beschrieben. Für das Jahr 2030 wird von einer Minderung der eingesetzten Energiepflanzen ggü. 2020 um ca. 60 % ausgegangen. Diese Annahme führt zu einer starken Verringerung der N-Düngung aus Biogas-Gärresten, was eine Reduktion der Lachgasemissionen bewirkt.
- ▶ Die Auswirkungen des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine sind in den Annahmen nicht berücksichtigt. Diese betreffen nicht nur die Preise für landwirtschaftliche Erzeugnisse, sondern auch für Vorleistungen wie N-Dünger und Futtermittel.

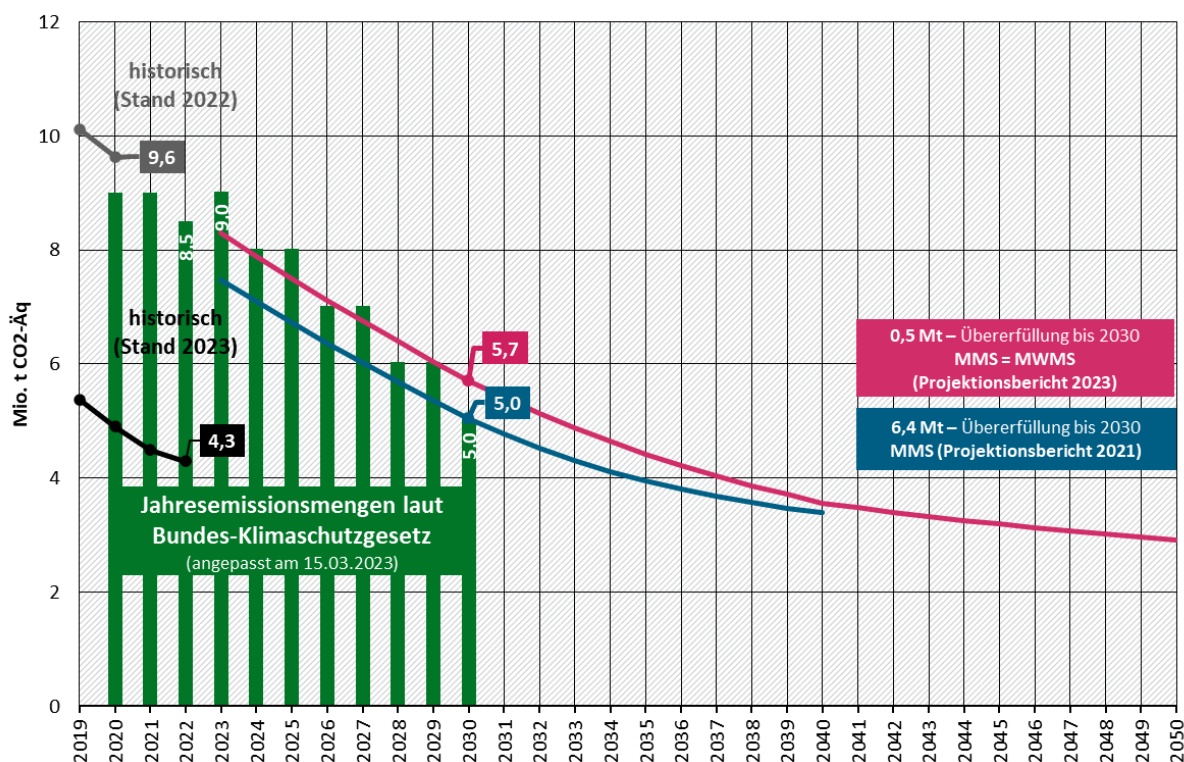
9 Abfallwirtschaft

Der Sektor Abfallwirtschaft und Sonstiges umfasst im Bundes-Klimaschutzgesetz ausschließlich die direkten Treibhausgasemissionen aus der Quellgruppe CRF 5 (Abfall und Abwasser) sowie CRF 6 (Sonstige)⁶³. Emissionen aus der Stromerzeugung durch Müllverbrennung werden der Energiewirtschaft bzw. der Industrie zugerechnet und dort bilanziert. Maßnahmen mit Bezug auf Recycling von nicht-organischen Stoffen werden im Sektor Industrie bilanziert. Für den Sektor Abfallwirtschaft wurde nur ein Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) berechnet.

Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

9.1 Zentrale Ergebnisse

Abbildung 65: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft



Anmerkung: Die dargestellten Emissionsdaten basieren auf den Datenständen 2022 und 2023, modelliert wurde mit dem Datenstand 2022. Für die Jahre ab 2023 wurden die vom UBA nach § 4 Abs. 3 angepassten JEM dargestellt. Aufgrund teilweise unterschiedlicher Parametrisierung der Instrumente sind die Projektionsberichte nicht vollständig vergleichbar.

Quelle: (UBA 2023b), Modellierung: Öko-Institut

Abbildung 65 zeigt die Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im MMS im Vergleich mit den Jahresemissionsmengen des KSG sowie des MMS im Projektionsbericht 2021. Die Berechnungen für das MMS basieren, wie auch in allen anderen Sektoren auf der Inventarsubmission des Jahres 2022. Die Treibhausgasemissionen der Submission 2022 des Treibhausgas-Inventars (Ausgangsbasis für das MMS) unterscheiden sich deutlich von den Werten der Submission von 2023 und sind im Wesentlichen auf Anpassungen der Berechnung von Methanemissionen aus Deponien zurückzuführen⁶⁴. Durch diese Anpassung reduzieren sich die Methanemissionen in

⁶³ Aktuell werden in Deutschland keine Emissionen in der CRF-Kategorie 6 berichtet.

⁶⁴ Für eine detaillierte Beschreibung der Anpassungen in der Berechnung von Methanemissionen sei auf Abschnitt 7.2.1.5 in UBA (2023a) verwiesen. Weitere Anpassungen im Bereich der Emissionsfaktoren im Bereich Abwasser (CRF 5.D.1.) sind aktuell in Arbeit;

der Submission 2023 gegenüber der Submission 2022 um etwa 50 %. Diese Minderung fließt nicht in den aktuellen Bericht ein, da dieser auf der Submission von 2022 basiert. Zudem weichen die Ergebnisse des aktuellen MMS von denen des Projektionsberichts 2021 ab, was in der Umstellung der Treibhausgaspotenziale (GWPs) von denen des 4. Sachstandsberichts (AR4) auf die des fünften Sachstandsberichts (AR5) begründet liegt. Da die Emissionen des Abfallsektors von den Methanemissionen dominiert werden, erhöhen sich die Treibhausgasemissionen des Abfallsektors durch eine Umstellung der GWPs schon in den Ausgangsdaten.

Die Treibhausgasemissionen des Sektors sinken im MMS bis 2030 auf 5,7 Mio. t CO₂-Äq., bis zum Jahr 2050 auf 2,9 Mio. t CO₂-Äq. (Tabelle 98). Das Sektorziel für das Jahr 2030 von 5 Mio. t CO₂-Äq. wird damit jedoch um knapp 1 Mio. t CO₂-Äq. überschritten. Betrachtet man den gesamten Zeitraum 2023 bis 2030 ergibt sich hingegen eine leichte Zielübererfüllung. Die Emissionen des Abfallsektors lassen sich in Methanemissionen (CH₄) sowie Lachgasemissionen (N₂O) aufteilen, welche im Folgenden kurz einzeln besprochen werden.

Während die CH₄-Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung, der Abwasserbehandlung und der Mechanisch-biologischen Abfallbehandlung gegenüber 2019 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 den Wechsel von der Kompostierung zur Abfallvergärung beeinflusst und schwanken daher nur geringfügig über die Zeit.

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. Gegenüber 2019 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 98: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstige nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS und MWMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.						
Abfalldeponierung	8,0	5,4	3,6	2,3	1,5	1,1	0,8
Bioabfallbehandlung	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Abwasserbehandlung	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Andere Bereiche	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt	10,1	7,5	5,7	4,4	3,6	3,2	2,9
Sektorziel Bundes-Klimaschutzgesetz 2021		8,0	5,0				
Abweichung vom Sektorziel		-0,5	0,7				

es ist daher zu erwarten, dass in späteren Inventarsubmissionen weitere Veränderungen der historischen Daten durch Neuberechnungen erfolgen.

Quelle: (UBA 2022b), 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 5 Mio. t CO₂-Äq. wird jedoch im Jahr 2030 um knapp 1 Mio. t CO₂-Äq. überschritten (vgl. Tabelle 98). Im Rahmen der mehrjährigen Gesamtrechnung ergibt sich aus der kumulierten Differenz zwischen MMS und den Jahresemissionsmengen laut KSG eine Übererfüllung von 0,5 Mt CO₂-Äq. (siehe auch Abbildung 65) und somit eine leichte Unterschreitung.

Bis zum Jahr 2050 sinken die Emissionen des Abfallsektors auf 2,9 Mio. t CO₂-Äq. Gegenüber 1990 beträgt die Minderung -93,1 %, gegenüber 2005 -87,6 % (Tabelle 99). 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 99: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft und Sonstige zwischen 1990 und 2050

	1990	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Mio. t CO ₂ -Äq.								
Entwicklung 1990 – 2019	42,3	23,5	10,1						
MMS = MWMS				7,5	5,7	4,4	3,6	3,2	2,9
	Veränderung ab 1990 in %								
Entwicklung 1990 – 2019		-44,4	-76,1						
MMS = MWMS				-82,3	-86,5	-89,5	-91,6	-92,4	-93,1
	Veränderung ab 2005 in %								
Entwicklung 2005 – 2019			-57,0						
MMS = MWMS				-68,1	-75,7	-81,2	-84,8	-86,4	-87,6

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Öko-Institut

9.2 Instrumentenbewertung

Die Instrumentenbewertung basiert auf dem Instrumentenpapier (Anhang A.3).

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 sowohl für die Maßnahmen zur Deponiebelüftung und optimierten Gaserfassung als auch für die Reduktion der Lebensmittelabfälle.

Tabelle 100: Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im MMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
Deponieverordnung	Keine Bewertung der Einzelinstrumentenwirkung, da Annahme, dass Deponieverordnung auch im OMS wirksam ist.
Kreislaufwirtschaftsgesetz	Keine Bewertung der Einzelinstrumentenwirkung, da Annahme, dass Kreislaufwirtschaftsgesetz auch im OMS wirksam ist.
Förderprogramm zur Ausweitung der Deponiebelüftung und Optimierung der Gaserfassung	Bewertung der Einzelinstrumentenwirkung für die Deponiebelüftung basierend auf der Ermittlung der CH ₄ -Emissionen im Abfallmodell ohne Deponiebelüftung. Daten für die Minderung durch die optimierte Gaserfassung basierend auf Erfahrungswerten aus Projekten und Statistik.
Förderung von klimafreundlicher Abwasserbehandlung	Quantitative Bewertung nicht möglich aufgrund fehlender Daten/Potenzialabschätzungen
Vermeidung von Lebensmittelabfällen	Reduktion der Lebensmittelabfälle von aktuell jährlich 110 kg/Person (Statistisches Bundesamt 2022a) um 16,5 kg/Person bis zum Jahr 2030. Bewertung der Instrumentenwirkung im Vergleich zu einem OMS ohne Reduktion der Lebensmittelabfälle

Quelle: Annahmen Öko-Institut. Für Details zu den Annahmen siehe auch Abschnitt 9.3.

Durch das Förderprogramm zur Deponiebelüftung und optimierten Gaserfassung wird gegenüber dem OMS im Jahr 2030 eine Minderung von ca. 0,9 Mio t CO₂-Äq. und im Jahr 2040 eine Minderung von ca. 1,5 Mio t CO₂-Äq. 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 101: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen in Deutschland pro Jahr für ausgewählte Instrumente des Abfallsektors im MMS

Direkte Emissionsminderung* (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungsabschätzung	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Förderprogramm zur Ausweitung der Deponiebelüftung und Optimierung der Gaserfassung	2022	0,4	0,9	1,3	1,5	1,2	1,0
Vermeidung von Lebensmittelabfällen	2022	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

9.3 Sektorspezifische Parameter & Annahmen

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 durch die 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:

- ▶ In der Modellierung wird angenommen, dass bis zum Jahr 2029 pro Jahr sieben Projekte mit jährlichen Einsparpotenzialen von 50.000 t CO₂-Äq. pro Deponie realisiert werden können. Weiterhin werden zwischen den Jahren 2030 und 2040 jährlich 3-4 Projekte realisiert.
- ▶ 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:

- ▶ 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)⁶⁵. Darüberhinausgehende Mengen an Bioabfällen bleiben konstant.
- ▶ Reduktion der Lebensmittelabfälle bis 2030 von 110 kg/Person/Jahr um 16,5 kg/Person/Jahr. Das entspricht einer Reduktion um 20 % gegenüber heute⁶⁶. 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.
- ▶ Schrittweise Steigerung der Vergärungsanteile von aktuell 40 % am gesamten Bioabfallaufkommen auf 50 % bis zum Jahr 2040 auf Grund der gesteigerten Nachfrage nach Bioenergie aus Abfall- und Reststoffen.
- ▶ Anpassung der Emissionsfaktoren für die erweiterten Anlagenkapazitäten für die Abfallvergärung in Folge technischer Verbesserungen (z.B. durch geringere CH₄-Leckageraten etc.). Auf Basis von Cuhls et al. (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).

⁶⁵ Basierend auf den Potenzialschätzungen aus der Studie „BioRest. Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem“ ((Fehrenbach et al. 2019)) für Biogut und Grüngut aus dem BAU-Szenario für das Jahr 2030.

⁶⁶ Die durchschnittlichen Lebensmittelabfälle liegen bei 78 kg/Person/Jahr in den Haushalten, hinzu kommen ca. 32 kg/Person/Jahr aus der Außer-Haus-Verpflegung und dem Einzelhandel (Statistisches Bundesamt 2022b). Eine Reduktion um 50 % bis zum Jahr 2030 würde insgesamt zu einer Reduktion um 55 kg/Person 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 30 %-igen Zielerreichung gerechnet.

10 LULUCF

Der Sektor LULUCF entspricht der Quellgruppe CRF 4 LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry, auf Deutsch: Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) und umfasst Kohlenstoffsenken und Treibhausgasemissionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderungen sowie aus der Forstwirtschaft einschließlich Holzprodukten. In diesem Sektor können sowohl Quellen (positive Zahlen) als auch Senken (negative Zahlen) von Treibhausgasen auftreten. Die bedeutendsten Quellen von Treibhausgasen sind drainierte organische Böden (Moorböden) und die Verwendung von Torfprodukten in Blumenerden und Gartenbausubstraten. Die bedeutendste Senke ist der Wald. In den im Folgenden dargestellten Nettobilanzen des Sektors LULUCF sind Methanemissionen aus Fisch- und anderen Teichen nicht berücksichtigt. Diese werden seit der Inventar-Submission 2023 berichtet, die Referenz für diesen Projektionsbericht ist jedoch die Inventar-Submission 2022. Die mit der in anderen Sektoren verwendeten, inländisch erzeugten Biomasse (siehe Abschnitt 3.4.2) verbundenen Emissionen werden zum größten Teil im Sektor LULUCF verbucht, nicht in den Biomasse verwendenden Sektoren, was die Bewertung der kombinierten Effekte von Maßnahmen in diesem Sektor erschwert. Das „Aktionsprogramm natürlicher Klimaschutz“ (ANK) lag zum Zeitpunkt der Finalisierung des Instrumentenpapiers nicht komplett und oft nicht in hinreichend konkretisierter und operationalisierter Form vor, so dass es nicht komplett berücksichtigt werden konnte.

Weitere Daten sind in einer Excel-Datei zu finden, die separat veröffentlicht wird (Anhang A.1).

10.1 Zentrale Ergebnisse

Die Nettobilanz des Sektors LULUCF beträgt im MMS im Jahr 2030 -17,7 Mio. t CO₂-Äq., 2040 liegt sie bei -18,1 Mio. t CO₂-Äq. und 2045 bei -17 Mio. t CO₂-Äq. Im MWMS beträgt die Nettobilanz im Jahr 2030 -20,8 Mio. t CO₂-Äq., 2040 liegt sie bei -23,9 Mio. t CO₂-Äq. und 2045 bei -21,6 Mio. t CO₂-Äq. (s. Tabelle 102 und Tabelle 103). In Tabelle 104 werden die Entwicklungen im LULUCF-Sektor insgesamt dargestellt. Die Tabelle enthält nur absolute Änderungen der Nettoemissionen, prozentuale Minderungen von Emissionen werden für den LULUCF-Sektor nicht dargestellt. Da der Sektor sowohl eine Netto-Quelle als auch eine Netto-Senke für Treibhausgase sein kann, wären prozentuale Veränderungen bezüglich Höhe und Vorzeichen nicht vergleichbar mit anderen Sektoren.

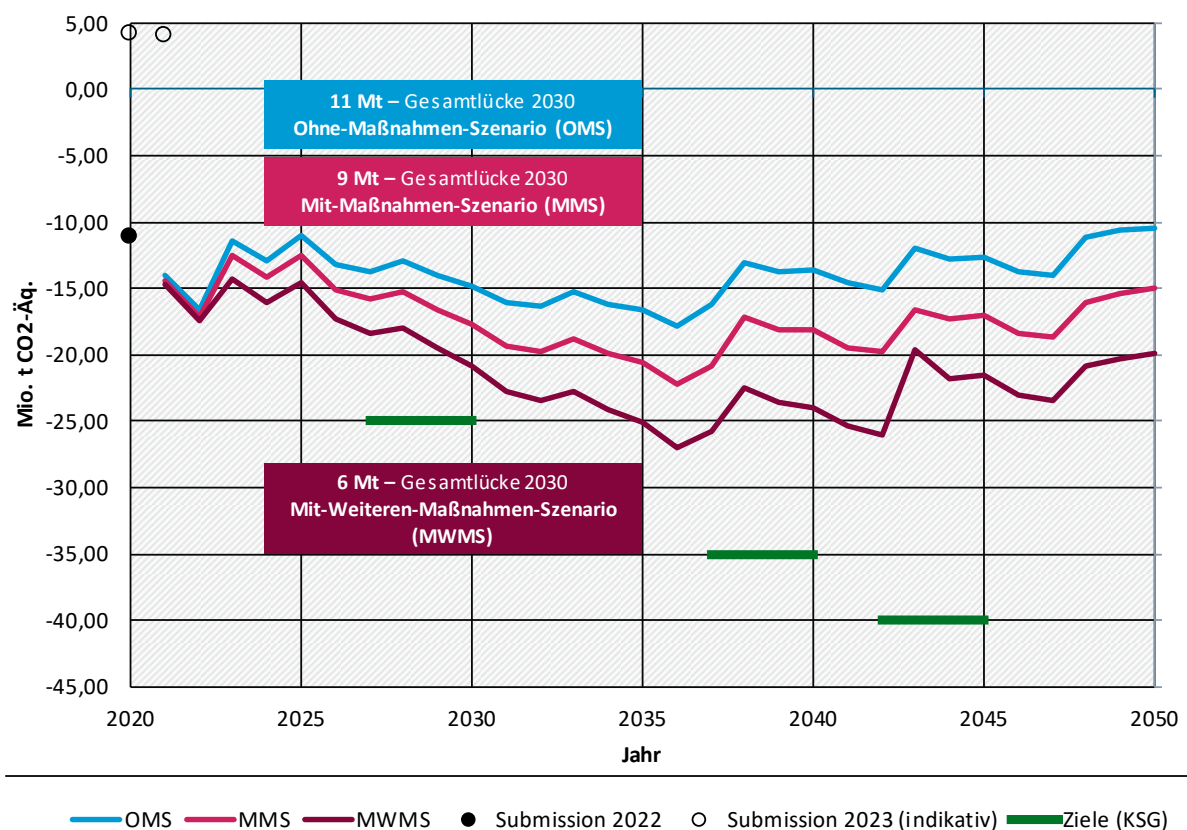
Die Entwicklung der Nettosenke wird durch die Projektion der Waldbiomasse und der Holzentnahme dominiert. Einen weiteren erheblichen Beitrag zur projizierten Entwicklung leisten der Rückgang des Torfabbaus auf Null bis zum Jahr 2040 und die Wiedervernässung von Mooren.

Die im KSG für den LULUCF-Sektor festgelegten Zielwerte für 2030 von -25 Mio. t CO₂-Äq. (Mittelwert der jährlichen Emissionsbilanzen des jeweiligen Zieljahres und der drei vorhergehenden Kalenderjahre), für 2040 von -35 Mio. t CO₂-Äq. und für 2045 von -40 Mio. t CO₂-Äq. werden, trotz der vergleichsweise optimistischen Annahmen zur Entwicklung der Waldsenke und zum Moorbodenschutz, in beiden Szenarien nicht erreicht (s.u.). Während der Zielwert für 2030 im MWMS ab 2035 und damit fünf Jahre später erreicht wird, werden die Ziele für 2040 und 2045 um 10 bis 20 Mio. t CO₂-Äq. p.a. verfehlt.

Noch nicht berücksichtigt sind Methanemissionen aus künstlichen Gewässern (u.a. Fischteiche), die seit der Inventar-Submission 2023 im LULUCF-Sektor berichtet werden. Sie betrugen im Jahr 2020 ca. 4,7 Mio. t CO₂-Äq. Weitere methodische Änderungen in der Submission 2023, wie beispielsweise die Regionalisierung von Bodenkohlenstoffvorräten, führen dazu, dass der LULUCF-

Sektor ab 2020 in Submission 2023 als Netto-Treibhausquelle ausgewiesen wird (vgl. die indikativen Werte in Abbildung 66). Die Lücke zu den in absoluten Zahlen festgelegten Zielen des KSG wird sich auf Basis der neuen Emissionsdaten entsprechend vergrößern.

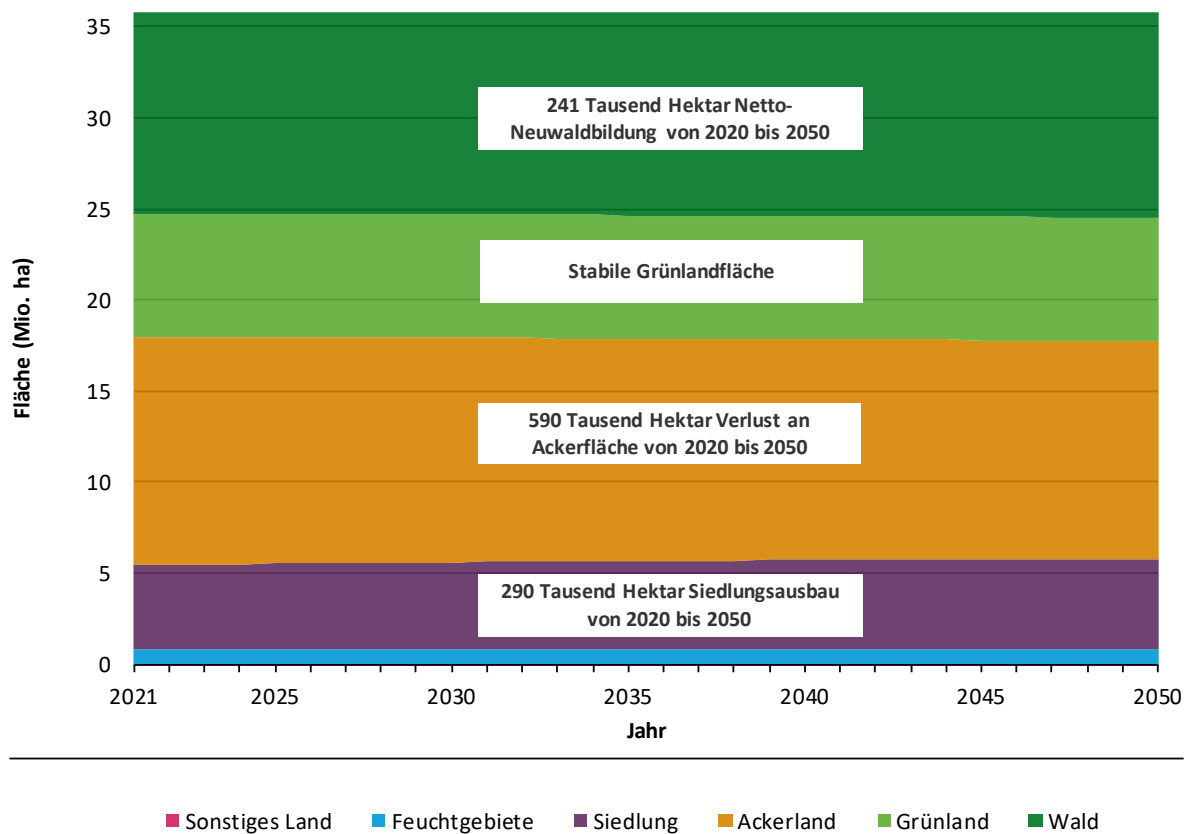
Abbildung 66: Projizierte Entwicklung der Nettobilanz des LULUCF-Sektors ohne Maßnahmen (OMS), mit Maßnahmen (MMS) und mit weiteren Maßnahmen (MWMS)



Anmerkung: Negative Zahlen entsprechen einer Senke für Treibhausgase.

Quelle: UBA (2022b) umgerechnet auf IPCC-AR5-GWPs, UBA (2023a), Modellierung: Thünen-Institut

In Abbildung 67 wird die Entwicklung der Flächennutzungskategorien im MMS gezeigt. Entsprechend des langjährigen Trends nimmt die Waldfläche bis 2050 in Deutschland weiter zu. Die Neuwaldbildung findet sowohl durch natürliche Waldentstehung (Sukzession), als auch durch Aufforstung statt. Geförderte Aufforstung spielt für diese Entwicklung jedoch keine wesentliche Rolle. Die Waldausweitung kann die Zuwachsrückgänge durch Alterung des Waldes nicht kompensieren. Vor dem Hintergrund der Grünlanderhaltungsregeln in der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU und der Schutzregeln der Bundesländer bleibt die Grünlandfläche konstant. Die Ackerfläche nimmt aufgrund der weiteren Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche und des Ausbaus erneuerbarer Energien, insbesondere Freiflächen-Photovoltaik, bis 2050 deutlich ab.

Abbildung 67: Projizierte Entwicklung der Flächennutzung im MMS

Quelle: Modellierung Thünen-Institut

Tabelle 102: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor LULUCF nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.							
Wald	-52,4	-60,2	-60,2	-60,3	-58,3	-56,4	-54,7
Ackerland	17,4	17,0	16,9	16,2	16,2	16,2	16,1
Grünland	19,8	21,0	19,0	18,0	19,4	18,7	19,1
Feuchtgebiete	5,1	4,6	3,9	3,3	2,8	2,9	3,0
Siedlungen	1,3	1,6	1,9	2,1	2,2	2,3	2,3
Holzprodukte	-6,1	3,6	0,9	0,0	-0,4	-0,7	-0,8
Gesamt	-15,0	-12,5	-17,7	-20,6	-18,1	-17,0	-15,0

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Thünen-Institut

Tabelle 103: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor LULUCF nach Quellgruppen zwischen 2019 und 2050 im MWMS

Kategorie	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.							
Wald	-52,4	-63,0	-63,2	-63,6	-61,9	-56,8	-55,0
Ackerland	17,4	17,0	16,8	16,0	15,8	15,7	15,5
Grünland	19,8	20,9	18,5	16,6	17,3	16,1	16,1
Feuchtgebiete	5,1	4,6	3,8	3,1	2,4	2,3	2,3
Siedlungen	1,3	1,5	1,7	2,1	2,3	2,3	2,3
Holzprodukte	-6,1	4,5	1,6	0,7	0,2	-1,2	-1,1
Gesamt	-15,0	-14,5	-20,8	-25,1	-23,9	-21,6	-19,9

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Thünen-Institut

Tabelle 104: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor LULUCF zwischen 1990 und 2050 im Vergleich der Szenarien

	1990	2005	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mio. t CO ₂ -Äq.									
Entwicklung 1990 – 2019	27,0	4,3	-15,0						
MMS				-12,5	-17,7	-20,6	-18,1	-17,0	-15,0
MWMS				-14,5	-20,8	-25,1	-23,9	-21,6	-19,9
Veränderung ab 1990 in Mio. t CO ₂ -Äq.									
Entwicklung 1990 – 2019		-22,7	-42,0						
MMS				-39,5	-44,7	-47,6	-45,1	-44,0	-42,0
MWMS				-41,5	-47,8	-52,1	-50,9	-48,6	-46,9
Veränderung ab 2005 in Mio. t CO ₂ -Äq.									
Entwicklung 2005 – 2019			-19,2						
MMS				-16,8	-21,9	-24,8	-22,4	-21,3	-19,2
MWMS				-18,8	-25,1	-29,4	-28,2	-25,9	-24,1

Quelle: (UBA 2022b), Modellrechnungen Thünen-Institut

10.2 Instrumentenbewertung

Die Instrumentenbewertung basiert auf dem Instrumentenpapier (Anhang A.3).

Im Folgenden werden Instrumente und Maßnahmen im LULUCF-Sektor vorgestellt und ihr Beitrag zur Emissionsminderung dargestellt, zunächst für das MMS (Tabelle 105 und Tabelle 106) und dann im MWMS (Tabelle 107 und Tabelle 108). Die Instrumente und ihr Bezug zu politischen Programmen und Maßnahmen können Anhang A.3 entnommen werden.

Die Berechnungen wurden mit den Berichterstattungsmodellen LULUCFmod für die Landnutzung und MATRIX-Modell für Waldbiomasse und Holzprodukte durchgeführt. Die Wirkung der von Landnutzungsänderungen und Wiedervernässung wurden im Modell LULUCFmod durch schrittweise Einbeziehung der Maßnahmen in die Berechnungen quantifiziert. Die ausgewiesenen Wirkungen sind trotz verschiedener (eher geringer) Wechselwirkungen weitgehend additiv.

Tabelle 105: Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im LULUCF-Sektor im MMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
Begrenzung der Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke	Reduzierung der Neuinanspruchnahme auf 40 ha/Tag bis 2030, bis 2050 Rückgang auf null (lineare Abnahme). Der Ausbau von Freiflächen-PV wird hier nicht berücksichtigt, sondern separat betrachtet. Die Übergangswahrscheinlichkeiten für Landnutzungsänderungen zu Siedlung wurden so reduziert, dass die Nettoänderung der Siedlungsfläche den oben angegebenen Werten entspricht. Referenz ohne Maßnahme ist die Fortschreibung der Landnutzungs-Trends zwischen 2015 und 2020 mit einer Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche um ca. 55 ha pro Tag.
Flächenversiegelung und Ausgleichsflächen durch Ausbau von Windkraft und Freiflächen-PV	Flächenversiegelung durch Ausbau der Windkraft (inkl. Zuwegung) und neue Ausgleichsflächen für den Ausbau von Windkraft und Freiflächen-Photovoltaik (Anlage von Feldgehölzen auf bisherigen Ackerflächen und Umwandlung Acker in Grünland), mit ca. 36.000 ha im Jahr 2030 und 87.200 ha im Jahr 2050.
Wiedervernässung von Moorböden	Umsetzung von Agrarumweltmaßnahmen zur moorschonenden Stauhaltung sowie Moorschutzprojekten der Länder entsprechend der im GAP-Strategieplan ab 2023 dokumentierten geplanten Maßnahmen. Die Maßnahmenbudgets werden über den aktuellen Planungszeitraum hinaus fortgeschrieben. Im Jahr 2030 werden auf ca. 54.000 ha Maßnahmen zur Wiedervernässung durchgeführt, vor allem auf Landwirtschaftsflächen, und im Jahr 2050 auf ca. 141.000 ha. Abbildung von vollständigen und teilweisen Wiedervernässungen durch Anpassung von Wasserstand und Emissionen der entsprechenden Flächen.
Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten	Die Umsetzung der Torfminderungsstrategie des BMEL (BMEL 2022) und auslaufende Abbaugenehmigungen führen bis 2040 zur Beendigung des Torfabbaus in Deutschland. Ehemalige Torfabbauflächen werden vollständig wiedervernässt. Emissionen aus Torfverwendung werden bis 2040 linear auf 0 reduziert, Fläche der Torfabbauflächen wird entsprechend reduziert mit Annahme einer vollständigen Wiedervernässung.
Erhaltung und nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder und Holzverwendung, hier: Einschlagsstopp in alten Buchenwäldern	In der Periode 2023-2027 werden 40.000 ha Wald mit der Hauptbaumart Buche ab einem Alter von 120 Jahren nicht mehr genutzt. Vergleich zweier Szenarienläufe im Waldsimulator mit und ohne Nutzungsverzicht in alten Buchenwäldern.
Humuserhalt und -aufbau im Ackerland	Die Wirkungen werden nicht quantifiziert, da Änderungen der Bodenkohlenstoffvorräte in mineralischen Ackerböden mit den Daten und Methoden der Submission 2022 nicht abgebildet werden können. Die benötigten Datengrundlagen und Methoden werden derzeit aufgebaut.
Erhalt von Dauergrünland	Die Grünlanderhaltung ist eine Anforderung der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU, auch Ländermaßnahmen tragen zur Erhaltung bei. Die Maßnahme wird im MMS implizit abgebildet, es wird aber keine Maßnahmenwirkung

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
	quantifiziert, aufgrund der Schwierigkeit, ein belastbares „ohne-Maßnahmen-Szenario“ für eine Maßnahme, die bereits so lange in Kraft ist, zu definieren.
Honorierung der Ökosystemleistung des Waldes	Diese Maßnahme hat im MMS flankierenden Charakter, ihre Wirkungen werden nicht quantifiziert.
Forschungsinitiative Klimaschutz in Land- und Forstwirtschaft	Diese Maßnahme hat flankierenden Charakter, ihre Wirkungen werden nicht quantifiziert.

Quelle: Zusammenstellung des Thünen-Instituts

Tabelle 106: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen pro Jahr für ausgewählte Instrumente im LULUCF-Sektor im MMS

Direkte Emissionsminderung* (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungsabschätzung	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Begrenzung der Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke	2021	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
Flächenversiegelung und Ausgleichsflächen durch Ausbau von Windkraft und Freiflächen-PV	2021	0,1	0,4	0,7	0,3	0,1	0,01
Wiedervernässung von Moorböden ¹⁾	2023	0,2	0,5	0,8	1,1	1,3	1,5
Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten	2020	0,6	1,2	1,9	2,5	2,4	2,4
Einschlagstopp in alten Buchenwäldern	2023	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

1) Ein kleiner Teil der Gesamtwirkung, nämlich die Verringerung der Lachgasemissionen aus organischen Böden, wird im Sektor Landwirtschaft berichtet (siehe Kapitel zur Landwirtschaft).

Quelle: Modellrechnungen Thünen-Institut

Die Begrenzung der Flächenneuanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr im MMS reduziert die CO₂-Freisetzung durch Umwandlung insbesondere von Grünland- und Waldflächen. Die separat betrachtete Flächenversiegelung durch den Ausbau der Windenergie fällt aufgrund geringer Flächenumfänge kaum ins Gewicht. Bedeutender ist die Zunahme der CO₂-Einbindung durch neue Feldgehölz- und Grünlandflächen als Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen für Windenergie und Freiflächen-Photovoltaik. Die Wirkung nimmt dem Ausbau erneuerbarer Energien folgend bis 2035 zu und bis 2050 wieder ab. Die Wiedervernässung von Moorböden und die Beendigung der Torfabbaus sind die Maßnahmen des MMS mit den größten Minderungspotenzialen. Im Jahr 2020 emittierten über 50 Mio. t CO₂-Äq. aus entwässerten Moorböden.

Die Maßnahme Humuserhalt und -aufbau im Ackerland kann auf Basis der Methoden der Submission 2022 nicht abgebildet werden. Ein Humusaufbau findet vor allem durch den Ausbau des Ökolandbaus auf mineralischen Ackerböden statt. Bei einem Kohlenstoffaufbau von 0,1 bis 0,4 t C pro Hektar und Jahr und einer Ausweitung der ökologisch bewirtschafteten Fläche um 5 % der

Landwirtschaftsfläche ergeben sich im Jahr 2030 CO₂-Festlegungen in Ackerböden in Höhe von 0,14 bis 0,57 Mio. t CO₂. Die C-Einbindung erfolgt über einen begrenzten Zeitraum von 20 bis 30 Jahren (Gattinger et al. 2012; Kätterer et al. 2013).

Die meisten Maßnahmen in den beschlossenen Paketen zur „Erhaltung und nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder und Holzverwendung“ dienen der Aufrechterhaltung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung und der Sicherung der Existenz eines vitalen Waldes per se und können nicht in Bezug auf Klimaschutzleistungen evaluiert werden. Die Maßnahme „Einschlagstopp in alten Buchenwäldern“ ist von der Klimaschutzwirkung begrenzt, da einerseits wenig Fläche zur Verfügung steht und die Leistung je Flächeneinheit über die Zeit auch zurückgehen wird, da mit zunehmendem Alter die jährliche Neuaufnahme von Kohlenstoff zurückgehen, gleichzeitig jedoch das Risiko des Absterbens einzelner Bäume und ganzer Bestände zunehmen wird. Dies ist in der Modellierung nur bedingt abbildbar.

Die Maßnahme „Erstaufforstung“ aus dem KSP2030 wird im MMS keine zusätzliche Wirkung entfalten, da der rechtliche Rahmen nicht angepasst wurde. Aktuell bedeutet die Umwandlung von landwirtschaftlichen Flächen in Wald einen hohen Wertverlust, der durch die Förderung nicht kompensiert wird. Sie ist daher für Grundbesitzer*innen unattraktiv und mit einer nennenswerten Umsetzung in die Praxis kann entsprechend nicht gerechnet werden.

Tabelle 107: Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung im LULUCF-Sektor im MWMS ggü. der jeweiligen kontrafaktischen Entwicklung

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
Begrenzung der Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke	Reduzierung der Neuinanspruchnahme auf 29,9 ha/Tag bis 2030, bis 2050 Rückgang auf null (lineare Abnahme). Der Ausbau von Freiflächen-PV wird hier nicht berücksichtigt, sondern separat betrachtet. Übergangswahrscheinlichkeiten für Landnutzungsänderungen zu Siedlung werden so reduziert, dass die Nettoänderung der Siedlungsfläche den Zielwerten entspricht. Referenz ist wie für alle weiteren hier dargestellten Maßnahmen das MMS.
Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK): Ausweitung Feldgehölze und Grünland	ANK-Förderung der Anlage neuer Feldgehölze und Grünlandflächen, mit einem angenommenen Budget von ca. 60 Mio. € pro Jahr ab 2025. Im Jahr 2030 werden ca. 11.700 ha neuer Feldgehölz- und Grünlandfläche erreicht, bis 2050 ca. 55.700 ha. Die Abbildung erfolgt durch Anpassung der Übergangswahrscheinlichkeiten.
Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK): Schutz von Moorböden	ANK-Förderung von Projekten zum Moorbodenschutz, mit einem angenommenen Budget von ca. 320 Mio. € pro Jahr ab 2025. Im Jahr 2030 werden ca. 40.300 ha Moorböden wiedervernässt, bis 2050 ca. 380.000 ha. Abbildung von vollständigen und teilweisen Wiedervernässungen durch Anpassung von Wasserstand und Emissionen der entsprechenden Flächen.
Erstaufforstung	Maßnahme zur Erhaltung und nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder. Berechnung der Auswirkungen von Erstaufforstungen auf ca. 33.300 ha im Landnutzungsmodell.
Temporärer Nutzungsverzicht in Laubholzbeständen	Maßnahme zur Honorierung der Ökosystemleistung des Waldes. Vergleich zweier Szenarienläufe des Waldsimulators mit und ohne Berücksichtigung der Extensivierung der Laubholznutzung. Es wird davon ausgegangen, dass 10 Prozent der Fläche mit Laubholzbeständen für 10 + 10 Jahre aus der Nutzung genommen werden (Programmlaufzeit 10 Jahre, Bindungsfrist für Stilllegungen 10 Jahre nach Programmende). Rechnerisch wird diese Maßnahme nicht an der Waldfläche abgebildet, sondern über den Emissionsfaktor. Dieser setzt sich aus der Vorratsveränderung und dem Zuwachs im Verhältnis neun

Einzelmaßnahme	Umsetzung und Annahmen für die Instrumentenbewertung
	zu eins in den Perioden 2023-27 bis 2038-42 zusammen. Der Abgang wird für die betreffenden Hauptbaumarten in den genannten Perioden mit dem Faktor 0,9 multipliziert.
Holzbauinitiative	Die Wirkungen der Holzbauinitiative werden nicht quantifiziert, da noch Informationen zur konkreten Umsetzung fehlen.

Quelle: Zusammenstellung des Thünen-Instituts.

Tabelle 108: Direkte Netto-Minderungen an Treibhausgasemissionen pro Jahr für ausgewählte Instrumente im LULUCF-Sektor im MWMS (Zusatzwirkung zum MMS*)

Direkte Emissionsminderung* (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Wirkbeginn für die Wirkungsabschätzung	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Begrenzung der Nutzung neuer Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke	2021	0,1	0,2	0,0	-0,1	-0,1	-0,1
Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK): Ausweitung Feldgehölze und Grünland	2021	0,0	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2
Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK): Schutz von Moorböden	2021	0,0	0,5	1,7	2,7	3,5	4,3
Erstaufforstung	2026	0,0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2
Temporärer Nutzungsverzicht in Laubholzbeständen	2020	1,9	2,1	2,3	2,7	0,6	0,4

*Anmerkung: Die ausgewiesene Minderungswirkung im MWMS ist zusätzlich zur bereits im MMS ausgewiesenen Maßnahmenwirkung, ist also additiv zum MMS zu verstehen.

Quelle: Modellierung Thünen-Institut

Im MWMS wird eine umfangreichere Wiedervernässung von Moorböden mit Förderung aus dem Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) abgebildet. Diese erfolgt schrittweise, da die relevanten Flächen weit überwiegend in privater Hand liegen. Die Flächen müssen deshalb entweder erst von der öffentlichen Hand erworben werden, oder die dauerhaften Bewirtschaftungsnachteile der Vernässung müssen zu Beginn der Maßnahme finanziell ausgeglichen werden. Wiedervernässungsmaßnahmen können zudem nicht kurzfristig umgesetzt werden, weil sie einer umfangreichen hydrologischen Planung bedürfen und verschiedene Genehmigungsverfahren durchlaufen müssen. Das führt dazu, dass sich die Wirkungen trotz umfangreicher Förderung erst langsam, dafür aber langfristig stabil entfalten. Das Ziel der Nationalen Moorschutzstrategie, bis zum Jahr 2030 Emissionen in Höhe von 5 Mio. t CO₂-Äq. durch Moorbodenschutz zu reduzieren, wird deshalb unter Berücksichtigung der im MMS ausgewiesenen Maßnahmen erst nach 2035 erreicht. Die Maßnahmen des ANK zur Ausweitung von Feldgehölzen und Grünland haben im Vergleich zum Moorbodenschutz deutlich geringere Emissionsminderungspotentiale durch zeitlich begrenzte Kohlenstoffeinbindung in Biomasse und Boden.

Die ausgewiesene Erhöhung der Emissionen durch den Rückgang des Siedlungsausbaus ist drauf zurückzuführen, dass die Wirkung zusätzlich zum MMS ausgewiesen wird. Im MWMS ist der

Rückgang des Siedlungsausbaus nach 2030 geringer als im MMS, weil bereits bis 2030 ein stärkerer Rückgang erfolgt.

Für das MWMS wurde eine Änderung der Aufforstungsförderung angenommen, die gegenüber den Annahmen im Instrumentenpapier in der Umsetzung zu geringeren Flächen führt. Es wird angenommen, dass statt der reinen Aufwandserstattung der Maßnahme auch ein Wertausgleich gefördert wird, der die Verluste durch die Umwandlung von landwirtschaftlichen Nutzflächen im Wald ausgleicht. Ohne diesen Ausgleich müsste die Erstaufforstung mit dem bisherigen sehr geringen Flächenansatz berechnet werden und damit wirkungslos bleiben. Der Gesamteffekt ist vergleichsweise gering, da Aufforstungen eine längere Etablierungszeit benötigen, bevor die Kohlenstoffeinbindung auf den Flächen effizient funktioniert.

Die Aussetzung der Nutzung in Laubholzbeständen bewirkt eine zeitweilige Erhöhung der Senke, was jedoch mit dem Ende der Maßnahme (nach 10 Jahren) wieder zurückgeht. Diese Entwicklung wird zusätzlich durch Alterungsprozesse im Wald verstärkt und ist nicht nur auf die Maßnahmendauer zurückzuführen. Im MWMS kommt es daher zwischen 2040 und 2045 zu einer deutlichen Abnahme der Netto-LULUCF-Senke (s. Abbildung 66).

10.3 Sektorspezifische Parameter & Annahmen

Die Projektion bildet keine zukünftigen Extremwetterereignisse ab. Für die Simulation der Waldentwicklung wird davon ausgegangen, dass sich die Dürresituation der letzten Jahre in dieser Art im Betrachtungszeitraum nicht wiederholen wird und dass sich die verbliebenen Bäume weitestgehend erholen werden. Dies bedeutet – unter Berücksichtigung der Kalamitäten 2018ff – einen insgesamt geringeren Zuwachs (=Brutto-Kohlenstoffaufnahme aus der Atmosphäre) und eine geringere Holzentnahme als während und direkt nach den Dürrejahren. Flächennutzungsänderungen zu Gehölzen, von Ackerland zu Grünland und die Wiedervernässung von Moorböden erfolgen unter der Annahme, dass die Umsetzung solcher dauerhafter Veränderungen auf freiwilliger Basis durch Flächenkauf oder durch Ausgleich von Bewirtschaftungsnachteilen erfolgt. Bei Wiedervernässung wird angenommen, dass die Wirkungen aufgrund von Planungs- und Genehmigungsverfahren und notwendigen wasserbaulichen Investitionen erst fünf Jahre nach Sicherung der Flächen durch Kauf oder Ausgleich eintreten. Es wird angenommen, dass einmal begonnene Projekte umgesetzt werden können und nicht durch juristische Auseinandersetzungen verzögert werden.

11 Quellenverzeichnis

AGEB - AG Energiebilanzen (Hg.) (2008-2022a): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Jahre 2008-2020. 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 2021 für die Jahre 2018 und 2019, Stand 2022 für das Jahr 2020. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

AGEB - AG Energiebilanzen (Hg.) (2008-2022b): Satellitenbilanz Erneuerbare Energien, Jahre 2000-2020. 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, Stand 2021 für das Jahr 2019, Stand 2022 für das Jahr 2020. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

AGEB - AG Energiebilanzen (Hg.) (2022): Nettostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern. Online verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2022/09/STRERZ22_Abgabe-12-2022_inkl-Rev-EE.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Agora Energiewende (2021): Transformationskostenrechner Klimaschutzverträge (KSV) - Stahlbranche, Software & Daten. Version: 1.1, FutureCamp Climate; Wuppertal Institut. Agora Energiewende (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaschutzvertraege-fuer-die-industrietransformation-stahl-datenanhang>, zuletzt aktualisiert am 2021, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Bazzanella, A. M.; Ausfelder, F. (2017): Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry, Technology study (Technology Study). DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (Hg.). Frankfurt am Main. Online verfügbar unter https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf, zuletzt geprüft am 27.05.2019.

BBR - Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hg.) (2017): Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse, Projektbericht. Deutscher Wetterdienst. Offenbach. Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/try-projektbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hg.) (2017): Testreferenzjahre. Online verfügbar unter https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/TRY_node.html, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Biere, D. (2015): Modellgestützte Szenario-Analyse der langfristigen Erdgasnachfrageentwicklung der deutschen Industrie. Dissertation, Karlsruher Institute of Technology (KIT). Karlsruhe, 2015. Online verfügbar unter <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000049339>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Biewald, A.; Gniffke, P.; Fuß, R. (2022): Prozentuale Sektorziele ermöglichen mehr Klimaschutz – das aktuelle Fallbeispiel Landwirtschaft (Fact Sheet). Umweltbundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/factsheet_prozentuale_sektorziele_ermoeneglichen_mehr_klimaschutz.pdf, zuletzt geprüft am 13.06.2023.

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hg.) (2022): Torffrei gärtnern, Klima schützen - Die Torfminderungsstrategie des BMEL. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/torfminderungsstrategie.pdf>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020): Article 21 Report Germany 2019 - updated, Questionnaire on the implementation of Directive 2003/87/EC. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hg.). Online verfügbar unter https://cdr.eionet.europa.eu/Converters/run_conversion?file=de/eu/emt/envx5mxq/Article21_2019_update&conv=527&source=remote, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

BMUV - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hg.) (2023): Entwurf - Nationales Luftreinhalteprogramm der Bundesrepublik Deutschland nach Artikel 6 und Artikel 10 der Richtlinie (EU) 2016/2284 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe sowie nach §§ 4 und 16 der Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion bestimmter Luftschadstoffe (43. BImSchV). Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/gesetz/nationales-luftreinhalteprogramm>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.) (2020a): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.) (2020b): Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/integrierter-nationaler-energie-klimaplan.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 10.08.2023.

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland, unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Stand: Februar 2022). Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hg.). Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html, zuletzt geprüft am 15.06.2023.

BNetzA - Bundesnetzagentur (2022a): Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur, (Stand: 25. November 2022). Bundesnetzagentur (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

BNetzA - Bundesnetzagentur (Hg.) (2022b): Genehmigung des Szenariorahmens 2023-2037/2045 für den Netzentwicklungsplan 2023-2037/2045. Online verfügbar unter https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-01/Szenariorahmen_2037_Genehmigung.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Bundeskartellamt (Hg.) (2017): Sektoruntersuchung Zement und Transportbeton, Abschlussbericht gemäß § 32e GWB. Bonn. Online verfügbar unter <https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Publikation/DE/Sektoruntersuchungen/Sektoruntersuchung%20Zement%20und%20Transportbeton.html>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Bundesregierung (Hg.) (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Bundestag (2020): Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung (Kohleverstromungsbeendigungsgesetz - KVBG). Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/kvbg/KVBG.pdf>, zuletzt geprüft am 01.10.2020.

Climate Analytics; NewClimate Institute: Climate Action Tracker (CAT). Climate Analytics und NewClimate Institute (Hg.). Online verfügbar unter <https://climateactiontracker.org>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Cuhls, C.; Mähl, B.; Clemens, J. (2015): Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen (Texte, 39/2015). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_39_2015_ermittlung_der_emissionssituation_bei_der_verwertung_von_bioabfaellen.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Dambeck, H.; Ess, F.; Falkenberg, H.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Koepp, M.; Kreidelmeyer, S.; Lübbers, S.; Piegsa, A.; Scheffer, S.; Spillmann, T.; Thamling, N.; Wünsch, A. et al. (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045, Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung. Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie. Agora Energiewende; Stiftung Klimaneutralität und Agora Verkehrswende (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

de Jong, G.; Schroten, A.; van Essen, H.; Otten, M.; Bucci, P. (2010): Price sensitivity of European road freight transport – towards a better understanding of existing results, A report for Transport & Environment. significance; CE Delft. Online verfügbar unter https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/05/2010_07_price_sensitivity_road_freight_significance_ce.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Deutscher Bundestag (2022): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG 2023), Fassung vom 21.12.2015 (BGBl. I S. 2498), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 20.12.2022 (BGBl. I S. 2512) geändert worden ist. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/index.html, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Diefenbach, N.; Stein, B.; Loga, T.; Rodenfels, M.; Jahn, K. (2018): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2017. Institut Wohnen und Umwelt; Fraunhofer IFAM. KfW (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-alle-Evaluationen/Monitoring-der-KfW-Programme-EBS-2017.pdf>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

EC - European Commission (2020): Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2021, Version after consultation of WG2 under the Climate Change Committee. Brussels.

EC - European Commission (2022a): Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2023. Email mit Mitglieder der WG II des Climate Change Committees, April 2022. PDF.

EC - European Commission (Hg.) (2022b): EU agricultural outlook for markets, income and environment 2022-2032. European Commission, DG Agriculture and Rural Development. Brüssel. Online verfügbar unter https://agriculture.ec.europa.eu/document/download/1492c9fa-7336-4542-8d3b-04443d4ac0ab_en?file-name=agricultural-outlook-2022-report_en_0.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

EC - European Commission (Hg.) (2022c): IMPACT ASSESSMENT REPORT Accompanying the document Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014, COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT. SWD(2022) 96 final. Online verfügbar unter https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-04/f-gases_impact_assessment_en.pdf, zuletzt geprüft am 08.06.2023.

EEA - European Environment Agency (2023): EU Emissions Trading System (ETS) data viewer. European Environment Agency (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1>, zuletzt aktualisiert am 28.05.2023, zuletzt geprüft am 08.06.2023.

EEG (2021): Deutscher Bundestag. Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2021), EEG, Fassung vom Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 16.07.2021 (BGBl. I S. 3026) geändert worden ist.

Eichhammer, W.; Herbst, A.; Pfaff, M.; Fleiter, T.; Pfluger, B. (2018): Impacts on the environment and the economy of technological innovations for the Innovation Fund (IF), In the fields of: energy-intensive industries, renewables, carbon capture and storage / use (CCS/CCU), energy storage. Fraunhofer ISI; Ecofys; GreenStream;

adelphi. European Commission (Hg.). Brussels. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/669226c7-b6ff-11e8-99ee-01aa75ed71a1/language-en>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Emele, L.; Harthan, R. O.; Moosmann, L. (2019): Projektionsbericht 2019 für Deutschland – Zusammenfassung in der Struktur des Klimaschutzplans, Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politiksznarien IX“)“ (Climate Change, 33/2019). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2019-fuer-deutschland>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

ENTSO-E (Hg.) (2022): TYNDP 2022 Scenario Report, Version April 2022. Brussels. Online verfügbar unter <https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/download/>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Europäische 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.

Europäische Kommission (2022): Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über fluoridierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (COM/2022/150 final). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0150#>, zuletzt geprüft am 05.01.2023.

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2023): VERORDNUNG (EU) 2023/857 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/842 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1999. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0857&qid=1686735747521>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Wern, B.; Pertagnol, J.; Baur, F.; Hünecke, K.; Dehoust, G.; Bulach, W.; Wiegmann, K. (2019): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor) (Texte, 115/2019). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bioreest-verfuegbarkeit-nutzungsoptionen-biogener>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Fleiter, T.; Fehrenbach, D.; Worrell, E.; Eichhammer, W. (2012): Energy efficiency in the German pulp and paper industry - A model-based assessment of saving potentials. In: *Energy* 40 (1), S. 84–99. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.025.

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.; Rehfeldt, M.; Hirzel, S.; Neusel, L.; Schwotzer, C. (2022): Vorstellung der Ergebnisse zur Studie für das Umweltbundesamt "Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen Stands der Technik und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen", Laufendes ReFoPlan-Projekt 3718410030 (Arbeitstand Juli 2022). Im Auftrag des Umweltbundesamts. Unter Mitarbeit von Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Hirzel, S.; Neusel, L. und Schwotzer, C. Fraunhofer ISI; RWTH Aachen - Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/363062502_Vorstellung_der_Ergebnisse_zur_Studie_fur_das_Umweltbundesamt_Umbau_des_industriellen_Anlagenparks_im_Rahmen_der_Energiewende_Ermittlung_des_aktuellen_SdT_und_desweiteren_Handlungsbedarfs_zum_Einsatz, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

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.

Gattinger, A.; Muller, A.; Haeni, M.; Skinner, C.; Fliessbach, A.; Buchmann, N.; Mäder, P.; Stolze, M.; Smith, P.; El-Hage Scialabba, N.; Niggli, U. (2012): Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. In: *PNAS* 109 (44), S. 18226–18231. DOI: 10.1073/pnas.1209429.

Geres, R.; Kohn, A.; Lenz, S.; Ausfelder, F.; Bazzanella, A. M.; Möller, A. (2019): Roadmap Chemie 2050, Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. FutureCamp Climate und DecHEMA (Hg.). Online verfügbar unter <https://decHEMA.de/chemie2050-path-123211,124930.html>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Graichen, V.; Jörß, W.; Emele, L.; Nissen, C. (2021): Datenkonzepte im EU-Emissionshandel, Handbuch (Climate Change, 75/2021). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/uba-eu-ets-handbuch>, zuletzt geprüft am 06.07.2022.

Gschrey, B.; Behringer, D.; Kleinschmidt, J.; Jörß, W.; Liste, V.; Ludig, S.; Wissner, N.; Birchby, D.; Dubey, J.; Hekman, J. (2022): Impact Assessment Final Report, Support contract for an Evaluation and Impact Assessment for amending Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases. CLIMA.A2/ETU/2019/0016. Unter Mitarbeit von Kozakiewicz, J.; Colbourne, D. und Purzner, M. Öko-Recherche; Öko-Institut; Ricardo. Online verfügbar unter https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-06/f-gases_external_preparatory_study_en.pdf; https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-04/f-gases_external_preparatory_study_annexes_en.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Gschrey, B.; Schwarz, W. (2011): Projektionen zu den Emissionen von HFKW, FKW und SF₆ für Deutschland bis zum Jahr 2050 (Climate Change, 21/2011). Öko-Recherche. Umweltbundesamt (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4226.pdf>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Harthan, R. O.; Repenning, J.; Blanck, R.; Emele, L.; Götz, W. K.; Kasten, P.; Moosmann, L.; Deurer, J.; Steinbach, J.; Fleiter, T.; Rehfeldt, M. (2022): Klimaschutzbeitrag verschiedener CO₂-Preispfade in den BEHG-Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie (Climate Change, 19/2022). Öko-Institut; IREES; Fraunhofer ISI. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzbeitrag-verschiedener-co2-preispfade-in>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Haß, M.; Deblitz, C.; Freund, F.; Kreins, P.; Laquai, V.; Offermann, F.; Pelikan, J.; Sturm, V.; Wegmann, J.; Witte, T. d.; Wüstemann, F.; Zinnbauer, M. (2022): Thünen-Baseline 2022 - 2032: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. (Thünen Report, 100). Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hg.). Braunschweig. Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_100.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

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, Schlussbericht zum FP 96.0756/2002 des BMVBW. Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/164566/>, zuletzt geprüft am 14.08.2023.

Held, T.; Waltersbacher, M. (2015): Wohnungsmarktprognose 2030 (BBSR-Analysen KOMPAKT, 07/2015). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hg.). Bonn. Online verfügbar unter <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2015/AK072015.html>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Köhler, B.; Reise, J.; Köppen, S.; Bischoff, M.; Fehrenbach, H.; Pehnt, M.; Werle, M.; Mantau, U. (2022): Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie - Teilbericht zu den

Projekten BioSINK und BioWISE (Climate Change, 12/2022). Öko-Institut; ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Informationssysteme für Rohstoffe. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_12-2022_aktuelle_nutzung_und_foerderung_der_holzenergie.pdf, zuletzt geprüft am 29.03.2022.

Hermann, H.; Loreck, C.; Ritter, D.; Greiner, B.; Keimeyer, F.; Cook, V.; Bartelt, N.; Bittner, M.; Nailis, D.; Klinski, S. (2017): 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. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. 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 09.08.2023.

Hibsch, 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&focal=none>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Hirzel, S.; Antoni, O.; Heinrich, S.; Jessing, D.; Paar, A.; Pehnt, M.; Schlomann, B.; Voswinkel, F. (2019): Evaluierung und Weiterentwicklung des Energieeffizienzfonds, Projekt Nr. 63/15 im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Abschlussbericht - Langfassung. Unter Mitarbeit von Koziel, S.; Kreidelmeyer, S.; Piegsa, A.; Rohde, C.; Spillmann, T. et al. Fraunhofer ISI; Stiftung Umweltenergierecht; Prognos und ifeu (Hg.). Karlsruhe / Heidelberg / Basel / Würzburg. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/evaluierung-und-weiterentwicklung-des-energieeffizienz-fonds.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

IEEKN - Initiative für Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke (2020): Bundesregierung und Wirtschaftsverbände bauen Initiative für Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke aus. Initiative für Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.effizienznetzwerke.org/esgehtweiter/>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

ifeu (2023): TREMOD, Transport Emission Model. ifeu (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.ifeu.de/en/methods-tools/models/tremod/>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Illge, L.; Oertel, B.; Kenkmann, T.; Schumacher, K. (2020): Evaluation der Maßnahme "Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen", Zusammenfassung. IZT; Öko-Institut. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Hg.). Berlin.

IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan. Online verfügbar unter <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, zuletzt geprüft am 09.06.2021.

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, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Kätterer, T.; Bolinder, M. A.; Thorvaldsson, G.; Kirchmann, H. (2013): Influence of ley-arable systems on soil carbon stocks in Northern Europe and Eastern Canada. In: *Grassland Science in Europe* (18), S. 47–56.

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.

Mai, M.; Gruber, E.; Ashley-Belbin, N.; Schulz, A.; Barckhausen, A.; Will, G.; Thie, J.-E. (2017): Analyse der Entwicklung des Marktes und Zielerreichungskontrolle für gesetzlich verpflichtende Energieaudits, Schlussbericht

an das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). IREES und adelphi consult (Hg.). Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://www.adelphi.de/de/projekt/evaluierung-der-auditpflicht-nach-dem-energiesparleistungsgesetz>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Mathivanan, G. P.; Eysholdt, M.; Zinnbauer, M.; Rösemann, C.; Fuß, R. (2021): New N₂O emission factors for crop residues and fertiliser inputs to agricultural soils in Germany. In: *Agric Ecosyst Environ* (322). DOI: 10.1016/j.agee.2021.107640.

Mendelevitch, R.; Repenning, J.; Matthes, F. C. (2022): Rahmendaten für den Projektionsbericht 2023. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/rahmendaten-fuer-den-projektionsbericht-2023>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2011): Durchführung der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV) - Niedersachsen, Fassung vom 03.08.2011. Online verfügbar unter <https://www.umwelt-online.de/regelwerk/cgi-bin/suchausgabe.cgi?pfad=/luft/laender/nds/1bvdv.htm&such=RdErl>.

Ortner, S.; Pehnt, M.; Blömer, S.; Auberger, A.; Steinbach, J.; Deurer, J.; Popovski, E.; Lösch, O.; Langreder, N.; Thamling, N.; Sahnoun, M.; Rau, D. (2021): Analyse des wirtschaftlichen Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung: Beitrag zur Berichtspflicht EnEff-RL, Artikel 14 - Anhang VIII. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-08-05_cc_54-2021_effiziente_waerme-kaelteversorgung.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2022.

Perez-Fortes, M.; Schöneberger, J. C.; Boulamanti, A.; Tzimas, E. (2016): Methanol synthesis using captured CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental assessment. In: *Applied Energy* 161, S. 718–732. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.07.067.

Perez-Fortes, M.; Tzimas, E. (2016): Techno-economic and environmental evaluation of CO₂ utilisation for fuel production (JRC Science for Policy Report). European Commission (Hg.). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99380>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

PricewaterhouseCoopers (PWC) (Hg.) (2019): Evaluation der Energieberatung für Wohngebäude, Für das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Frankfurt. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/Shared-Docs/Downloads/DE/Energie/ebw_evaluierungsbericht_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Reaños, M. A. T.; Sommerfeld, K. (2018): Fuel for inequality, Distributional effects of environmental reforms on private transport. In: *Resource and Energy Economics* 51, S. 28–43. DOI: 10.1016/j.reseneeco.2017.10.007.

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.

Repenning, J.; Harthan, R. O.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelevitch, R. et al. (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland, Gemäß 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 sowie §10 (2) des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/projektionsbericht_2021_uba_website.pdf, zuletzt geprüft am 29.10.2021.

Repenning, J.; Harthan, R.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Göckeler, K.; Görz, W. K.; Hacker, F.; Hennenberg, K.; Jörß, W. et al. (2023): Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-

2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030, Teilbericht (Climate Change, 30/2023). Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzziele-2030-kis-2030-zur>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Rösemann, C.; Vos, C.; Haenel, H.-D.; Dämmgen, U.; Döring, U.; Wulf, S.; Eurich-Menden, B.; Freibauer, A.; Döhler, H.; Steuer, B.; Osterburg, B.; Fuß, R. (2023): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2021, Report on methods and data (RMD) Submission 2023. Online verfügbar unter <https://git-dmz.thuenen.de/vos/EmissionsAgriculture2023/-/wikis/home>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Rüter, S. (2017): Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz – Das Modell WoodCarbonMonitor. Dissertation. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Technische Universität München. München, 2017. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn058534.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Schade, W.; Stich, M.; Kleemann, M.; Berthold, D.; Scherf, C.; Krail, M.; Brauer, C.; Krauß, K.; Anstett, P.; Walther, C.; Waßmuth, V. (2022): Gestaltung des MKS Referenzszenarios für die Periode 2021 bis 2035 (REF-2020), Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://m-five.de/wp-content/uploads/M_Five_ISI_PTV_MKS_Referenzszenario_REF_2020_220308_rev221017.pdf, zuletzt geprüft am 10.06.2023.

Schlomann, B.; Voswinkel, F.; Hirzel, S.; Paar, A.; Jessing, D.; Heinrich, S.; Antoni, O.; Kahles, M. (2020): Methodikleitfaden für Evaluationen von Energieeffizienzmaßnahmen des BMWi (Projekt Nr. 63/15 – Aufstockung), Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer ISI; ifeu; Prognos und Stiftung Umweltenergierecht (Hg.). Karlsruhe / Heidelberg / Basel / Würzburg. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/methodik-leitfaden-fuer-evaluationen-von-energieeffizienzmassnahmen.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

SINTEF Energy Research (2018): CEMCAP study. SINTEF Energy Research (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Spinoni, J.; Vogt, J. V.; Barbosa, P.; Dosio, A.; McCormick, N.; Bigano, A.; Füssler, 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 (2017): Entwicklung der Privathaushalte bis 2035, Ergebnisse der Haushaltsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft_mods_00083604, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Statistisches Bundesamt (2022a): Lebensmittelabfälle in Deutschland im Berichtsjahr 2020. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/Lebensmittelabfaelle.html>, zuletzt geprüft am 12.01.2023.

Statistisches Bundesamt (2022b): Lebensmittelabfälle in Deutschland im Berichtsjahr 2020. Statistisches Bundesamt (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/Lebensmittelabfaelle.html>, zuletzt geprüft am 03.08.2022.

Statistisches Bundesamt (Hg.) (2019): Wohnen in Deutschland, Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

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>.

UBA - Umweltbundesamt (2022a): Datenausspielung aus der UBA-Datenbank "Zentrales System Emissionen" (ZSE). E-Mail mit Öko-Institut, 02.02.2022.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2022b): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2020 (Climate Change, 24/2022). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-05-31_climate-change_24-2022_nir-2022_de.pdf, zuletzt geprüft am 01.11.2022.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2023a): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2021, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2023. Online verfügbar unter https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envy8fz9q/DE_EU-NIR_2023_DE.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2023.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2023b): Treibhausgasemissionen in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>, zuletzt geprüft am 22.05.2023.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change (Hg.) (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 11.08.2023.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change (Hg.) (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 11.08.2023.

VDN; VIK; ZVEI; Solvay (2005): Selbstverpflichtung der SF6-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln > 1kV zur elektrischen Energieübertragung und -verteilung in der Bundesrepublik Deutschland zu SF6 als Isolier- und Löschgas, VDN; VIK; ZVEI; Solvay. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/sv_sf6_bf.pdf, zuletzt geprüft am 05.01.2023.

Vogl, V.; Ahman, M.; Nilsson, L. J. (2018): Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. In: *Journal of Cleaner Production* 203, S. 736–745. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.279.

Vos, C.; Rösemann, C.; Haenel, H.-D.; Dämmgen, U.; Döring, U.; Wulf, S.; Eurich-Menden, B.; Freibauer, A.; Döhler, H.; Schreiner, C.; Osterburg, B.; Fuß, R. (2022): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2020: Report on methods and data (RMD) Submission 2022. (Thünen Report 91). Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digibib_extern/dn064675.pdf, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Weyland, M.; Herda, I. (2023): Factsheet Energieeffizienz-Ziele, Eine vergleichende Einordnung von Energieeffizienz-Zielen des nationalen und europäischen Rechtsrahmens sowie aus Klimaschutzszenarien. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/factsheet-energieeffizienz-ziele>, zuletzt geprüft am 28.06.2023.

Zech, D.; Ullrich, S.; Wülbeck, H.-F.; Stuible, A.; Wapler, J.; Valenbreder, P.; Meyer, R.; Miara, M.; Hartmann, H.; Reisinger, K.; Werner, F.; Orozaliyev, J.; Vajen, K. et al. (2019): Evaluation des Marktanreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2015 bis 2018, Evaluation des Förderjahres 2018. Ausarbeitung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fichtner; Fraunhofer ISE; TFZ; Qoncept Energy; DBI-Gas- und Umwelttechnik; IE Leipzig. Fichtner (Hg.).

Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/evaluierung-marktanreizprogramm-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

A Anhang

A.1 Datenanhang mit Kernindikatoren

Detaillierte jährliche Daten sowie Kernindikatoren können [hier](#) heruntergeladen werden.

A.2 Rahmenannahmen

Die Rahmendaten können Mendelevitch et al. (2022) ([Link](#)) entnommen werden.

A.3 Instrumente

Die Beschreibung und Parametrisierung der in den Szenarien berücksichtigten Instrumente kann dem mit den Ressorts abgestimmten [Instrumentenpapier](#) entnommen werden.

Die Instrumententypen können wie in Tabelle 109 dargestellt klassifiziert werden.

Tabelle 109: Klassifikation der Instrumententypen

Instrumententyp		Erläuterung, Beispiele
Ökonomische Instrumente	E	Preis- und mengenpolitische Steuerungsmechanismen: Umweltabgaben-/Steuern, Handelbare Zertifikate, Handelbare Quoten, Tarifpolitik, Marktreform/-öffnung
Fiskalische Instrumente	F	Subventionen und öffentliche Infrastrukturausgaben: Zuschüsse, verbilligte Kredite, Steuererleichterungen, Staatliche Investitionen
Verpflichtungserklärungen	V	Freiwillige und verhandelte Selbstverpflichtungen: Vereinbarungen von Wirtschaftsbereichen, Branchen oder Unternehmen
Regulierung	R	Ordnungsrechtliche Vorschriften: Ver- und Gebote, technische Standards, Produktkennzeichnung
Information	I	Allgemeine Information und Beratung: Broschüren, Informationszentralen, Agenturen, Beratungsstellen
Bildung	ET	Regelung und Förderung der Bildung: Aus-, Fort- und Weiterbildung
Forschung und Entwicklung	D	Förderung der Forschung, Entwicklung und Demonstration: Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung, Projektförderung

Instrumententyp		Erläuterung, Beispiele
Andere	O	Andere Instrumente: Appelle, indikative Zielvorgaben/Planung, Hemmnisabbau

Quelle: (UNFCCC 2000)

A.4 Methodik

A.4.1 Energiewirtschaft

Die Modellierung der projizierten Strom- und Wärmeerzeugung wird mit Hilfe des Strommarktmodells PowerFlex des Öko-Instituts mit Unterstützung des Integrationsmodells ENUSEM⁶⁷ vorgenommen. Ausgangsjahr der Modellierung ist 2019.

PowerFlex

Das am Öko-Institut entwickelte Strommarktmodell PowerFlex ist ein Fundamentalmodell, welches thermische Kraftwerk, die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerke und flexible Stromverbraucher kostenminimal einsetzt, um die Strom- und Fernwärmenachfrage zu decken.⁶⁸

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 Dargebots erneuerbarer Energien sowie techno-ökonomische Parameter von Strom- und Wärme-Erzeugungstechnologien 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.

⁶⁷ Für eine Beschreibung von ENUSEM siehe Anhang A.4.8.

⁶⁸ Für eine detaillierte Modellbeschreibung, siehe z.B. Hermann et al. (2017).

Die jährliche Stromnachfrage wird exogen vorgegeben und ergibt sich aus den Stromnachfragen der anderen Sektoren. 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.

Bezüglich des internationalen Stromaustauschs stellt jedes Land einen Knoten dar und ist über Kuppelleitungen 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.

Industriekraftwerke, KWK und Fernwärme

Strom und Fernwärme werden sowohl von öffentlichen Kraftwerken als auch von Kraftwerken des Industriesektors erzeugt. Diese Anlagen können sich bei der Strom- und Wärmeerzeugung zumindest teilweise substituieren. Da es für die Modellierung nicht sinnvoll ist, diese voneinander zu trennen, wird der gesamte Bereich der Kraftwerke gemeinsam modelliert. Die Treibhausgasemissionen werden in einem nachgelagerten Schritt auf die einzelnen Inventarquellgruppen⁶⁹ aufgeteilt (siehe hierzu Abschnitt 3.8 und Anhang A.4.8).

Energiewirtschaft außerhalb von PowerFlex

PowerFlex deckt nicht alle Teile der Energiewirtschaft ab. Diese werden durch das Integrationsmodell ENUSEM⁷⁰ wie folgt abgedeckt:

- Konventionelle, also mit fossilen und biogenen Brennstoffen betriebene Heizwerke zur ungekoppelten Erzeugung von Fernwärme.

⁶⁹ Kraftwerke der öffentlichen Versorgung, Industriekraftwerke, Raffineriekraftwerke und Kraftwerke des übrigen Umwandlungsbereichs.

⁷⁰ Für eine Beschreibung von ENUSEM siehe Anhang A.4.8.

- ▶ In Raffinerien die Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen jenseits der Raffineriekraftwerke. Dies umfasst unter anderem auch die Dampfreformierungsanlagen zur Erzeugung des in Raffinerien benötigten Wasserstoffs.
- ▶ Übrige Anlagen des Umwandlungssektors (Brikettfabriken, Kokereien, andere Umwandlungs- und Veredelungsanlagen, Fermenterheizungen von Biogasanlagen) mit Ausnahme von Stromerzeugungsanlagen.
- ▶ Verdichterstationen im Erdgastransportnetz.

Diese Teile werden mit der im Wesentlichen gleichen Methode wie in Repenning et al. (2021) berechnet, die aber teilweise im Detail verfeinert wurde:

Die Entwicklung der Verteilung der Brennstoffeinsätze (außer Erdgas) der Heizwerke orientiert sich an den Entwicklungen der Brennstoffeinsätze zur Wärmeerzeugung in öffentlichen Kraftwerken. In einzelnen Fällen werden Brennstoffeinsätze fortgeschrieben. Für erneuerbare Energieträgern und Technologien fließen die Ergebnisse aus der Wärmemodellierung von PowerFlex ein. Der Einsatz von Erdgas in Heizwerken wurde als Residualgröße modelliert, also als Größe, die die verbleibende Wärmenachfrage nach Abzug aller anderen Energieträger abdeckt.

Anders als die PowerFlex-Modellierung erfolgt die Modellierung nicht stundenscharf, sondern nur als für Jahreswerte. Bei der Integration der Sektorergebnisse bildet sie zusammen mit den in PowerFlex enthaltenen Anlagen 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. Beispiele hierfür sind:

- ▶ Die Nachfrage nach Mineralölprodukten und flüssigen Biokraftstoffen determiniert die Aktivität der Mineralölraffinerien.
- ▶ Die Aktivität der Stahlproduktion determiniert die Nachfrage nach Koks und diese wiederum die Aktivität der Kokereien.

Energieverbräuche, die nicht konkret individuellen Treibern zugeordnet werden können, werden als konstant fortgeschrieben. Bei den Erdgasverdichterstationen wird zusätzlich der Ausbau des Erdgastransportnetzes berücksichtigt.

A.4.2 Industrie

Für die Erstellung von Szenarien zur Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energiebedarf im Sektor Industrie, GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) sowie Haushaltsgeräte wird das Energienachfragemodell FORECAST⁷¹ eingesetzt. Diese Plattform wird auch zur Berechnung der Energienachfrage in den Sektoren Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) sowie private Haushalte verwendet. Die Bewertung von Einzelmaßnahmen erfolgt je nach Datenlage und Instrumentenausgestaltung ebenfalls mit dem Modell FORECAST oder über eine Bottom-up-Einzelbewertung anhand von individuellen Kennwerten.

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

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

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 und Produktionsverfahren modelliert. Die Diffusionsgeschwindigkeit hängt direkt mit der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zusammen.

Im Folgenden wird auf das Sektormodul FORECAST-Industry gesondert eingegangen.

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.

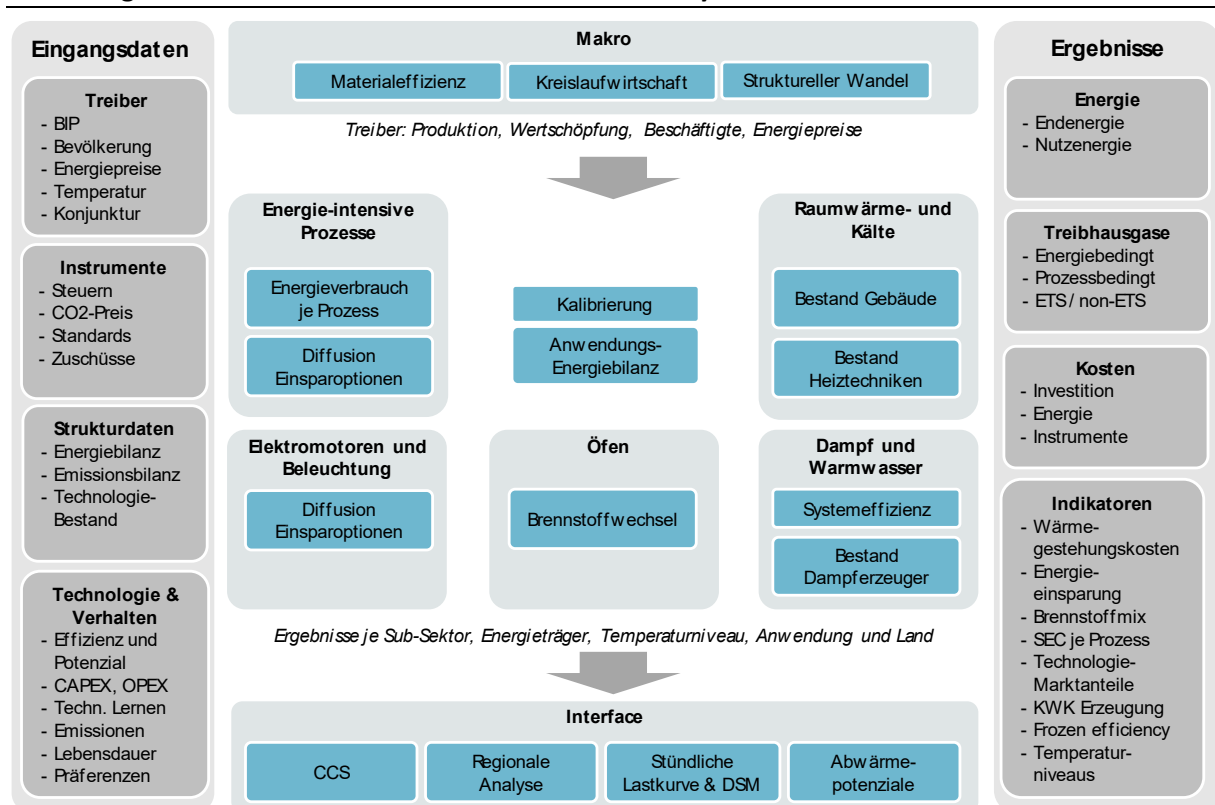
Eine große Herausforderung bei der Bottom-up-Modellierung der Industrie ist die große Vielfalt an unterschiedlichen Prozessen und Unternehmen, welche technologisch im Modell abgebildet werden müssen. Entsprechend orientiert sich die Struktur des Modells zum einen an der Struktur des Industriesektors, 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 68 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; 2012) zusammengefasst.
- ▶ *Elektromotorsysteme und Beleuchtung* finden in sämtlichen Branchen und verschiedenen Prozessen Anwendung: Elektromotoren werden zum Beispiel sowohl in der Papierherstel-

lung 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 68: Überblick des Modells FORECAST-Industry



Quelle: Darstellung Fraunhofer ISI

Die Branchenstruktur des Industriemodells (Tabelle 110) 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 110: Branchenstruktur von FORECAST-Industry (angelehnt an AGEb)

Wirtschaftszweig	Nr. WZ08	Beschreibung WZ08
Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger. Bergbau	08	Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau
Ernährung und Tabak	10	Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln
	11	Getränkeherstellung
	12	Tabakverarbeitung
Papiergewerbe	17	Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus
Grundstoffchemie	20.1	Herstellung von chemischen Grundstoffen, Düngemitteln und Stickstoffverbindungen, Kunststoffen in Primärformen und synthetischem Kautschuk in Primärformen
Sonstige chemische Industrie	20 ohne 20.1	Herstellung von chemischen Erzeugnissen
	21	Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen
Gummi- und Kunststoffwaren	22	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren
Glas u. Keramik	23.1	Herstellung von Glas und Glaswaren
	23.2	Herstellung von feuerfesten keramischen Werkstoffen und Waren
	23.31	Herstellung von keramischen Wand- und Bodenfliesen und -platten
	23.4	Herstellung von sonstigen Porzellan- und keramischen Erzeugnissen
Verarbeitung von Steinen und Erden	23 ohne 23.1, 23.2, 23.31 und 23.4	Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden
Metallerzeugung	24.1	Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen
NE-Metalle, Gießereien (Eisen-, Leicht- und Buntmetallgießereien)	24.4	Erzeugung und erste Bearbeitung von NE-Metallen
	24.5	Gießereien
Metallbearbeitung	24.2	Herstellung von Stahlrohren, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücken aus Stahl
	24.3	Sonstige erste Bearbeitung von Eisen und Stahl
	25	Herstellung von Metallerzeugnissen
Maschinenbau	28 ohne 28.23	Maschinenbau (ohne Herstellung von Büromaschinen (ohne Datenverarbeitungsgeräte und periphere Geräte)
Fahrzeugbau	29	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen

Wirtschaftszweig	Nr. WZ08	Beschreibung WZ08
	30	Sonstiger Fahrzeugbau
Sonstige Wirtschaftszweige		Alle übrigen Nummern außer 05.1, 05.2, 06, 09, 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 mit allen zusammenwirkenden Instrumenten bis zum Jahr 2050 zu berechnen. Somit wird sichergestellt, dass die resultierende Technologieentwicklung einem konsistenten Rahmen folgt, selbst wenn viele Maßnahmen über Einzelbewertungen quantifiziert werden.

A.4.3 Gebäude

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, Baualtersklassen 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).

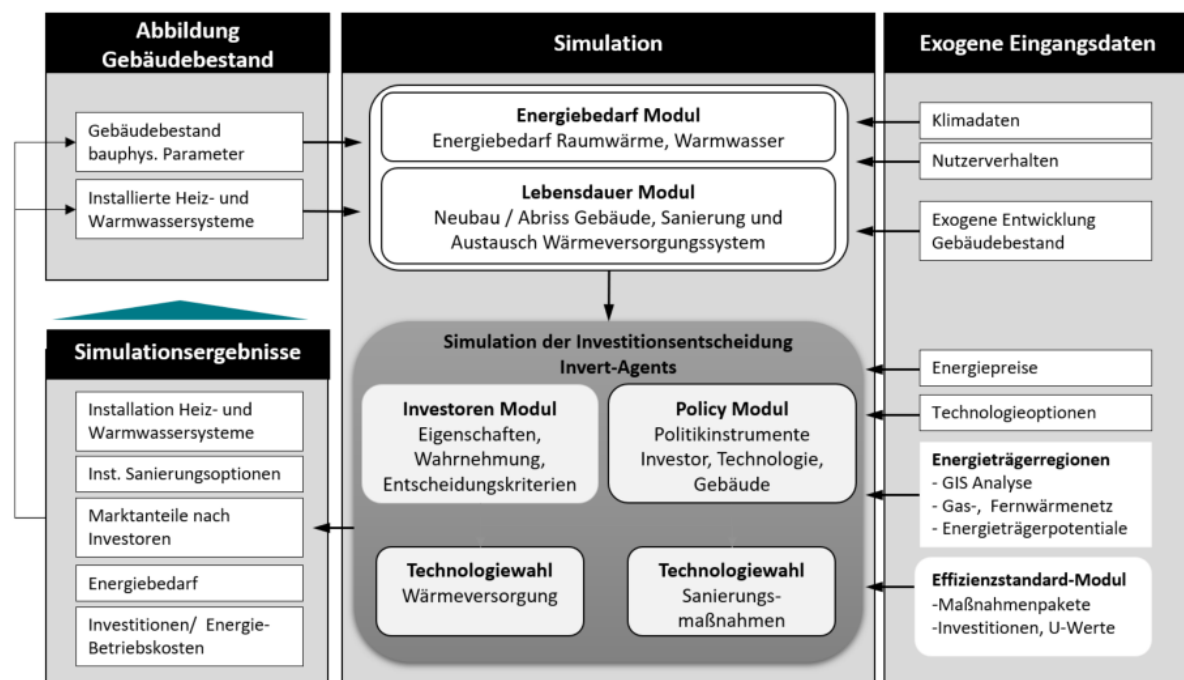
Mit INVERT/ee-Lab ist es möglich, die Auswirkung unterschiedlicher Politikinstrumente und Ausgestaltungsvarianten auf den Ausbau der Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren. Für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes erneuerbarer Energien im Gebäudebereich werden u.a.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

- ▶ Berücksichtigung von investorenspezifischen Hemmnissen und Kalkülen bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen (Steinbach 2015)
- ▶ 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.

- ▶ 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.
- ▶ 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 69: 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 (Diefenbach et al. 2018), für das Marktanreizprogramm (Zech et al. 2019), die Energieberatung für Wohngebäude (PricewaterhouseCoopers (PWC) 2019) sowie für das Heizungsalanlagenlabel (Illge et al. 2020). Sofern die betrachteten Instrumente bisher nicht evaluiert wurden, werden die Instrumentenwirkungen durch eigene Abschätzungen auf Basis geeigneter Indikatoren ermittelt.

A.4.4 Verkehr

Die Modellierung erfolgt mit dem Modell TEMPS des Öko-Instituts. Das Modell wurde bereits in vorherigen Projektionsberichten der Bundesregierung eingesetzt und ermöglicht eine Berechnung der zukünftigen Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors in Abhängigkeit von politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen.

Kernbestandteil der Modellierungen mit TEMPS ist das Neuzulassungsmodell, welches unter gegebenen Rahmenbedingungen – wie CO₂-Zielwerten für Neufahrzeuge, Anschaffungspreisen von Fahrzeugen, Energiepreisen, CO₂-Preis usw. – die Zusammensetzung und Effizienzentwicklung der zukünftigen Neuzulassungen modelliert. Die Berechnung erfolgt basierend auf einem Antriebswahlmodell, welches u.a. wesentlich auf die Nutzerkosten (TCO) 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, basierend auf TREMOD⁷² der Fahrzeuge abgeleitet. Die gesamten Treibhausgasemissionen des Bestands ergeben sich aus der zu Grunde gelegten Fahrleistung, dem Fahrzeugbestand, der Energieeffizienz je Antrieb und dem Kraftstoffmix.

Ausgangspunkt für die Annahmen zur Entwicklung der Verkehrsnachfrage ist die Referenzentwicklung REF-2020 der MKS (Schade et al. 2022). Diese enthält Maßnahmen bis Ende August 2020. Für die Entwicklung der Referenzverkehrsnachfrage in MMS und MWMS werden Rahmen-
daten aktualisiert (BIP-Entwicklung, BEHG-Preispfad) sowie eine Verstetigung des Trends zu mehr Homeoffice im Anschluss an die Corona-Pandemie ergänzt. Für das Basisjahr 2022 wird das Fahrleistungsgerüst aus TREMOD zu Grunde gelegt sowie aktuelle Daten zur Verkehrsnachfrage gemäß Verkehr in Zahlen⁷³. Die Wirkung zusätzlicher Maßnahmen auf die Verkehrsnachfrage wird 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 Kreuzpreiselastizität für den öffentlichen Verkehr von 0,13 angegeben. Auch die Studie Reaños und Sommerfeld (2018) ermittelt für den Individualverkehr eine Elastizität von durchschnittlich -0,3. Langfristige Preisreaktionen wie die Anpassung der Antriebswahl werden in TEMPS über die TCO-Rechnung abgedeckt. 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.

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 2022 vorgenommen.

⁷² <https://www.ifeu.de/en/methods-tools/models/tremod/>

⁷³ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehr-in-zahlen.html>

A.4.5 Landwirtschaft

Emissionen aus der Tierhaltung und der Düngung

Zur Abbildung der Treibhausgasemissionen wird das landwirtschaftliche Emissionsmodell py-GAS-EM eingesetzt. Die für die Submission 2022 verwendete Methodik ist in Vos et al. (2022) ausführlich beschrieben. Die aktuelle, für die Submission 2023 verwendete Methodik ist in Rösemann et al. (2023) dokumentiert. Für die Berechnung der Projektionen werden zunächst Annahmen über die Entwicklung der Produktionsumfänge, des Vorleistungseinsatzes und der Erträge festgelegt. Dabei wird auf die Ergebnisse der Thünen-Baseline aufgebaut, die alle zwei Jahre erstellt wird (vgl. Haß et al. (2022)), darüber hinaus auch auf andere Quellen z. B. der Europäischen Kommission (EC 2022b). Annahmen über die Entwicklungen im Landwirtschaftssektor und über die Art und Umfang von Maßnahmen wird anhand veränderter Eingangsparameter an das Modell py-GAS-EM übergeben. Die Maßnahmen werden schrittweise nacheinander im Modell implementiert, so dass sich am Ende die kumulierte Wirkung eines Maßnahmenbündels ergibt. Dadurch können Wechselwirkungen und Überlappungen von Maßnahmen berücksichtigt und Doppelzählungen von Wirkungen vermieden werden. Die ausgewiesene Einzelwirkung von Maßnahmen hängt dabei von der Reihenfolge der Implementierung im Modell und vom Ausmaß der Wechselwirkungen und Überlappungen ab.

Energiebedingte Emissionen

Nach der Sektorabgrenzung des Bundes-Klimaschutzgesetzes werden die energiebedingten Emissionen der Landwirtschaft, die unter der CRF-Kategorie 1.A.4.c berichtet werden, dem Landwirtschaftssektor zugeordnet. In der internationalen Treibhausgasberichterstattung werden diese Emissionen dem GHD-Sektor zugeordnet. Um beiden Berichtsformaten gerecht werden zu können, werden die energiebedingten Emissionen aus der Landwirtschaft aus dem GHD-Energieverbrauch herausgerechnet.

Der Energieverbrauch der Landwirtschaft wird durch ein Excel-basiertes Modell bestimmt, das die Landwirtschaft entsprechend der CRF-Klassifizierung in drei Subsektoren aufteilt⁷⁴:

- ▶ 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 die Projektion des Verbrauchs fließen spezifische Annahmen zum Energieverbrauch und zum Einsatz der Energieträger innerhalb der Landwirtschaft in das Modell ein. Diese können beispielsweise aus dem Fördermitteleinsatz und weiteren verfügbaren Daten berechnet werden. Die Input-Parameter für den stationären Bereich können differenziert werden in die einzelnen Bereiche Gewächshäuser, Trocknung, Tierhaltung und sonstige stationäre Anwendungen. Für die mobile Nutzung erfolgt eine Differenzierung zwischen Anwendungen in der Innenwirtschaft und in der Außenwirtschaft im Bereich der schweren Landmaschinen. Den einzelnen Energieverbräuchen sind Brennstoffe zugeordnet. Dabei unterscheidet das Modell für jeden der drei Subsektoren zwischen verschiedenen fossilen, biogenen und strombasierten Brennstoffen sowie weiteren Energieträgern (z.B. Strom und Solarthermie). Szenarioentwicklungen können dabei einzeln für jeden Brennstoff abgebildet werden. Die Entwicklung der einzelnen Brennstoffeinsätze im Modell wird ebenfalls v.a. durch Annahmen von außen gesteuert. Dies bilden die vorab

⁷⁴ Der Energieverbrauch aus der Stromnachfrage wird im Energiesektor (Stromerzeugung) erfasst.

exogen ermittelten Maßnahmenwirkungen ab. Die CO₂ -, CH₄ - und N₂O -Emissionen werden über die aktuellen Emissionsfaktoren der Brennstoffe berechnet.

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. Zudem wird der Großteil der Wärmebereitstellung aus den Biogas-Anlagen unter CRF 1.A.4.c.i berichtet, da diese auf den landwirtschaftlichen Betrieben stehen. Ca. 40 % des derzeitigen stationären Energieverbrauchs stammen aus der Wärmebereitstellung von Biogasanlagen. Es bestehen Unsicherheiten, inwieweit diesem Wärmeangebot tatsächlich eine notwendige Nachfrage auf den landwirtschaftlichen Betrieben zuzuordnen ist und wie groß das Einsparpotenzial dieser Nutzungen ist.

A.4.6 Abfallwirtschaft

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 PtJ⁷⁵ 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 des Statistischen Bundesamts 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 Lebensmittelabfäl-

⁷⁵ Aufstellung des Projektträgers Jülich zu den im Rahmen der BMWK-Initiative „Klimaschutzprojekte im kommunalen Umfeld – Kommunalrichtlinie. Klimaschutz bei Siedlungsabfalldeponien“ bewilligten Deponiebelüftungsprojekten in den Jahren 2013 bis 2023 (Stand 30.06.2022).

len. 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 Rahmendaten pro Person eingesetzt und die Emissionsfaktoren aus dem aktuellen Inventarbericht entsprechend der Annahmen zur Entwicklung der Proteinaufnahme und dem Anschlussgrad an die öffentliche Kanalisation fortgeschrieben.

A.4.7 LULUCF

Die Projektionen wurden mit dem LULUCF-Inventarmodell (LULUCFmod) des Thünen-Instituts in seiner aktuellen Version berechnet. Dieses ist im nationalen Inventarbericht 2023 (UBA 2023a) ausführlich beschrieben. Für die Projektionen wurden die Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren der Submission 2022 (UBA 2022b) als Modelleingabedaten verwendet.

Das Inventarmodell bildet Landnutzung, Landnutzungsänderungen, Kohlenstoffspeicher und deren Änderungen sowie Emissionen räumlich explizit auf einem Punktraster von 100 m x 100 m ab, d.h. jeder Punkt repräsentiert 1 ha Fläche. Landnutzungsdaten gehen für das Jahr 1990 und ab 2000 alle 5 Jahre sowie für das letzte Jahr der Zeitreihe ein. Zwischen diesen Jahren werden Landnutzungsänderungen gleichmäßig verteilt. Das Modell rechnet separat für jedes Bundesland. Für die Projektion wurden Landnutzung und Landnutzungsänderungen wie folgt projiziert:

Ableitung von Übergangswahrscheinlichkeiten

Übergangswahrscheinlichkeiten wurden aus der Landnutzung (annuell, d.h. ohne Übergangszeiten) in den Jahren 2015 und 2020 getrennt für Mineralböden und für organische Böden und getrennt für jedes Bundesland abgeleitet. Sie wurden berechnet als

$P_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{n_i}$, mit $P_{i,j}$ der gesuchten Wahrscheinlichkeit, $n_{i,j}$ der Anzahl von Punkten mit Landnutzungskategorie i im Jahr 2015 und Landnutzungskategorie j im Jahr 2020, n_i der Anzahl von Punkten mit Landnutzungskategorie i im Jahr 2015. Das Ergebnis ist eine Matrix mit Übergangswahrscheinlichkeiten. Es wurde angenommen, dass die Übergangswahrscheinlichkeiten ab 2015 zeitlich konstant sind.

Projektion der Landnutzung

Mit Hilfe der Übergangswahrscheinlichkeiten wurde mittels Zufallszahlengenerator den Punkten ausgehend von ihrer Landnutzung im Jahr 2020 die Landnutzung im Jahr 2025 zugewiesen. Dieser Schritt wurde dann für die folgenden 5-Jahres-Zeiträume wiederholt, bis das Jahr 2050 erreicht wurde. Die erzeugten zukünftigen Landnutzungen wurden dann als Modellinput verwendet, d.h. Landnutzungsänderungen wurden zufällig und gleichmäßig für die Einzeljahre der Fünfjahreszeiträume auf die Punkte verteilt.

Das gewählte Verfahren stellt die Konsistenz der Landnutzung sicher und macht die Fläche von Landnutzungsänderungen abhängig von der Fläche der Ausgangskategorien. So sinkt beispielsweise die Fläche der Landnutzungsänderungen von Ackerland zu Siedlung im Laufe der Zeit, weil die Fläche des Ackerlands netto abnimmt.

Die Emissionsfaktoren wurden konstant in der Zeit fortgeschrieben, mit Ausnahme der Waldbiomasse.

Die Emissionsfaktoren für die Waldbiomasse wurden mit dem bereits bei der Erstellung des Forest Reference Levels (FRL) nach EU-VO 2018/841 verwendeten Matrixmodell hergeleitet. Input-Daten sind die Zustände und Veränderungen der Periode 2012-2017 aus der BWI-Datenbank. Grundlage für die Berechnung bilden anders als beim FRL die Daten nach Altersklassen und Hauptbaumarten, da sich damit die Maßnahmen in der Projektion abbilden lassen.

In der Vorbereitung werden die Daten um Datensätze bereinigt, für deren Ausgangskombinationen am Periodenanfang es keine entsprechende Zielkombination am Periodenende gibt. Die Flächen dieser Kombinationen würden im Laufe der Berechnung ins Leere laufen und eine Differenz in der Gesamtfläche ergeben. Mit 11.168 ha liegt der Anteil dieser Datensätze bei 0,1% der gesamten Waldfläche.

Im ersten Schritt der Berechnung werden Kalamitätsflächen verteilt, was zur Berücksichtigung der Dürrefolgen der Jahre 2018ff notwendig war. Dazu wird der Anteil der ausgefallenen Flächen an der Gesamtfläche ermittelt und der entsprechende Prozentsatz von jeder Fläche der betreffenden Baumarten abgezogen und einer neuen Altersklasse 0 zugeordnet. Anschließend wird eine Verteilungsmatrix anhand der Initialperiode erstellt, die festlegt, welche Baumarten-Altersklassen-Kombination am Periodenanfang zu welchen Anteilen und in welche Baumarten-Altersklassen-Kombination am Periodenende führt. Mittels dieser Verteilungsmatrix durchläuft eine Schleife die Anzahl der gewählten Perioden und modelliert die Flächenentwicklung, Emissionen der Biomasse sowie die Abgänge (z.B. Einschlag) für das gewählte Szenario. Je nach Szenario wird zu unterschiedlichen Zeitpunkten in die Entwicklung eingegriffen. Die entnommene Holzmenge wird an das Modell „WoodCarbonMonitor“ (Rüter 2017) übergeben und dient als Eingangsgröße für die Berechnung des HWP-Speichers gemäß des „Produktionsansatzes“. Dieses Verfahren ist identisch mit dem der Treibhausgasberichterstattung (UBA 2023a), nur die Herkunft der Einschlagszahlen ist unterschiedlich. Entsprechend werden mit den HWP-Zeitreihen ausschließlich potenzielle Effekte der Waldbewirtschaftung abgebildet. Je nach Szenario wird zu unterschiedlichen Zeitpunkten in die Entwicklung eingegriffen.

Zur Quantifizierung von Maßnahmenwirkungen (MMS, MWMS) wurden Szenarien gerechnet, bei denen die einzelnen Maßnahmen nacheinander in aufeinander aufbauende Szenarien integriert wurden. Dies erfolgte durch Modifikation von Emissionsfaktoren und/oder Modifikation der Übergangswahrscheinlichkeiten der Landnutzung.

Es werden 3 Szenarien (ohne Maßnahmen – OMS; mit Maßnahmen – MMS; mit weiteren Maßnahmen - MWMS) berechnet. Das MMS und MWMS werden im Hauptteil des Projektberichtes erläutert sind. Die technische Umsetzung sieht wie folgt aus:

OMS

Die Kalamitätsflächen werden bei den entsprechenden Altersklassen-Baumarten-Kombination (ab 60 Jahren in den Baumarten Buche, Fichte und Kiefer) abgezogen und einer Altersklasse 0 zugeordnet. Als jährliche Emission wird ein Fünftel des Vorrates in kg/ha in der Periode 2018-2022 angerechnet. Da alle anderen Werte auf Jahresbasis angegeben sind, wird der Vorrat durch die Anzahl der Jahre einer Periode geteilt. Die Flächen werden in den folgenden drei Perioden zu je einem Drittel der niedrigsten Altersklasse und einer Hauptbaumart entsprechend der untenstehenden Tabelle zugewiesen. Die Verteilung auf die Zielbaumarten erfolgt dabei zu gleichen Teilen. Für die Nutzung des Holzes der Kalamitätsflächen wird jährlich ein Fünftel des mittleren Vorrats in m³/ha der entsprechenden Hauptbaumart angenommen.

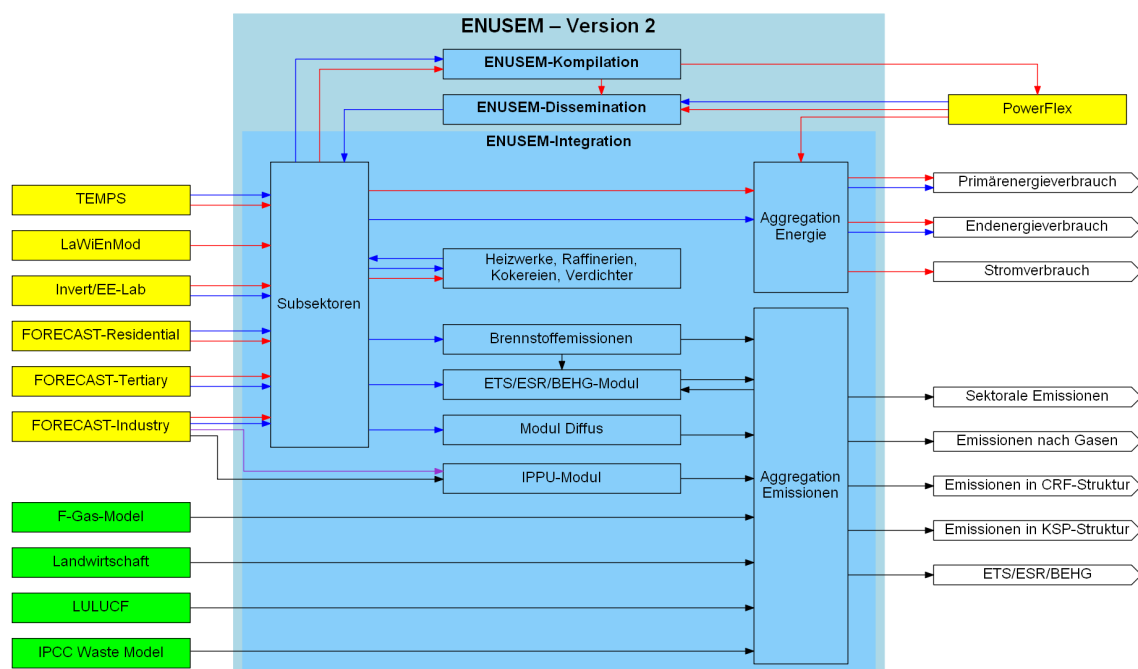
Ausgangsbaumart	Zielbaumart
Buche	Buche, andere Lb* hoher Lebensdauer, andere Lb niedriger Lebensdauer, Kiefer
Fichte	Fichte, Buche, andere Lb niedriger Lebensdauer
Kiefer	Kiefer, Eiche, andere Lb niedriger Lebensdauer

*) Lb = Laubbäume

A.4.8 Ergebnisintegration

Das Energie-Umwandlungs-Sektor-Modell (ENUSEM) ist ein Modell zur Kopplung spezifischer Sektormodelle. Es verbindet dabei die wesentlichen Energieflüsse der einzelnen Energiemodelle und berechnet die Emissionen, die aus der Energienutzung entstehen. Daneben stellt es auch Schnittstellen zu Emissionsberechnungen außerhalb des Energiesystems wie z. B. der Landwirtschaft bereit. Neben der reinen Sektorintegration schließt es Lücken, die nicht durch die einzelnen Sektormodelle abgebildet sind. Teil des Modells ist ein Berechnungsteil, der die Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele analysiert. Dieses Modell ist hierfür besonders geeignet, da es sämtliche relevante Energie- und Emissionsdaten aller Sektoren integriert.

Abbildung 70: Struktur von ENUSEM und Interaktion mit anderen Modellen



Legende: blaue Kästen: Integrationsmodell; gelbe Kästen: Sektormodelle Energie; grüne Kästen: Sonstige Sektormodelle; rote Pfeile: Brennstoffverbräuche; blaue Pfeile: sonstige Energieverbräuche; schwarze Pfeile: Emissionen; lila Pfeile: sonstige Aktivitätsdaten

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut

In Abbildung 70 sind die sektorspezifischen Modelle sowie die Elemente des Modells ENUSEM dargestellt. Die gelb dargestellten Energiemodelle liefern den Energiebedarf verschiedener Subsektoren, einerseits aufgeteilt nach Energieträgern und andererseits nach Subsektoren. Die Nachfrage nach Strom, netzgebundener Wärme und synthetischen Brennstoffen (z. B. Wasser-

stoff) wird aggregiert und an das Strommarktmodell PowerFlex weitergegeben. PowerFlex liefert als Resultat energieträgerscharfe Strom- und Wärmeerzeugung und die zugehörigen Brennstoffeinsätze. ENUSEM füllt zusätzlich die Teile des Energiesystems, die nicht bereits durch Sektormodelle abgedeckt sind (Heizwerke, Raffinerieunterfeuerungen, Kokereien, Erdgasverdichterstationen).

Insgesamt bildet ENUSEM das Energiesystem mit 22 Subsektoren ab. Für jeden Energieträger in jedem Subsektor werden die entstehenden Kohlendioxid-, Methan- und Lachgas-Emissionen berechnet. Dabei erfolgt auch eine Zuordnung, ob die Emissionen dem Europäischen Emissionshandel (EU-ETS), dem nationalen Emissionshandel bzw. der Europäischen Klimaschutzverordnung (ESR) unterliegen.

Neben den verbrennungsbedingten Emissionen berechnet ENUSEM auch die flüchtigen Emissionen aus der Brennstoffnutzung. Hier erfolgt eine quellgruppenspezifische Modellierung auf Basis des Mengengerüsts für die Energienachfrage und -bereitstellung sowie der für das Nationale Treibhausgasinventar verwendeten Methoden. Dabei werden alle Brennstoffe verbrennungsbedingten Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) berechnet. Da die Treibhauswirkung der Verbrennung biogener Brennstoffe bereits im LULUCF-Sektor bilanziert wird, werden verbrennungsbedingte biogene CO₂-Emissionen nicht in die Gesamtemissionen gezählt, sondern nur nachrichtlich berechnet. Ebenso erfolgt Bilanzierung der Emissionen aus der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen strombasierten Brennstoffen (wie z.B. PtL-Kraftstoffe) nach den Regeln der Treibhausgasinventare. Bei der Nutzung von importierten PtL-Kraftstoffen, die mit CO₂ aus der Luft hergestellt wurden, entsteht im Ausland eine CO₂-Senke. Ebenso erfolgt eine Berechnung der Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung in Anlehnung an die Methoden des Nationalen Treibhausgasinventars. Basis bilden hierfür die vom Industriemodell ermittelten Produktionsprojektionen für einzelne Produkte. Für die Eisen- und Stahlherstellung geht darüber hinaus die Entwicklung der hier relevanten Energieträger (z. B. Gichtgas) in die Berechnung ein. Die Emissionen fluorierter Treibhausgase hingegen werden im Modell ProFI außerhalb von ENUSEM berechnet und in das Datengerüst der gesamten prozessbedingten Emissionen integriert.

Die in Abbildung 70 grün dargestellten Modelle liefern anstelle des Energiebedarfs direkt die im entsprechenden Sektor entstehenden Emissionen.

Als finalen Schritt aggregiert ENUSEM die Modellergebnisse und stellt verschiedene Bilanzen in unterschiedlichen Strukturierungen zur Verfügung. Typische Ergebnisse sind:

- ▶ Primärenergieverbrauch nach Energieträgern,
- ▶ Endenergieverbrauch nach Energieträgern,
- ▶ Endenergieverbrauch nach Energiebilanz-Sektoren,
- ▶ Bruttostromverbrauch nach Energiebilanz-Sektoren,
- ▶ Treibhausgasemissionen nach Gasen,
- ▶ Treibhausgasemissionen nach Sektoren des Common Reporting Format (Struktur des Nationalen Inventarberichts),
- ▶ Treibhausgasemissionen nach Sektoren des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG),
- ▶ Treibhausgasemissionen unterteilt in EU-ETS und ESR

Die vorstehende Modellbeschreibung ist ein Auszug der vollständigen ENUSEM- Modellbeschreibung, die auf der Website des Öko-Instituts abrufbar ist.⁷⁶

⁷⁶ https://www.oeko.de/uploads/oeko/das_institut/institutsbereiche/energie-klimaschutz/OEKO-ENUSEM.pdf

B Anhang

B.1 Zusätzliche Informationen zur ESR

Tabelle 111 beinhaltet Detaildaten zum ESR-Teil von Abbildung 4. Für den Zeitraum 2021 bis 2030 werden die ESR-Emissionen beider Szenarien in jährlicher Auflösung angegeben. Ebenso sind die relativen Änderungen der ESR-Emissionen gegenüber dem in Europäische Kommission (2020) fixierten ESR-Emissionswert für das Jahr 2005 angegeben. Außerdem enthält die Tabelle einen ESR-Zielpfad und die jeweilige Lücke der ESR-Emissionen in den Szenarien. Der ESR-Zielpfad wurde entsprechend der europäischen Festlegung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2023) berechnet.

Datengrundlage waren für die Jahre 2021 und 2022 einerseits die im Jahr 2023 vom Umweltbundesamt veröffentlichten Emissionsdaten (UBA 2023a) und andererseits die EU-ETS-Daten der Europäischen Umweltagentur mit Datenstand vom 28. Mai 2023 (EEA 2023). Für das Jahr 2023 wurden die Modellierungsergebnisse des MMS genutzt. Diese Datengrundlage ist in Tabelle dokumentiert.

Die Abschätzungen zu den ESR-Zielen und folglich der Zielerreichung ist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, da der Zielpfad bis 2030 von den Emissionen der Jahre 2021-2023 abhängt. Dies hängt an den Unsicherheiten der vorläufigen Daten für 2022 und den lediglich auf der Projektion basierenden Daten für 2023.

Tabelle 111: ESR-Emissionen im MMS und MWMS, 2021 bis 2030

	Einheit	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	Kumuliert 2021-2030
ESR-Emissionen im MMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	404,5	390,6	403,2	398,1	385,2	374,5	361,8	346,8	332,4	316,5	3.714,4
Änderung ggü. 2005*	%	-16,5%	-19,4%	-16,8%	-17,9%	-20,5%	-22,7%	-25,3%	-28,5%	-31,4%	-34,7%	
ESR-Emissionen im MWMS	Mio. t CO ₂ -Äq.	404,5	390,6	391,0	384,2	369,8	357,4	343,3	326,5	309,5	290,6	3.568,1
Änderung ggü. 2005*	%	-16,5%	-19,4%	-19,3%	-20,7%	-23,7%	-26,3%	-29,2%	-32,6%	-36,1%	-40,0%	
Soll-ESR für DE	Mio. t CO ₂ -Äq.	427,3	413,2	391,9	370,5	349,2	342,9	317,8	292,6	267,5	242,3	3.415,2
Lücke zwischen MMS/Soll-ESR	Mio. t CO ₂ -Äq.	-22,8	-22,6	11,4	27,6	36,1	31,6	44,1	54,2	64,9	74,2	298,6
Lücke zwischen MWMS/Soll-ESR	Mio. t CO ₂ -Äq.	-22,2	-22,6	-0,9	13,7	20,7	14,5	25,5	33,8	42,0	48,2	152,3

Anmerkung: * Änderung gegenüber den in Europäische Kommission (2020) fixierten Emissionsmengen für das Jahr 2005

Quelle: (UBA 2023a), (EEA 2023), Modellierung Öko-Institut

Tabelle 112: Für den ESR-Zielpfad genutzte Daten, in Mio. t CO₂-Äq.

Tabellenkopf	2021	2022	2023
Gesamtemissionen exkl. LULUCF	760,4	745,6	798,4
Abzüglich Emissionen EU-ETS stationär	-355,1	-354,0	-392,9
Abzüglich Emissionen inländischer Flugverkehr	-0,7	-1,0	-2,3
Berechnete ESR-Emissionen	404,5	390,6	403,2

Quellen: Gesamtemissionen und Flugverkehr für 2021 und 2022: (UBA 2023a); Emissionen EU-ETS 2021 und EEA (2023); Emissionen für 2023: Modellierung MMS

Die folgenden beiden Tabellen zeigen für die KSG-Sektoren die Treibhausgasemissionen unterteilt in EU-ETS-Emissionen und ESR-Emissionen. Für die ESR-Emissionen wiederum wird zusätzlich dargestellt, welche Emissionen unter den nEHS fallen und welche außerhalb sind.

Tabelle 113: Treibhausgasemissionen im MMS in EU-ETS, ESR und nEHS nach KSG-Sektoren in Mio. t CO₂-Äq.

	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Energiewirtschaft	259,5	217,6	79,9	61,6	41,6	42,6	44,4
EU-ETS	223,4	184,2	51,3	38,2	23,7	23,9	25,2
ESR	36,1	33,5	28,7	23,5	18,0	18,7	19,3
<i>davon nEHS</i>		23,5	20,1	16,1	11,7	12,5	13,1
<i>davon sonstige ESR</i>		9,9	8,5	7,4	6,2	6,2	6,2
Industrie	182,7	169,8	127,1	91,8	72,0	63,0	58,2
EU-ETS	139,4	132,2	96,8	66,2	49,5	41,8	38,1
ESR	43,4	37,6	30,4	25,6	22,4	21,2	20,0
<i>davon nEHS</i>		25,8	22,6	18,8	16,1	15,0	13,9
<i>davon sonstige ESR</i>		11,9	7,7	6,8	6,3	6,2	6,2
Gebäude	121,4	103,2	78,3	52,7	37,6	31,0	26,1
EU-ETS	0,5	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
ESR	120,9	102,8	77,9	52,5	37,5	30,9	26,0
<i>davon nEHS</i>		101,5	76,6	51,1	36,1	29,6	24,8
<i>davon sonstige ESR</i>		1,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,2
Verkehr	163,8	145,4	118,3	86,5	54,3	33,7	21,7
EU-ETS ^a	2,2	2,4	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0
ESR	161,6	143,0	115,9	84,2	52,1	31,6	19,6
<i>davon nEHS</i>		140,2	109,9	80,7	49,5	29,1	17,2
<i>davon sonstige ESR</i>		2,8	6,1	3,6	2,6	2,4	2,4
Landwirtschaft	64,4	60,8	57,9	56,6	55,8	55,6	55,5
EU-ETS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
ESR	64,4	60,8	57,9	56,6	55,8	55,6	55,5
<i>davon nEHS</i>		5,8	5,4	5,2	4,8	4,7	4,6
<i>davon sonstige ESR</i>		55,0	52,6	51,4	51,0	50,9	50,9
Abfallwirtschaft & Sonstige	10,1	7,5	5,7	4,4	3,6	3,2	2,9
ETS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
ESR	10,1	7,5	5,7	4,4	3,6	3,2	2,9

	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
davon nEHS		NA	NA	NA	NA	NA	NA
davon sonstige ESR		7,5	5,7	4,4	3,6	3,2	2,9
Summe	802,0	704,4	467,3	353,7	264,9	229,0	208,8
Stationärer EU-ETS	363,3	316,8	148,4	104,6	73,4	65,9	63,4
Nationaler Flugverkehr im EU-ETS ^a	2,2	2,4	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0
ESR	436,5	385,2	316,5	246,8	189,3	161,0	143,3
davon nEHS		296,8	234,6	171,8	118,3	90,9	73,6
davon sonstige ESR		88,4	81,9	74,9	71,0	70,1	69,7

Anmerkung: ^a Bezieht sich lediglich auf vom Inventar erfassten nationalen Flugverkehr. Der ebenfalls vom ETS erfasste internationale Flugverkehr ist nicht dargestellt.

Quelle: (UBA 2022b), (UBA 2022a), Modellierung Öko-Institut, Fraunhofer-ISI und IREES

Tabelle 114: Treibhausgasemissionen im MWMS in EU-ETS, ESR und nEHS nach KSG-Sektoren in Mio. t CO₂-Äq.

	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Energiewirtschaft	259,5	218,2	78,0	52,1	39,0	38,6	40,7
EU-ETS	223,4	189,0	51,8	30,7	19,8	18,9	20,2
ESR	36,1	29,2	26,2	21,4	19,1	19,7	20,5
davon nEHS		19,3	17,8	14,5	13,1	13,8	14,7
davon sonstige ESR		9,9	8,5	6,9	6,0	5,9	5,8
Industrie	182,7	166,9	120,4	84,6	65,4	56,5	50,9
EU-ETS	139,4	130,2	92,6	62,6	46,9	39,5	35,5
ESR	43,4	36,7	27,8	22,0	18,5	17,0	15,4
davon nEHS		25,0	20,7	16,3	13,5	12,1	10,6
davon sonstige ESR		11,7	7,1	5,7	5,0	4,9	4,8
Gebäude	121,4	96,2	68,2	37,7	20,5	14,2	10,8
EU-ETS	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
ESR	120,9	95,8	67,9	37,5	20,4	14,1	10,7
davon nEHS		94,5	66,6	35,9	18,7	12,5	9,2
davon sonstige ESR		1,3	1,4	1,6	1,7	1,6	1,5
Verkehr	163,8	144,1	111,4	73,2	35,7	15,3	4,0
EU-ETS ^a	2,2	2,4	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0
ESR	161,6	141,7	109,0	70,9	33,5	13,2	2,0
davon nEHS		138,9	102,9	67,5	31,2	11,1	0,1

	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<i>davon sonstige ESR</i>		2,8	6,1	3,4	2,3	2,1	1,9
Landwirtschaft	64,4	59,0	53,9	52,5	51,5	51,2	50,8
EU-ETS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
ESR	64,4	59,0	53,9	52,5	51,5	51,2	50,8
<i>davon nEHS</i>		5,8	5,4	5,2	4,8	4,7	4,6
<i>davon sonstige ESR</i>		53,2	48,6	47,3	46,7	46,5	46,2
Abfallwirtschaft & Sonstige	10,1	7,5	5,7	4,4	3,6	3,2	2,9
ETS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
ESR	10,1	7,5	5,7	4,4	3,6	3,2	2,9
<i>davon nEHS</i>		NA	NA	NA	NA	NA	NA
<i>davon sonstige ESR</i>		7,5	5,7	4,4	3,6	3,2	2,9
Summe	802,0	691,8	437,7	304,5	215,6	178,9	160,1
Stationärer EU-ETS	363,3	319,6	144,7	93,5	66,8	58,5	55,7
Nationaler Flugverkehr im EU-ETS ^a	2,2	2,4	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0
ESR	436,5	369,8	290,6	208,7	146,6	118,3	102,3
<i>davon nEHS</i>		283,5	213,3	139,3	81,3	54,3	39,2
<i>davon sonstige ESR</i>		86,3	77,3	69,3	65,3	64,0	63,1

Anmerkung: ^a Bezieht sich lediglich auf vom Inventar erfassten nationalen Flugverkehr. Der ebenfalls vom ETS erfasste internationale Flugverkehr ist nicht dargestellt.

Quelle: (UBA 2022b), (UBA 2022a), Modellierung Öko-Institut, Fraunhofer-ISI und IREES